

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**ANÁLISE NUMÉRICA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO DE AR PARA A
REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO CASCO *DUISBURG TEST CASE***

por

RAUL LIMA PORTELA BISPO

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional.

Rio Grande, setembro de 2022

Raul Lima Portela Bispo

**“ANÁLISE NUMÉRICA DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO DE AR PARA A
REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO AVANÇO DO CASCO DUISBURG TEST CASE”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Modelagem Computacional.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 JEFERSON AVILA SOUZA
Data: 11/10/2022 11:29:05-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Jeferson Avila Souza (Orientador – FURG)

Documento assinado digitalmente
 CRISTOFER HOOD MARQUES
Data: 11/10/2022 15:40:59-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Crístopher Hood Marques (Coorientador – FURG)

Documento assinado digitalmente
 CLAUDIO RODRIGUES OLINTO
Data: 31/10/2022 11:33:01-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Cláudio Rodrigues Olinto (FURG)

Documento assinado digitalmente
 LIERCIO ANDRE ISOLDI
Data: 12/10/2022 09:00:06-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (FURG)



Digitally signed by JEAN
DAVID JOB EMMANUEL MARIE
CAPRACE:06128030742
Date: 2022.10.18 14:46:31 -03'00'

Prof. Dr. Jean David Job Emmanuel Marie Caprace (UFRJ)

Rio Grande – RS
2022

Ficha Catalográfica

B622a Bispo, Raul Lima Portela.

Análise numérica dos parâmetros de injeção de ar para a redução da resistência ao avanço do casco *Duisburg Test Case* / Raul Lima Portela Bispo. – 2022.
82 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS, 2022.

Orientador: Dr. Jeferson Avila Souza.

Coorientador: Dr. Crístofer Hood Marques.

1. Injeção de ar ALDR 2. Resistência por arrasto viscoso
3. Estudo numérico 4. Cascos eficientes I. Souza, Jeferson Avila
II. Marques, Crístofer Hood III. Título.

CDU 656.61

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família pelo suporte durante a jornada da vida. Dedico esse trabalho: primeiramente a ancestralidade, *in memoriam*, de meu avô, Audatino Evangelista Nascimento; a minha sábia e resiliente avó, Maria Ferreira Lima; aos meus alicerces, pai e mãe, Raimundo Portela Bispo e Joanita Lima Portela Bispo, respectivamente; a minha referência de ser humano, meu irmão, Juan Lima Portela Bispo; e ao meu sobrinho, Valentim Lima Bahia Portela, por todo amor, alegria e esperança que representa à toda família.

Agradeço ao orientador professor Dr. Jeferson Avila Souza e ao coorientador professor Dr. Crístopher Hood Marques por serem o vetor qualidade deste trabalho, emanando expertise e dedicação didática.

Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande, FURG, por oferecer um ensino público e de qualidade.

Agradeço ao Programa de Apoio Estudantil, PRAE, por garantir as condições básicas de estudo para alunos em situação de vulnerabilidade socioeconômica.

RESUMO

Estudos de melhorias buscando cascos de embarcações mais eficientes têm se tornado acessíveis com o avanço de técnicas numéricas e recursos computacionais nas últimas décadas. 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), em escala de 1:59. O casco apresenta uma geometria genérica de porta-contentores mais modernos, pertencendo à sexta geração de navios porta-contentores, os Super Porta-Contentores. Maiores que os navios *Post Panamax Plus*, possuem uma capacidade de carga de 14.000 TEU. Na categoria de cascos de deslocamento, o casco DTC é frequentemente utilizado na validação de estudos hidrodinâmicos. Especificamente, a injeção de ar na parte inferior do casco é uma técnica que consiste em formar uma película de ar entre o casco e a água, visando a redução do arrasto viscoso. Tal método é conhecido como ALDR, sigla em inglês para *Air Layer Drag Reduction*. Parâmetros como: velocidade do casco, quantidade de bicos injetores, ângulos de injeção e vazões de ar são variados a fim de avaliar a relação desses parâmetros com a eficiência do método. A simulação numérica conta com as metodologias: Volumes Finitos para discretização das equações de conservação, RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) na equação do movimento e κ - ω -SST no modelo de turbulência. Por fim, foi encontrada uma redução de 19,13% na resistência total ao avanço e 14,13% de redução líquida na potência, considerando a potência mecânica necessária no método de injeção de ar. Estes são bons resultados, considerando o grande consumo de combustíveis fósseis no transporte marítimo mundial.

Palavras-chave. Injeção de ar ALDR, resistência por 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. The present study uses a numerical approach, with OpenFOAM free software, as a strategy to analyze the efficiency of using air injection at the bottom of the Duisburg Test Case (DTC) hull, in an 1:59 scale. The chosen generic hull, which geometry refers to modern container carries, belongs to the sixth generation of container ships, the Super Container Ships. Larger than the Post Panamax Plus Ships, they have a load capacity of 14,000 TEU. In the category of displacement hulls, the DTC hull is 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. Parameters such as hull speed, number of injection nozzles, injection angles, and airflow are varied, to verify the relationship of these parameters with the efficiency of the method. 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 κ - ω -SST in the turbulence model. Finally, the velocity of 1,668 m/s performed better for the air injection method, and reductions were around: 19.13% for total drag resistance and a 14.13% for net power reduction, considering the needed energy for air inject method. Promising results, considering the large consumption of fossil fuels in the world marine transport.

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

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivo Geral.....	16
1.2. Objetivos Específicos.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1. Tipos de Navios.....	20
3.2. Parâmetros do Casco.....	21
3.3. Viscosidade.....	23
3.4. Resistência ao Avanço.....	24
3.5. Análise Dimensional e Semelhança.....	26
3.5.1. Teorema Pi de Buckingham.....	26
3.6. Adimensional de Euler.....	29
3.7. Adimensional de Reynolds.....	29
3.8. Adimensional de Froude.....	30
3.9. Semelhança.....	30
4. METODOLOGIA.....	32
4.1. Modelagem Matemática.....	33
4.2. Condições de Contorno.....	35
4.3. Discretização Espacial.....	36
4.3.1. Integração do modelo CAD na Malha (SnappyHexMesh).....	37
4.4. Solução Numérica.....	38
4.5. Independência da solução com a malha.....	40
4.6. Independência do passo de tempo.....	41
4.7. Validação.....	41
4.8. Injeção de Ar.....	42
4.9. Árvore de Ensaios.....	47
4.10. Redução da Resistência ao Avanço.....	48
4.11. Redução da Potência.....	49
5. RESULTADOS.....	52
5.1. Resistências Sem Injeção de Ar.....	53

5.2. Reduções das Resistências.....	53
5.3. Reduções Líquidas de Potência.....	58
5.4. Análise Qualitativa.....	65
6. CONCLUSÕES.....	71
6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	72
7. REFERÊNCIAS.....	74
8. APÊNDICE: configurações e implementações de algoritmos no OpenFOAM.....	77
8.1. Algoritmo de controle da injeção de ar no fundo do casco.....	78
8.2. Algoritmo de distribuição espacial dos bicos injetores no fundo do casco.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Navio porta contentores CMA CGM Bougainville. Fonte: (Guebey, 2021).....	15
Figura 2. Parâmetros Espaciais de um Casco. Fonte: MAN (2013).....	22
Figura 3. Definição do coeficiente de bloco. Fonte: MAN (2013).....	23
Figura 4. Domínio Computacional.....	32
Figura 5. Modelo CAD. a) vista lateral, b) vista inferior.....	37
Figura 6. Malha contendo o casco DTC. a) Vista lateral geral, b) Ampliação na região da proa	38
Figura 7. Ângulo de injeção no fundo do casco.....	44
Figura 8. Fundo do casco. a) divisão das regiões no fundo, b) 4 bicos injetores, c) 6 bicos injetores, d) 8 bicos injetores.....	45
Figura 9. Árvore de Ensaios.....	47
Figura 10. Resistência em função do tempo simulado.....	52
Figura 11. Redução da resistência total ao avanço para a velocidade de 1,335 m/s: a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.....	54
Figura 12. Redução da resistência total ao avanço para a velocidade de 1,668 m/s: a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.....	56
Figura 13. Redução líquida de potência para a velocidade de 1,335 m/s: a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.....	59
Figura 14. Redução líquida para a velocidade de 1,668 m/s. a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.....	61
Figura 15. Fração volumétrica de água sobre o casco ‘VC1-QB6-EC8-AI5’: a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco.....	65
Figura 16. Fração volumétrica de água sobre o casco ‘VC1-QB4-EC4-AI25’: a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco.....	66
Figura 17. Fração volumétrica de água sobre o casco ‘VC2-QB8-EC8-AI5’: a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco.....	67
Figura 18. Fração volumétrica de água sobre o casco ‘VC2-QB4-EC4-AI25’: a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco.....	68
Figura 19. Perfil para pressão para o casco VC2-QB8-EC8-AI5.....	69
Figura 20. Perfil de velocidades para o casco VC2-QB8-EC8-AI5.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de Navios.....	20
Tabela 2. Coeficientes de bloco e velocidade.....	23
Tabela 3. Parcelas das resistências em função da velocidade do navio.....	26
Tabela 4. Dimensões do casco.....	33
Tabela 5. Condições de Contorno.....	36
Tabela 6. Configurações da solução numérica.....	39
Tabela 7. Propriedades físicas do problema (Fox et al., 2010).....	39
Tabela 8. Teste de independência da solução com a malha.....	40
Tabela 9. Independência da solução com o passo de tempo.....	41
Tabela 10. Validação da solução numérica.....	42
Tabela 11. Quadro de identificação.....	48
Tabela 12. Vazões volumétricas requeridas no casco em escala.....	50
Tabela 13. Resistência para o casco padrão.....	53
Tabela 14. Potências requeridas pelo compressor.....	58
Tabela 15. Resistências de pressão com injeção de ar.....	63
Tabela 16. Resistências viscosas com injeção de ar.....	63
Tabela 17. Resistências ao avanço com injeção de ar.....	64
Tabela 18. Resultados das reduções líquidas de potência.....	64
Tabela 19. Condições de contorno para cada superfície.....	77

LISTA DE SÍMBOLOS

a	coeficiente angular [-]
A_{bico}	área do bico injetor [m ²]
A_m	área transversal a meia-nau [m ²]
$A_{injeção}$	ângulo de injeção [°]
B_{ar}	largura da camada de ar [m]
B_{WL}	boca na linha d'água [m]
C	coeficiente adimensional de correção [-]
C_A	coeficiente de arrasto com o ar [-]
C_b	coeficiente de bloco [-]
C_T	coeficiente de arrasto total [-]
C_F	coeficiente de arrasto viscoso [-]
C_R	coeficiente residual [-]
D	calado médio [m]
D_A	calado na popa [m]
D_F	calado na proa [m]
$distX$	distância entre bicos injetores no eixo X [m]
$distY$	distância entre bicos injetores no eixo Y [m]
E	erro relativo [%]
Eu	número de Euler [-]
F_i	forças de campo [N/m ³]
Fr	número de Froude [-]
g	aceleração da gravidade [m/s ²]
L	base dimensional de comprimento [m]
L_{bicosX}	comprimento do bico injetor no eixo X [m]
L_{bicosY}	comprimento do bico injetor no eixo Y [m]
L_{OA}	comprimento total do protótipo [m]
L_{WL}	comprimento na linha d'água [m]
L_{pp}	comprimento entre perpendiculares [m]
m	base dimensional de massa [kg]
n	constante politrópica [-]
p	pressão [Pa]
P	força dinâmica de pressão [N]
P_c	potência no compressor [W]
P_T	potência efetiva casco padrão [W]
P_{Tar}	potência efetiva com o método de injeção de ar [W]
P_{red}	potência efetiva reduzida no casco [W]
P_1	pressão de entrada do compressor [Pa]
P_2	pressão total na saída dos bicos injetores [Pa]
Q_{ar}	vazão volumétrica de ar [m ³ /s]
Q'_{ar}	vazão volumétrica de ar em desenvolvimento [m ³ /s]
Q_{bicos}	quantidade de bicos injetores [-]
Re	número de Reynolds [-]
R	força dinâmica [N]

R_{Ar}	resistência com o ar [N]
RA	redução da resistência total ao avanço [%]
RL	redução líquida de potência [%]
R_T	resistência total ao avanço [n]
R_{Tar}	resistência total ao avanço com a injeção de ar [n]
R_R	resistência residual [n]
R_{red}	parcela da resistência total ao avanço reduzida [N]
R_F	resistência ao atrito viscoso [n]
t	tempo corrente de simulação [s]
t_{ar}	vazão de ar equivalente [m]
T	base dimensional de tempo [s]
Sm	área molhada do casco [m ²]
u	velocidade do escoamento [m/s]
V	velocidade do casco [m/s]
V_{arX}	velocidade de injeção do ar no eixo X [m/s]
V_{arZ}	velocidade de injeção do ar no eixo Y [m/s]
$Y+$	adimensional de qualidade da malha [-]
∇	deslocamento volumétrico [m ³]

Símbolos Gregos

α	fração volumétrica [-]
β	constante empírica [-]
κ	energia cinética turbulenta [m ² /s ²]
η_B	eficiência do hélice [-]
η_c	eficiência do compressor [-]
η_H	eficiência do casco [-]
η_S	eficiência do eixo [-]
η_T	eficiência total do sistema propulsivo [-]
Δt	passo de tempo [s]
μ	viscosidade dinâmica [N.s/m ²]
$\mu_{\acute{a}gua}$	viscosidade dinâmica da água [N.s/m ²]
μ_{ar}	viscosidade dinâmica do ar [N.s/m ²]
μ_t	viscosidade turbulenta limite [m ² /s]
ν	viscosidade cinemática [m ² /s]
Π	grupo adimensional [-]
ρ	massa específica [kg/m ³]
$\rho_{\acute{a}gua}$	massa específica da água [kg/m ³]
ρ_{ar}	massa específica do ar [kg/m ³]
σ_{ω}	constante empírica [-]
σ_d	constante empírica [-]
τ	tensão de cisalhamento [Pa]
ω	taxa de dissipação específica [1/s]

Sub índices

A	popa
ar	ar
água	água
b	bloco
c	compressor
F	atrito viscoso
i	índice
L	reduções líquidas
m	meia-nau
OA	comprimento total
R	residual
PP	entre perpendiculares
red	reduzida
t	turbulento
T	total
WL	linha d'água
1	entrada
2	saída

LISTA DE ABREVIATURAS

AI	Ângulo de Injeção [°]
ALDR	<i>Air Layer Drag Reduction</i>
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
BB	Bombordo
BDR	<i>Bubbles Drag Reduction</i>
CAD	<i>Computer Aided Designer</i>
CC	Condições de Contorno
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DTC	Duisburg Test Case
DWT	Dead Weight Tonnage [ton]
EB	Boreste
EC	Espessura da Camada de Ar [mm]
ISMT	<i>Institute of Ship Technology Ocean Engineering and Transport Systems</i>
ITTC	<i>International Towing Tank Conference</i>
PIMPLE	<i>Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
PISO	Pressure Implicit Split Operator
QB	Quantidade de Bicos
RANS	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>
RL	Reduções Líquidas [%]
SBP	<i>Senior Personal Banker</i>
SI	Sistema International
SIMPLE	Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>
VC	Velocidade do Casco [m/s]
VOF	<i>Volume of Fluid</i>
WAIP	<i>Winged Air Induction Pipe</i>

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), em 2021 mais de 80% dos produtos comercializados no mundo foram transportados por vias marítimas. De acordo com dados públicos da ANTAQ (2021) neste mesmo período foram transportados no Brasil 16,3 milhões de toneladas por vias interiores, 35 milhões de toneladas por cabotagem e 118 milhões de toneladas em produtos por transporte de longo curso, intercontinentalmente. O custo deste transporte está diretamente associado ao consumo de combustível pelas embarcações. Ao reduzir a resistência ao avanço da embarcação, há uma consequente 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 às forças hidrodinâmicas, a maior parcela de perda energética é devido ao arrasto viscoso, 70 a 90% da resistência total ao avanço.

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 às diferenças de viscosidade dinâmica e massa específica, contribuem para uma significativa redução do arrasto viscoso (Elbing et al., 2008).

Consequentemente, o arrasto total também diminui, resultando em economias de combustível e/ou aumentando a velocidade de cruzeiro.

Este método, redução do arrasto utilizando o ar, está atualmente dividido 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 à vazão de injeção de ar (Merkle e Deutsch, 1992).

Adotando o ALDR, o casco objeto do estudo no qual será injetado o ar pertence ao porta-contentores *Duisburg Test Case* (DTC). Classificado como Post-Panamax¹ é um casco de deslocamento moderno e bastante utilizado para validação de métodos numéricos atuais. Na Figura 1 é mostrado um exemplar de porta-contentores desta classificação.



Figura 1. Navio porta contentores CMA CGM Bougainville. **Fonte:** (Guebey, 2021)

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. Com isso, o

¹Navios que superam a dimensão máxima das eclusas do canal do Panamá

presente estudo investiga a relação desses parâmetros na redução do arrasto viscoso atingido pelo método de injeção de ar. O cruzamento entre tais parâmetros resultam em uma árvore de ensaios contendo 54 simulações.

1.1.Objetivo Geral

Analisar, através de simulações numéricas, o método de injeção de ar (ALDR) na parte inferior do casco DTC, buscando soluções para a redução do arrasto viscoso e, conseqüentemente, o arrasto total ao avanço.

1.2.Objetivos Específicos

Avaliar a relação entre os parâmetros da injeção de ar e a respectiva redução no arrasto viscoso;

Investigar os efeitos dos parâmetros na injeção de ar, quanto: à vazão, ao ângulo de injeção e à quantidade de bicos injetores;

Investigar o ganho líquido energético com a aplicação do método ALDR.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta alguns trabalhos que buscam promover a eficiência de cascos de embarcações na categoria de deslocamento, utilizando o método de injeção de ar.

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 para escoamentos em placa plana.

Dogrul et al. (2010) abordam o tema com a estratégia de injeção de ar na forma dispersa, ou seja, microbolhas. Seu estudo de natureza numérica é aplicado a uma placa plana, no qual utiliza a norma ITTC de 1957 com objetivo de encontrar o valor de arrasto viscoso, posteriormente, comparar com os valores encontrados pelo método de injeção de ar. Como resultado, o estudo aponta uma redução de até 45% da resistência por atrito viscoso. Os autores concluem que para cascos com menores números de Froude, o método de injeção de ar por microbolhas se mostra mais efetivo.

Moctar et al. (2012) desenvolveu pelo *Institute of Ship Technology Ocean Engineering and Transport Systems*, ISMT, ensaios em tanque hidrodinâmico e estudou as estratificações da resistência ao avanço no DTC, em escala reduzida de 1:59, em forças viscosas e forças residuais. Os valores levantados vêm sendo utilizados na validação de estudos experimentais e, principalmente, numéricos que utilizam o casco DTC como objeto do estudo.

Jang et al. (2014) investigaram, experimentalmente, a redução da energia empregada na propulsão de um casco em escala com o método de injeção de ar no fundo do casco. O casco é referente a um navio graneleiro na categoria supramax, possuindo 200 m e 66.000 DWT (do inglês, *deadweight tonnage*²). Seu modelo para ensaio foi construído na escala 1:24. Injetando ar por seis bicos, na região plana do fundo de proa, foi encontrada uma redução de 8~10% na potência requerida pelo sistema propulsivo e uma redução líquida de 5~6%, descontando a energia necessária na injeção de ar requerida pelo método. Qualitativamente foi identificado no estudo, para alguns ensaios, vazamentos precoces de ar pelas laterais do casco, o que indicou aos autores possíveis melhores resultados frente a um estudo de arranjo dos bicos injetores.

²É a capacidade de carga de um navio, incluindo combustíveis, óleos lubrificantes entre outras cargas necessárias a operação do navio. Usado para indicar o porte do navio (MAN, 2013).

Zhang et al. (2017) apresentaram um método inovador na formação de ar com o intuito de gerar bolhas, as quais teriam a função de reduzir o arrasto viscoso. O dispositivo é um perfil de hidrofólio com pequenas ranhuras e orifícios os quais promovem a formação de regiões de baixas pressões induzindo a ocorrência da cavitação, deste modo, há o surgimento de bolhas úteis ao estudo. O trabalho investiga numericamente o dispositivo frente à redução da resistência ao atrito, através da análise dos efeitos da profundidade submersa do hidrofólio, diâmetro do orifício, posição do orifício e número de orifícios na formação da camada de ar, concluindo que, o dispositivo pode ser perfeitamente aplicado a cascos de embarcações.

Park e Lee (2018) estudaram, experimental e numericamente, o efeito de múltiplas regiões de injeção de ar no fundo do casco. O estudo foi aplicado em um casco na escala de 1:33, pertencente a um navio tanque com volume deslocado de 50.000 m³. Foi observado 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.

Yanuar et al. (2018) investigaram, em tanque hidrodinâmico, a redução do arrasto viscoso devido à injeção de ar nos regimes BDR e ALDR na barçaça autopropelida Indonesiam SPB. A barçaça possui 56 m de comprimento e 14,6 m de largura. O modelo simulado foi concebido no fator de escala de 1:28. Os ensaios foram realizados na faixa de velocidade relacionada ao intervalo de número de Froude 0,11 ~ 0,31. Como resultado os autores obtiveram uma redução de até 90% da resistência viscosa na barçaça. E, dentre os regimes, o ALDR foi o que apresentou melhor desempenho.

Hao et al. (2019) analisa a viabilidade do uso da camada de ar como possível tecnologia de redução de arrasto viscoso. Trata-se de um estudo de natureza experimental, que consiste em gerar uma camada de ar no fundo do casco do modelo físico, região similar à superfície de uma placa plana, e em seguida realizar o experimento tanque de reboque hidrodinâmico. A forma das camadas de ar foi observada, e as mudanças de resistência ao atrito local e à resistência total foram medidas. Um modelo de navio graneleiro portando 95.000 DWT é usado como ferramenta na análise do método de redução de arrasto viscoso devido à camada de ar. Os autores concluem que o método quando escalonado ao modelo em escala real reduziu a potência propulsiva necessária em 15%, além do mais, o método alcança resultados mais animadores quando aplicado a cascos que apresentam baixo número de Froude e grandes áreas molhadas.

Hao e Yongpeng (2019) desenvolveram um método de enclausuramento do ar no fundo do casco, possibilitando economia na injeção de ar. O estudo numérico do método é aplicado a um modelo de casco em escala referente a um casco de navio graneleiro, apresentando comprimento

entre perpendiculares de 231 m e deslocamento de 92.000 toneladas. A observação do efeito da espessura de ar e sua cobertura no fundo do casco pertencem aos objetivos específicos do estudo. Realizando ensaios experimentais em tanques hidrodinâmicos, os resultados indicaram uma redução na resistência ao avanço total no modelo de até 16%. Contudo, o método implica na obrigatoriedade de injeção de ar, pois a geometria da câmara de fundo apresenta facetas que uma vez preenchida com água, e não ar, aumenta a resistência total ao avanço da embarcação.

Zhao e Zong (2022) avaliaram, numericamente, a eficiência do método de injeção de ar para três velocidades operacionais de um casco em função dos regimes de injeção de ar. Dois regimes foram analisados para estas velocidades, BDR e ALDR. Ficou evidenciado no estudo que, a performance do método está diretamente ligada à área de cobertura atingida pelo ar injetado no fundo do casco, sendo esta cobertura sensível à velocidade do casco. Desta forma os autores concluem que o regime BDR performa melhor na baixa velocidade e o regime ALDR nas demais, ou seja, média e alta velocidades operacionais do referido casco.

Estudos do método de injeção de ar aplicado a cascos de embarcações e simplificações destas como placas planas encontrados na literatura, concluem resultados sem avaliar a correlação com os parâmetros (ângulo de injeção, vazão de ar e quantidades de bicos) presentes na injeção. Elbing et al. (2008), Dogrul et al. (2010), Yanuar et al. (2018), Jang et al. (2014), Hao et al. (2019), Zhao e Zong (2022) analisaram a redução do arrasto viscoso somente em função da vazão de ar. Zhang et al. (2017) indicou a possibilidade de formar ar na região inferior de um casco com o objetivo de reduzir o arrasto viscoso. Já Park e Lee (2018) correlacionaram o resultado do método com a quantidade e regiões de bicos, fixando os demais parâmetros. Por fim, o método de enclausuramento de ar no fundo do casco proposto por Hao e Yongpeng (2019) focou, exclusivamente, no objetivo de criar um método que possibilite o direcionamento do escoamento de ar e minimize as perdas de ar devido às fugas nos bordos do casco.

Assim sendo, o método de injeção de ar proposto pelo presente estudo correlaciona os parâmetros entre si, avaliando a eficiência do método em razão da variação de cada parâmetro. Os bicos injetores são dispostos no fundo do casco sem modificar geometricamente o casco. Desta forma, não há efeito negativo na eficiência do casco na hipótese da não injeção de ar e dispensa a presença da depressão formada pela câmara no fundo do casco, a qual ocupa parte do espaço útil da embarcação.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são abordados alguns dos principais conceitos para a compreensão do estudo. Em parte, este referencial teórico tem caráter introdutório, contendo: deduções, definições, equações, ilustrações e nomenclaturas necessárias à leitura.

3.1. Tipos de Navios

De acordo com MAN (2013) os navios são divididos em diferentes categorias e classes, de acordo com a natureza de sua carga. A Tabela 1 relaciona os tipos e classes com as funções. Os mais frequentes no modal marítimo são navios-tanque, graneleiros e porta-contentores.

Tabela 1. Tipos de Navios

Tipo	Classe	Função
Navio tanque	Petroleiro	Transportador de óleo cru
	Gaseiros	Transporte de gás natural liquefeito
		Transporte de gás liquefeito de petróleo
Graneleiro	Graneleiro	Transporte de grão e minérios
Porta Contentores	Porta Contentores	Transportar contentores (contêineres)
Navio de rolagem	<i>Roll on - Roll off</i>	Acesso ao navio por rampas de rolagem. Geralmente transportam veículos
Cargueiro Geral	Cargueiro	Transporte de produtos diversos
Navio Refrigerado	Navio Frigorífico	Transporte de frios e cargas perecíveis
Navio de Passageiros	<i>Ferry Boat</i>	Transporte de pessoas e veículos
	Cruzeiro	Transporte de pessoas

Fonte: MAN (2013)

3.2. Parâmetros do Casco

Um dos principais indicadores geométricos de um casco é o deslocamento volumétrico, representado pelo símbolo ∇ . É igual ao volume de água deslocado quando o casco está na condição de flutuação, levando em consideração a massa específica do fluido em que está imerso (Fox et al., 2010).

O peso de uma embarcação é dividido em duas partes: peso morto DWT e o LWT (lightweight tonnage). Essa divisão ocorre devido à necessidade de diferenciar a capacidade de carga da embarcação da massa correspondente a sua estrutura, ficando o DWT responsável por apontar a capacidade de carga e o LWT indicar a massa, a seco, da embarcação (MAN, 2013). A relação entre esses parâmetros fica

$$DWT = \nabla \rho - LWT \quad (1)$$

onde, ∇ é deslocamento volumétrico [m^3], ρ é a massa específica da água [kg/m^3], DWT e o LWT são escritos em toneladas métricas [ton]. Com relação aos parâmetros espaciais, os comprimentos mais importantes para a análise de um casco são: L_{OA} é o comprimento total [m]; L_{WL} é o comprimento na linha d'água [m]; L_{pp} é o comprimento entre perpendiculares (entre proa e popa) [m]; B_{WL} é a largura na linha d'água [m]; D é o calado médio [m]; D_F é o calado na proa [m]; D_A é o calado na popa [m]; e A_m a área transversal a meia-nau [m^2]. Na Figura 2 estão representados esses parâmetros.

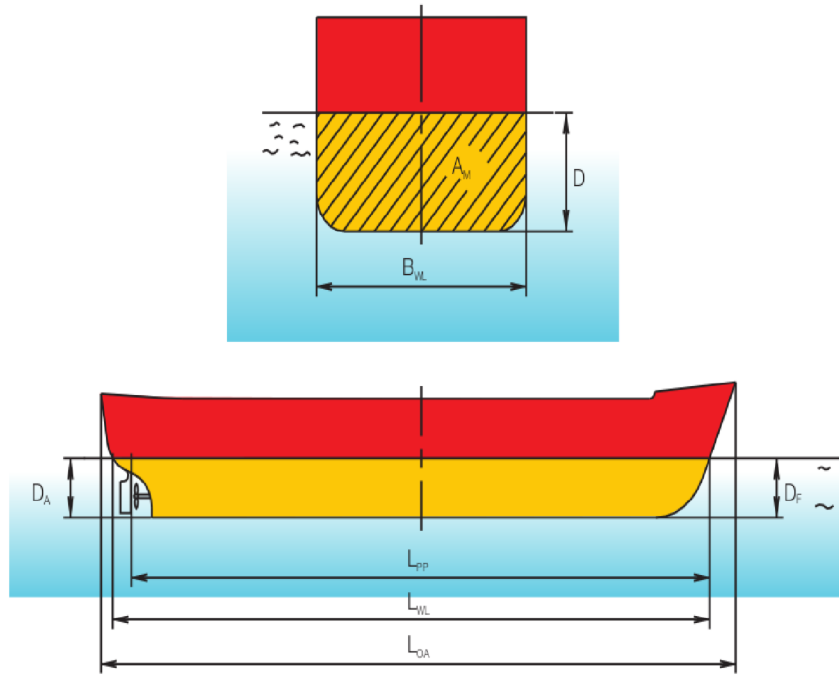


Figura 2. Parâmetros Espaciais de um Casco. **Fonte:** MAN (2013)

Outro parâmetro geométrico importante é o coeficiente de bloco (C_b) ele indica, sumariamente, o propósito de aplicação do casco. É definido pela razão entre o deslocamento e o volume formado pelas dimensões: L_{WL} , B_{WL} e D (MAN. 2013). A relação fica

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{WL} B_{WL} D} \quad (12)$$

O coeficiente de bloco possui relação com a natureza hidrodinâmica de flutuação do casco, altos coeficientes de bloco indicam cascos cuja a equalização de forças provem exclusivamente da força de empuxo. Denominado de cascos de deslocamento, são empregados no transporte massivo de cargas no modal aquaviário. Portanto, o coeficiente de bloco é um excelente indicador de uso a um determinado casco. Na Figura 3 pode-se observar o domínio de definição do coeficiente de bloco (MAN, 2013).

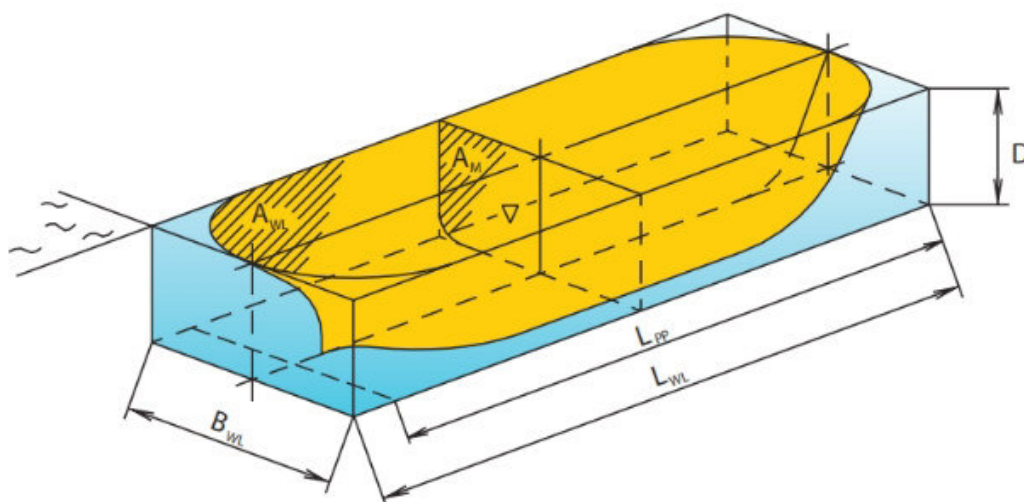


Figura 3. Definição do coeficiente de bloco. **Fonte:** MAN (2013)

Na Tabela 2 é mostrada para cada tipo de navio, a faixa de coeficiente de bloco e a velocidade de cruzeiro. Pode ser observado que, a velocidade desenvolvida é inversamente proporcional ao coeficiente de bloco.

Tabela 2. Coeficientes de bloco e velocidade.

Tipo	Coeficiente de Bloco	Velocidade [m/s]
Barcaça	0,90	2,6 – 5,1
Graneleiro	0,80 – 0,85	6,2 – 8,2
Tanque	0,80 – 0,85	6,2 – 8,8
Carga Geral	0,55 – 0,75	6,7 – 11,3
Porta Contentores	0,50 – 0,70	7,2 – 13,4
Cruzeiro	0,5	7,7 – 13,4

Fonte: MAN (2013)

3.3.Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade dos fluidos que relaciona a tensão de cisalhamento aplicada e o movimento realizado pelo fluido. Assim como a elasticidade está para os sólidos a viscosidade está para os fluidos, porém, uma tensão aplicada a um fluido o deforma continuamente (Fox et al., 2010). Ainda de acordo com Fox et al. (2010), quanto mais viscoso for o fluido, menor será seu

escoamento, dado uma tensão de cisalhamento. A relação oriunda dessa proporcionalidade, escrita para a tensão de cisalhamento, fica

$$\tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (3)$$

em que u é a velocidade do escoamento na direção do eixo coordenado x [m/s], $\partial u / \partial y$ é o gradiente do escoamento [1/s] e μ a viscosidade dinâmica do fluido [Pa s].

A viscosidade pode ser escrita de duas formas: dinâmica, representada por μ [Pa s]; e cinemática, representada por ν [m²/s]. É importante observar que a viscosidade dinâmica considera a massa específica do fluido (Fox et al., 2010).

Alguns fluidos não apresentam proporcionalidade entre a tensão cisalhante aplicada e o escoamento. Esses fluidos em que a viscosidade não se comporta como uma constante, são denominados de fluidos não newtonianos (Fox et al., 2010). O presente estudo ocorre com os fluidos água e ar, fluidos newtonianos, não sendo necessária a abordagem do comportamento de fluidos não newtonianos.

3.4. Resistência ao Avanço

A resistência total ao avanço, representada por R_T , é uma força de oposição ao movimento da embarcação [N]. Está diretamente relacionada com a velocidade, massa específica da água e com os parâmetros geométricos do casco, tanto abaixo da linha d'água quanto acima. Essa resistência é geralmente dividida em três parcelas principais: resistência por atrito viscoso R_F [N], resistência residual R_R [N], e resistência com o ar R_{Ar} [N]. De acordo com MAN (2013) a parcela de resistência residual é dividida entre: atrito viscoso de pressão e geração de onda e, a resistência total ao avanço é definida como

$$R_T = R_F + R_R + R_{Ar} \quad (4)$$

Segundo Fox et al. (2010) a força dinâmica de pressão é dada por

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (5)$$

onde P é a força dinâmica de pressão [N/m²] e V é a velocidade relativa entre o casco e a água [m/s]. Quando a Eq. (5) é multiplicada por um coeficiente adimensional de correção e pela área molhada do casco, obtém-se a força dinâmica atuando em todo corpo (Fox et al., 2010).

$$R = \frac{1}{2} \rho V^2 S m C \quad (6)$$

onde $S m$ é a área molhada do casco [m²] e C o coeficiente adimensional de correção. O coeficiente adimensional de correção e a força dinâmica ficam, respectivamente, compreendidos como: C_F na correção para forças friccionais, R_F [N]; C_R sendo a correção para forças residuais, R_R [N]; C_A para a correção de forças devido o ar, R_{Ar} [N]; e C_T a correção do avanço total, R_T [N].

MAN (2013) informa que alguns fatores influenciam no resultado da força de dinâmica, estas influências são considerados nos respectivos coeficientes (C_R , C_F , C_A e C_T). Na resistência por atrito viscoso a presença de algas e incrustações no casco aumentam o coeficiente de correção friccional (C_F), elevando a resistência ao avanço do casco. Na parcela de resistência residual (C_R) os parâmetros geométricos refletem no padrão de geração de onda, assim como, o atraso ou descolamento prematuro da camada limite alteram o valor do coeficiente de correção residual. Para a resistência devido ao ar (C_A), o principal fator de mudança na resistência é a distribuição de cargas no navio no convés principal, pois a resistência é proporcional à área transversal acima da linha d'água. Esse cuidado é geralmente maior para navios do tipo porta-contentores, onde a resistência com o ar pode chegar a 10% da resistência total ao avanço. No entanto, representa cerca de 2% em outros tipos de navios. A velocidade é o fator que interfere nas três parcelas de resistência, porém, a parcela de resistência residual é a mais afetada com a sua variação. Na Tabela 3 são mostradas as parcelas das resistências em função da velocidade do navio.

Tabela 3. Parcelas das resistências em função da velocidade do navio.

Tipo de Resistência	Parcela da Resistência Total ao Avanço [%]	
	Cascos de Planeio	Cascos de Deslocamento
Friccional	45	90
Residual	45	8
Ar	10	2

Fonte: MAN (2013)

3.5. Análise Dimensional e Semelhança

Em estudos que envolvem análise entre objetos distintos, é muito comum a prática de redução de variáveis que regem o fenômeno. Tal prática é usada devido ao dispendioso custo de tempo e recursos que seriam necessários para a realização de todos os ensaios necessários para correlacioná-las. Nessa análise são obtidos monômios adimensionais utilizados na construção de uma curva que expressa as grandezas que controlam o fenômeno. Daí origina-se a denominada Curva Universal do Fenômeno. Um método bastante utilizado para a obtenção dos adimensionais é o Teorema Pi de Buckingham (Bistafa, 2010).

3.5.1. Teorema Pi de Buckingham

Quando se realizam testes de um modelo em escala reduzida se torna necessária esta análise de forma a se obter os reais valores que o modelo real possuiria, através da seleção de parâmetros adimensionais representativos do problema em estudo. Para tanto, se utiliza o teorema Pi de Buckingham que é um enunciado de relação entre uma função expressa em termos de parâmetros dimensionais e uma função correlata expressa em termos de parâmetros adimensionais (Fox et al., 2010).

Seguindo a abordagem de Bistafa (2010), o teorema Pi será aplicado para a obtenção dos adimensionais que correlacionam as forças devido ao movimento uma embarcação.

1) Listar e contar as n grandezas que controlam o fenômeno. Descrita pela função na seguinte forma

$$f(R_T, L_{WL}, \rho, V, \mu) \quad (7)$$

2) Encontrar a base dimensional fundamental. As grandezas descritas acima podem ser escritas nas dimensões de tempo, massa e comprimento. Assim o número m de elementos da base é três. O número de adimensionais será o resultado da subtração entre o número de grandezas n e o número de elementos m , resultando portanto, 2 adimensionais desta análise.

3) Escolher os elementos da base. Nesta etapa serão escolhidas, dentre as 5 grandezas, uma para representar a unidade de tempo, outra para unidade de comprimento e, por fim, uma terceira para a unidade de massa. Uma alternativa é adotar a massa específica ρ , com unidade $[\rho] = ML^{-3}$, M como base dimensional de massa; L como base dimensional de comprimento, sendo $L = L_{WL}$; e a velocidade V , com unidade $[V] = LT^{-1}$, como base dimensional de tempo.

4) Construir os adimensionais. Como determinado na segunda etapa, devem ser encontrados dois adimensionais, $\Pi 1$ e $\Pi 2$. Para tal, serão usados os elementos da base elevados a expoentes arbitrários assim como os elementos que não foram escolhidos para representar as unidades, porém sem expoentes, conforme

$$\Pi 1 = (\rho^a V^b L_{WL}^c) R_T \quad (8)$$

$$\Pi 2 = (\rho^d V^e L_{WL}^f) \mu \quad (9)$$

Substituindo as grandezas por sua representação em unidades, temos

$$\Pi 1 = (M L_{WL}^{-3})^a (L_{WL} T^{-1})^b (L_{WL})^c M L_{WL} T^{-2} \quad (10)$$

$$\Pi 2 = (M L_{WL}^{-3})^d (L_{WL} T^{-1})^e (L_{WL})^f M L_{WL}^{-1} T^{-1} \quad (11)$$

e observando que $\Pi 1$ e $\Pi 2$ tem dimensão zero,

$$M^0 L^0 T^0 = (M L_{WL}^{-3})^a (L_{WL} T^{-1})^b (L_{WL})^c M L_{WL} T^{-2} \quad (12)$$

$$M^0 L^0 T^0 = (M L_{WL}^{-3})^d (L_{WL} T^{-1})^e (L_{WL})^f M L_{WL}^{-1} T^{-1} \quad (13)$$

é possível montar um sistema para cada grupo adimensional para a determinação dos expoentes.

Assim,

$$\Pi 1 \begin{cases} M: a+1=0 \\ L: -3a+b+c+1=0 \rightarrow a=-1; b=-2; c=-2 \\ T: -b-2=0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\Pi 1 \begin{cases} M: d+1=0 \\ L: -3d+e+f-1=0 \rightarrow d=-1; e=-1; f=-1 \\ T: -e-1=0 \end{cases} \quad (15)$$

5) Escrever os adimensionais. Conhecidos os coeficientes, os adimensionais $\Pi 1$ e $\Pi 2$ podem ser escritos na forma

$$\Pi 1 = \rho^{-1} V^{-2} L_{WL}^{-2} R_T = \frac{R_T}{\rho V^2 L_{WL}^2} \quad (16)$$

$$\Pi 2 = \rho^{-1} V^{-1} L_{WL}^{-1} \mu = \frac{\mu}{\rho V L_{WL}} \quad (17)$$

Quando considera-se a influência da gravidade, tem-se o acréscimo de mais um termo na função que expressa as variáveis do problema, por consequência, mais um sistema de equações deverá ser resolvido. Desse sistema origina-se um terceiro adimensional

$$\Pi 3 = \frac{V}{\sqrt{g L_{WL}}} \quad (18)$$

onde g é a aceleração da gravidade [m/s²].

Tem-se então: $\Pi 1$ como Número de Euler, $\Pi 2$ o Número de Reynolds na sua forma inversa e $\Pi 3$ o Número de Froude. Esses três adimensionais descrevem as forças envolvidas no estudo.

3.6.Adimensional de Euler

De acordo com Fox et al. (2010), o adimensional que relaciona forças de pressão com forças inerciais é denominado de coeficiente de pressão. O número de Euler é igual a diferença de pressão local e a pressão da corrente livre, sobre metade do produto entre a massa específica do fluido e o quadrado de sua velocidade, fica

$$Eu = \frac{R_T}{\rho V^2 L_{WL}^2} \quad (19)$$

onde Eu é o adimensional de Euler. Sua principal aplicação é em estudos de modelos aerodinâmicos e fenômenos de cavitação.

3.7.Adimensional de Reynolds

Conforme Fox et al. (2010) um importante adimensional para escoamentos no estudo de mecânica dos fluidos é o número de Reynolds, ele correlaciona as forças viscosas com as forças inerciais. Sendo diretamente proporcional ao produto da velocidade do fluido e o comprimento no qual ocorre o escoamento, e inversamente proporcional a viscosidade cinemática do fluido

$$Re = \frac{V L_{WL}}{\nu} \quad (20)$$

onde Re é o adimensional de Reynolds, responsável por expressar a razão entre forças inerciais e forças gravitacionais.

O número de Reynolds pode ser utilizado para determinar o grau de importância, das forças viscosas, em um estudo. Em suma, números baixos de Reynolds indicam alta influência da viscosidade no estudo. Outra análise oferecida pelo número de Reynolds é quanto a natureza do escoamento, podendo ser laminar ou turbulenta. Comumente, para escoamentos externos, é utilizado o limiar de 5×10^5 , ou seja, abaixo desse valor o escoamento é laminar e acima apresenta caráter turbulento (Fox et al., 2010).

3.8. Adimensional de Froude

O número de Froude é proporcional à velocidade do escoamento, e inversamente proporcional ao produto do comprimento característico descrito no campo de escoamento com a aceleração da gravidade (Fox et al., 2010).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_{WL}}} \quad (21)$$

O número de Froude é usualmente utilizado para classificar o tipo de casco de uma embarcação. Cascos mais velozes apresentam números elevados de Froude, são classificados como cascos de planeio; de outra forma, números baixos de Froude classificam o casco como de deslocamento (MAN, 2013).

3.9. Semelhança

Esta relação, entre os parâmetros adimensionais Π , deve ser obtida através de uma transposição por escala. Para que os dados sejam condizentes, entre o modelo e o protótipo, é necessário respeitar os seguintes requisitos: semelhança geométrica, semelhança cinemática e semelhança dinâmica (Bistafa, 2010).

Segundo Fox et al. (2010) a semelhança geométrica é obtida através de um modelo com dimensões relacionadas ao protótipo por um fator de escala constante. A semelhança cinemática ocorre quando as velocidades em pontos correspondentes dos escoamentos possuem a mesma direção e sentido. A semelhança dinâmica acontece quando os números adimensionais que regem o problema são reproduzidos entre o modelo e o protótipo.

Ainda de acordo com Fox et al. (2010) a semelhança pode ser aplicada ao estudo de arrasto em navios. A resistência sobre um navio surge do atrito de contato da água com o casco (forças viscosas – adimensional de Reynolds) e da resistência das ondas (forças gravitacionais – adimensional de Froude).

Para Fox et al. (2010) não é possível prever a resistência de ondas analiticamente, ela deve ser modelada. Isto exige que, a geração de onda seja semelhante entre modelo e protótipo para qualquer escala do modelo, com isso, a velocidade será definida igualando o número de Froude do modelo com o do protótipo. Quando não é possível reproduzir um dos adimensionais entre o modelo e o protótipo, dá-se o nome de semelhança incompleta. Desta forma, evita-se o uso de valores anormais de massa específica no fluido, necessária na igualdade entre os números de Reynolds, já que, o comprimento do modelo e a velocidade de simulação geralmente não podem ser modificados nos estudos.

Em análises numéricas, é possível determinar a resistência de onda subtraindo a resistência viscosa encontrada da resistência total, ponto a ponto. Em estudos experimentais a parcela da resistência viscosa é determinada pelo teorema da camada-limite (Fox et al., 2010).

4. METODOLOGIA

No presente trabalho, o estudo da eficiência do método de injeção de ar na redução do arrasto viscoso em cascos de deslocamento possui natureza computacional, utilizando técnicas de CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*). Isso implica, na necessidade da solução das equações de conservação que regem o problema físico. Para tanto, foi utilizado o software OpenFOAM (Weller et al., 2021), mais especificamente, o *solver* InterFoam, o qual utiliza uma formulação de Volumes Finitos para a discretização das equações diferenciais que regem o problema. O uso do *solver* InterFoam é uma ferramenta capaz de lidar com escoamentos incompressíveis, viscosos e multifásicos em regime laminar ou turbulento.

O domínio computacional, conforme mostrado na Fig. 4, 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 prescrita uma condição de contorno do tipo saída, injetando ar. A unidade de distância, indicado por “L”, é a medida do comprimento total em escala do DTC, aproximadamente 6,28 m.

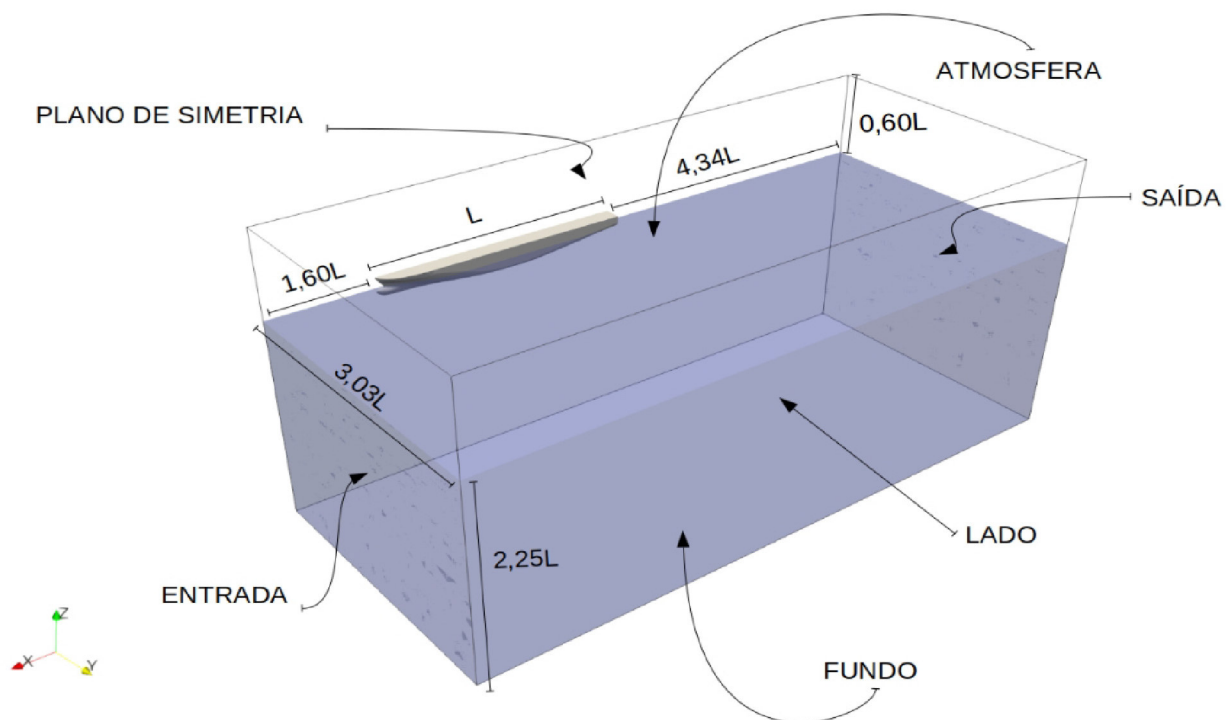


Figura 4. Domínio Computacional

No domínio computacional apenas metade do casco foi simulado, limitado pelo plano de simetria. O plano de simetria é paralelo ao plano XZ e está situado no eixo longitudinal (eixo X) do casco DTC. Na Tabela 4 são mostradas as dimensões da embarcação real e a embarcação em escala.

Tabela 4. 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
Coeficiente 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 foi encontrada pela semelhança incompleta, igualando os números de Froude entre o casco em escala e o casco real.

4.1. 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 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). Esta 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

$$\rho = \rho_{\text{água}} \alpha + (1 - \alpha) \rho_{\text{ar}} \quad (22)$$

$$\mu = \mu_{\text{água}} \alpha + (1 - \alpha) \mu_{\text{ar}} \quad (23)$$

O escoamento é dito incompressível e a formulação *Reynolds Average Navier-Stokes* (RANS) é utilizada na modelagem turbulenta do problema (Versteeg e Malalasekera, 2007). Desta forma, uma média temporal é feita para as equações de conservação da massa e quantidade de movimento. Estas assumem, respectivamente, a forma

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial (\rho \bar{u}_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) + F_i \quad (25)$$

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/m³].

O modelo de turbulência utilizado foi o $\kappa - \omega$ - SST, proposto por Menter (1994) é um modelo 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 $\kappa - \omega$ e $\kappa - \epsilon$. O modelo $\kappa - \omega$ - 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

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = P_\kappa - \beta \kappa \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\kappa \mu_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{u}_j \omega)}{\partial x_j} = & - \frac{\alpha \omega}{k} p - \beta \rho \omega^2 + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_t \frac{k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ & + 2(1 - F_1) 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (27)$$

onde ω é a taxa de dissipação específica [1/s], κ é a energia cinética turbulenta [m²/s²], F_1 é a constante responsável por chavear o modelo nas representações $\kappa-\omega$ e $\kappa-\epsilon$, por fim, σ_ω , σ_d e β são constantes empíricas tabeladas. Ainda de acordo com Menter (1994) μ_t origina-se da análise dimensional a partir das grandezas usadas para caracterizar a turbulência, e é chamado de viscosidade turbulenta limite [m²/s] dada por

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (28)$$

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

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (29)$$

em que 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 (Hirt e Nichols, 1981).

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (30)$$

4.2. Condições de Contorno

Para a solução dirigida do problema, são apresentadas algumas condições físicas para cada face do domínio computacional. Os volumes internos contendo o escoamento recebem velocidade constante de acordo com o requerido pelo ensaio, desta forma o casco DTC fica estático no domínio computacional. Na Tabela 5 são apresentadas as condições de contorno, para o escoamento, fração volumétrica e para o modelo de turbulência em cada face do volume de controle.

Tabela 5. Condições de Contorno.

Face	Condição de Contorno		
	Escoamento	Fração volumétrica	Turbulência ($\kappa - \omega$)
Atmosfera	Pressão prescrita ($p_{total} = 0$)	Derivada nula*	Prescrita ($\kappa = 0,00015 \ \omega = 2$)
Bicos Injetores	Prescrita (Q uniformemente variada)	Prescrita ($\alpha = 0$)	Derivada nula*
Casco	Não deslizamento	Derivada nula*	Derivada nula*
Entrada	Velocidade prescrita	Prescrita ($\alpha = 1$)	Prescrita ($\kappa = 0,00015 \ \omega = 2$)
Fundo	Simetria	Simetria	Simetria
Lado	Simetria	Simetria	Simetria
Plano de Simetria	Simetria	Simetria	Simetria
Saída	Derivada nula*	Derivada nula*	Prescrita ($\kappa = 0,00015 \ \omega = 2$)

* em relação à direção normal a superfície

Os bicos injetores são regiões discretizadas no fundo do casco, estes não existem fisicamente. Com o objetivo de visualizar a redução do arrasto, a vazão injetada de ar segue uma função linear crescente, uniformemente variado, iniciando e estabilizando as vazões em tempos predefinidos, discutido posteriormente na seção 4.8.

4.3. Discretização Espacial

Garantindo as proporções geométricas do casco no modelo reduzido, a discretização espacial do DTC foi realizada com o uso das ferramentas BlockMesh e SnappyHexMesh pertencentes ao OpenFOAM (Weller et al., 2021). Objetivando descrever melhor os efeitos turbulentos nas regiões próximas ao casco, já que o modelo turbulento $\kappa - \omega$ - 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 5 é representado o modelo CAD (*computer aided design*) em escala do casco DTC.



Figura 5. Modelo CAD. a) vista lateral, b) vista inferior

A malha é responsável por formar os volumes finitos, nos quais as equações diferenciais que regem o problema são discretizadas em sistemas de equações algébricas. Ela deve conter o casco DTC e todos os elementos necessários ao objetivo do estudo.

Após a criação de malha, é necessário realizar uma análise de influência dos resultados em função da quantidade de volumes. Esta análise é importante pois evita trabalhar com malhas excessivamente refinadas, que exigem altos recursos de processamento e poucos ganhos nos resultados. Essa análise é denominada Independência de Malha, e é abordada na seção 4.5.

4.3.1. Integração do modelo CAD na Malha (SnappyHexMesh)

O SnappyHexMesh é uma ferramenta pertencente ao OpenFoam. Ela é capaz de integrar um arquivo CAD a uma malha. Seu uso consiste em configurar, além de outros parâmetros, em qual a região da malha o CAD será integralizado. O SnappyHexMesh permite criar novas faces no domínio, resguardando as que foram configuradas anteriormente no BlockMesh (gerenciador de malhas do OpenFOAM). Importante passo para o estudo do método de injeção de ar, pois, permite a criação da face com os contornos do casco DTC no domínio. Na Figura 6 é demonstrada a malha integrada ao casco DTC.

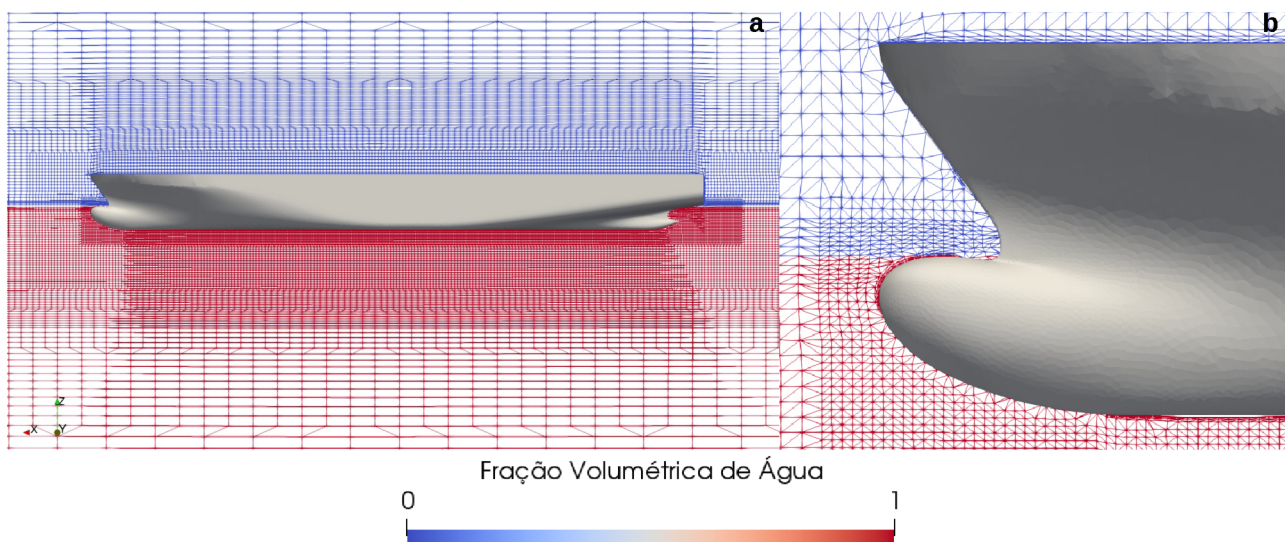


Figura 6. Malha contendo o casco DTC. a) Vista lateral geral, b) Ampliação na região da proa

4.4. Solução Numérica

Foi utilizado o *solver* InterFoam, ferramenta pertencente ao software OpenFOAM, na solução numérica do estudo. É indicado para resolver problemas que envolvem escoamentos multifásicos. No acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo PIMPLE, uma mescla entre os algoritmos PISO (*pressure-implicit split-operator*) e SIMPLE (*semi-implicit method for pressure-linked equations*). O PIMPLE é capaz de corrigir a velocidade explicitamente para satisfazer a equação da conservação da quantidade de movimento, além de, resolver a equação para a pressão, que surge a partir da equação da conservação da massa (Versteeg e Malalasekera, 2007).

Na Tabela 6 são mostrados os principais parâmetros utilizados na solução numérica do presente estudo.

Tabela 6. Configurações da solução numérica.

Parâmetro	Valor/Referência
Software	OpenFoam / InterFoam
Versão do Software	8
Algoritmo	PIMPLE
Solvers para solução do sistema linear	
Velocidade	Smooth Solver
Pressão	PCG (Preconditioned conjugate gradient)
Pressão Dinâmica (p_rgh)	GAMG
Fração Volumétrica	Smooth Solver
$\kappa - \omega$	Smooth Solver
Esquemas de Interpolação	
Transiente	Euler
Gradiente	Gauss linear
Divergente	
Div(rhoPhi,U)	Gauss linearUpwind grad(U)
Div(phi,alpha)	Gauss interfaceCompression vanLeer 1
Div(phi,k)	Gauss linearUpwind limitedGrad
Div(phi,omega)	Gauss linearUpwind limitedGrad
Div(rho*nuEff*dev2Tgrad(U))	Gauss linear
Controle	
Passo de Tempo Δt [s]	1
Tempo Final [s]	10000
Velocidades do Fluido Livre [m/s]	1,335 e 1,668
Injeção de ar	Função Linear (vide apêndice 8.1)

As propriedades físicas do problema, na temperatura de 20°C e pressão atmosférica, são listadas na Tab. 7.

Tabela 7. Propriedades físicas do problema (Fox et al., 2010).

Propriedade	Valor
Massa Específica da água ($\rho_{\text{água}}$)	1025 [kg/m³]
Massa Específica do ar (ρ_{ar})	1,21 [kg/m³]
Viscosidade cinemática da água ($\nu_{\text{água}}$)	1×10^{-6} [m²/s]
Viscosidade cinemática do ar ($\nu_{\text{água}}$)	$1,5 \times 10^{-5}$ [m²/s]

4.5. Independência da solução com a malha

O teste de independência de malha foi realizado para o caso mais crítico: velocidade de 1,668 m/s, 8 bicos injetores, 5° de ângulo de injeção e com a injeção de ar ativa (vazão de $9,63 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$). Na seção 4.9. são mostrados todos os casos ensaiados. Partindo de uma malha contendo 744.546 volumes, quatro outras malhas mais refinadas foram testadas. Na Tabela 8 são apresentados os resultados das resistências, Y+ médio e o tempo de simulação para as quatro malhas simuladas. O Y+ é um adimensional referente à distância até a parede, que indica o quão grosseira está a malha próxima a esta região. Sendo o Y+ diretamente proporcional à velocidade do fluido e inversamente proporcional à viscosidade cinemática, seu valor determina a importância da viscosidade e da turbulência no estudo (Jouse, 2020).

Tabela 8. Teste de independência da solução com a malha.

Malha	Nº Volumes	Resistência Viscosa [N]	Resistência Pressão [N]	Resistência Total [N]	Y+	Diferença Relativa [%]	Tempo [h]
c1	744.546	18,02	6,68	24,70	124,79	-	4,6
c2	1.136.993	21,78	6,34	28,12	72,83	13,85	7,5
c3	1.822.576	21,46	4,72	26,18	51,78	6,90	11,1
c4	2.428.558	21,27	5,53	26,80	29,33	2,37	14,7

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

$$E = \left| \frac{R_T^i - R_T^{i+1}}{R_T^i} \right| \times 100 \quad (31)$$

onde E é o erro relativo, e o índice i indica a malha.

Observa-se, da Tabela 8, 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 em análise. Em

simulações que avaliam coeficientes de resistências viscosas e coeficientes de resistência por pressão, e usam funções de parede para descrever o escoamento turbulento, valores entre 50 e 100 de Y^+ mostram-se ideais (MARIN, 2016).

4.6. 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 4.5 se aplicam para esta análise de independência do passo de tempo. Na Tabela 9 são apresentados os resultados do teste.

Tabela 9. Independência da solução com o passo de tempo.

Nome	Δt [s]	Resistência Viscosa [N]	Resistência Pressão [N]	Resistência Total [N]	Diferença Relativa [%]	Tempo [h]
p1	10	26,54	8,78	35,32	-	1,84
p2	1	21,46	4,72	26,18	25,88	11,1
p3	0,1	19,86	4,42	24,28	7,26	118,92

A análise da Tabela 9 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 diminui 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.

4.7. 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 às 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 operacional, sem injeção de ar. Conforme exposto na Tab. 10.

Tabela 10. Validação da solução numérica.

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]	Viscoso	Pres- são	Total
1,335	17,60	2,72	20,32	16,54	2,52	19,06	6,02	7,35	6,20
1,668	26,42	5,40	31,82	24,90	5,10	30,00	5,75	5,56	5,72

Como pode ser observado na Tab. 10, 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 o modelo computacional proposto está validado.

4.8. 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 da camada de ar desenvolvida no fundo do casco. O valor ideal, segundo as patentes Hideki et al. (2008) e Phan et al. (2012), pertence ao intervalo de 4 a 8 mm. Ainda de acordo com as patentes a relação entre a espessura da camada de ar e a vazão é calculada por

$$t_{ar} = \frac{Q_{ar}}{B_{ar} V} \quad (32)$$

onde Q_{ar} é a vazão volumétrica de ar [m^3/s], t_{ar} é a espessura da camada de ar no fundo do casco [m], e B_{ar} é a largura da camada de ar [m]. No estudo foram utilizados os valores de 4, 6 e 8 mm de vazão de ar equivalente com a largura da camada de ar de 0,722 m.

O ângulo de injeção fica definido pela decomposição vetorial da velocidade de injeção de ar nos eixos X e Z . Com o eixo Z normal ao plano ‘fundo do casco’, a velocidade de saída do ar em Z implica diretamente na vazão volumétrica de ar injetada pelo bico. Desta forma, controlando a velocidade de saída do ar em X e Z , é possível formar um vetor resultante com os ângulos de injeção desejados (5° , 15° e 25°). Assim, as velocidades do ar em X e Z são dadas, respectivamente, como

$$V_{arX} = \left(\frac{Q_{ar}}{A_{bico} \sin(\hat{A}_{injeção})} \right) \cos(\hat{A}_{injeção}) \quad (33)$$

$$V_{arZ} = \left(\frac{Q_{ar}}{A_{bico} \sin(\hat{A}_{injeção})} \right) \sin(\hat{A}_{injeção}) \quad (34)$$

em que A_{bico} é a área de injeção do bico [m^2] e $\hat{A}_{injeção}$ é o ângulo de injeção do ar [$^\circ$]. Na Figura 7 é mostrado o ângulo de injeção para o vetor resultante formado pelas componentes vetoriais nos eixos cartesianos X e Z . No apêndice 8.1 as Eqs. (33) e (34) são escritas no algoritmo responsável por prescrever as velocidades de saída do ar em cada bico injetor.

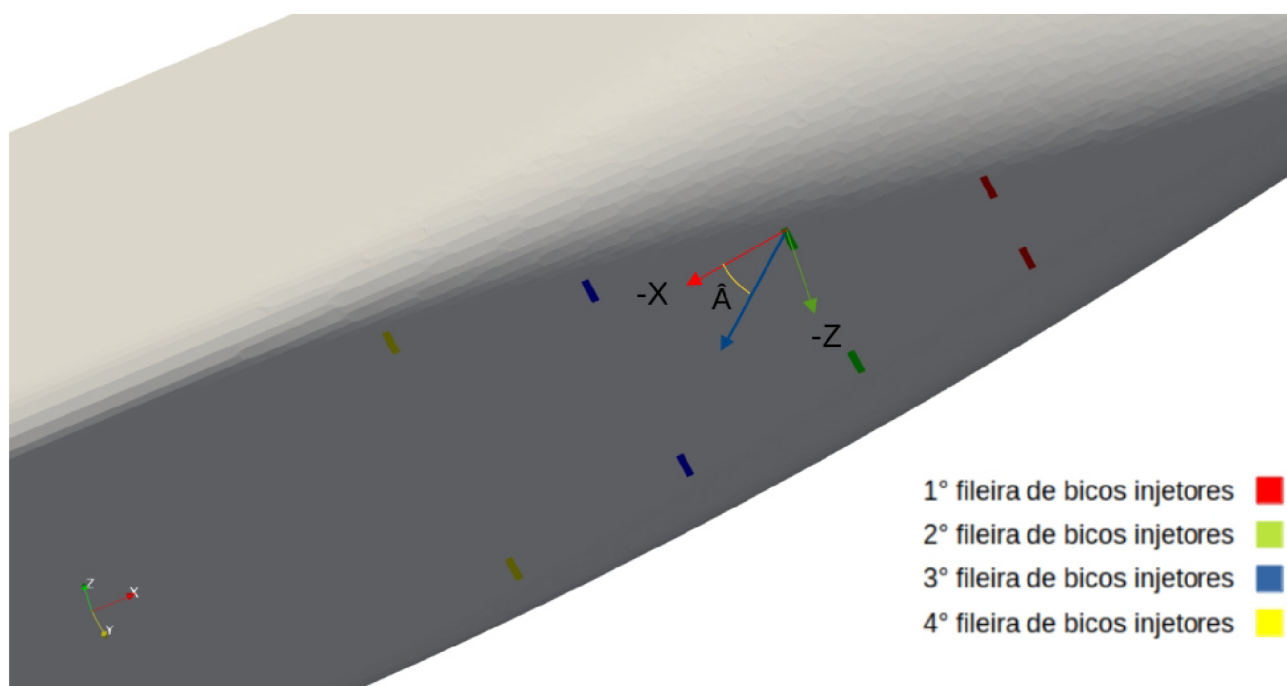


Figura 7. Ângulo de injeção no fundo do casco

Com o objetivo de injetar o ar na área plana do fundo do casco, foi realizada uma análise topográfica, que, através das curvas de níveis identificou-se a região plana no fundo do casco ideal para a injeção. Dividindo a carena³ do casco em três regiões: região **I**, área plana de fundo situada na ante-a-vante⁴ meia-nau⁵ onde estão dispostos os bicos injetores; região **II**, área plana de fundo sem bicos injetores; região **III**, corresponde a toda carena com algum nível topográfico, como mostra a Fig. 8a. Considerando o plano de simetria, a vazão de ar fica igualmente distribuída entre os bicos injetores (faces retangulares prescritas na malha do casco). A discretização espacial dos bicos injetores estão representados na Fig. 8b.

³Superfície do casco que está em contato com a água

⁴Quando um objeto está mais próximo da proa que outro

⁵Meio da embarcação

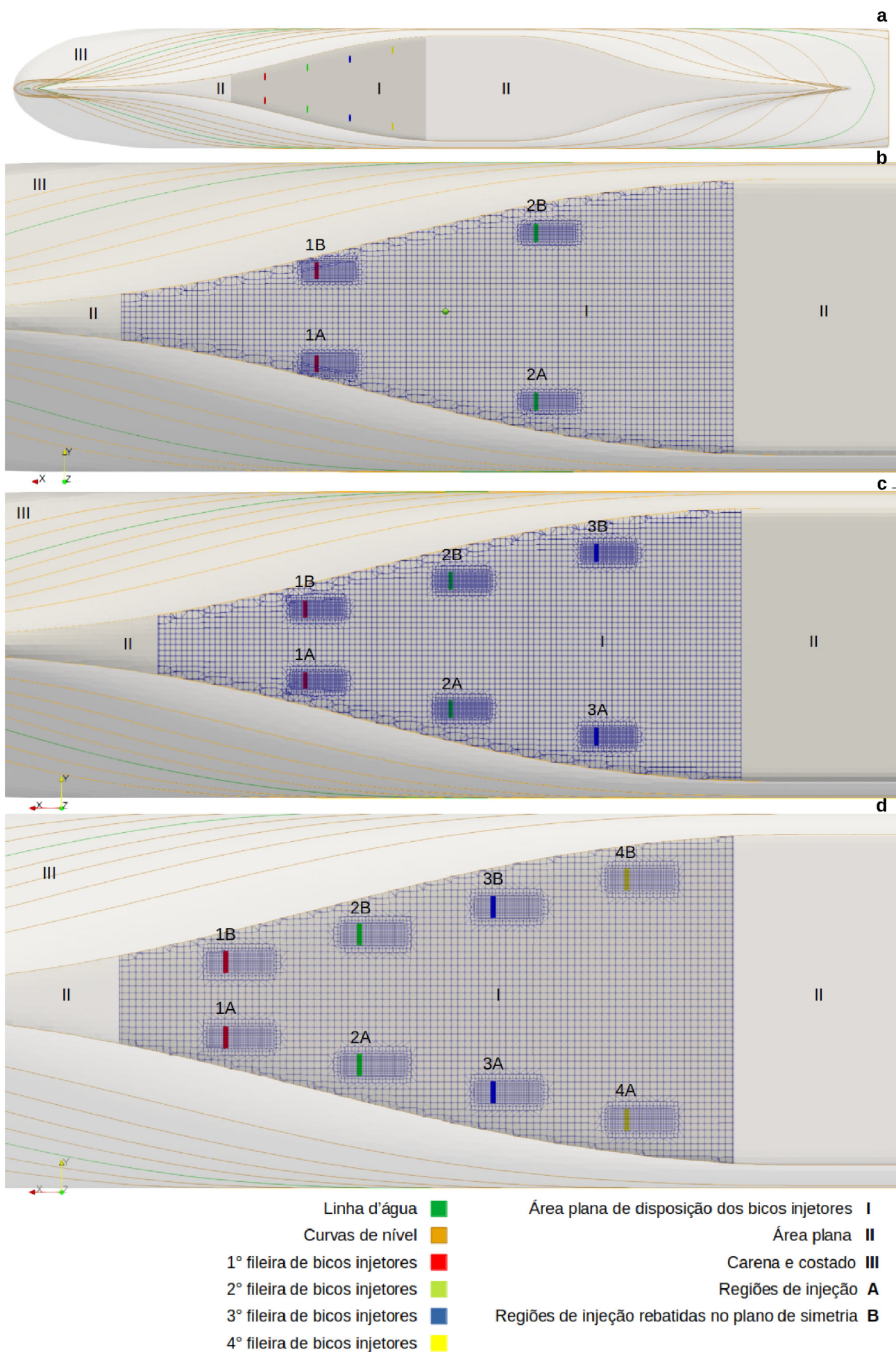


Figura 8. Fundo do casco. a) divisão das regiões no fundo, b) 4 bicos injetores, c) 6 bicos injetores, d) 8 bicos injetores

A distribuição dos bicos injetores, na região **I**, ficam dispostos igualmente distanciados conforme o número de bicos empregados. As distâncias horizontais (eixo X) e verticais (eixo Y) entre cada bico injetor são, respectivamente, dadas por

$$distX = \frac{(1,23 - L_{bicosX})}{\left(\frac{Q_{bicos}}{2}\right)} \quad (35)$$

$$distY = \frac{(0,361 - L_{bicosY})}{\left(\frac{Q_{bicos}}{2} + 1\right)} \quad (36)$$

onde L_{bicosX} é o comprimento do bico injetor no eixo X [m], L_{bicosY} é o comprimento do bico injetor no eixo Y [m], Q_{bicos} é a quantidade de bicos injetando ar. No estudo foram utilizados os valores fixos de 0,01172 m para o L_{bicosX} e 0,05 m para L_{bicosY} . Os valores fixos 1,23 e 0,361 são os comprimentos, em X e Y respectivamente, que delimitam a região **I**.

No apêndice 8.2 são mostradas as Eqs. (35) e (36) no algoritmo responsável pela discretização espacial dos bicos na malha.

A vazão de ar é calculada pelo produto entre a velocidade de saída do ar e a área do bico injetor. A velocidade do ar injetado segue uma função linear com coeficiente angular (a) positivo, sendo $a = 0,001$. Isso implica que a completa vazão de ar requerida (Q_{ar}), para alcançar o regime ALDR, seja alcançada após 1000 s de simulação injetando ar. Desta forma, a vazão de ar (Q'_{ar}) injetada em função do tempo simulado é dada por

$$Q'_{ar} = Q_{ar} 0,001 t \quad (37)$$

onde t é o tempo corrente na simulação [s]. A injeção gradual de ar tem como objetivo avaliar as reduções das resistências viscosas e de pressão, além de servir de estabilização no novo regime transicional.

4.9.Árvore de Ensaios

O estudo avalia a eficácia do método de injeção de ar para duas velocidades operacionais do casco DTC. Para cada velocidade serão variados os parâmetros referentes à injeção de ar pelos bicos injetores. Cada parâmetro possui 3 variações de valores.

Os valores dos parâmetros são cruzados entre si, formando cada caso. Desta forma, obedecendo a relação do produto 'velocidade do casco' x 'quantidade de bicos' x 'espessura da camada de ar' x 'ângulo de injeção' é formada uma árvore de ensaios com 54 simulações. Na Figura 9 é mostrada a árvore de ensaios.

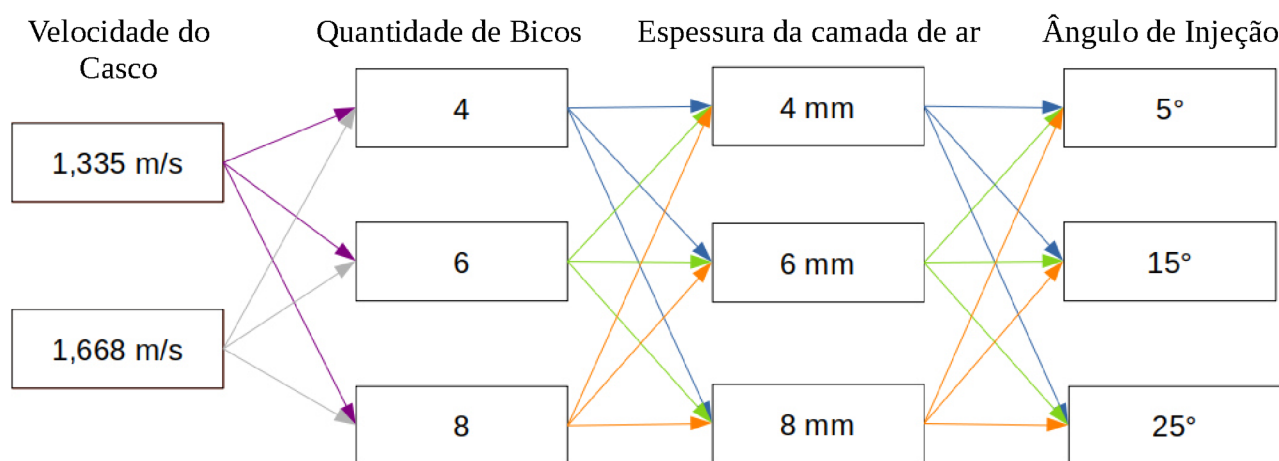


Figura 9. Árvore de Ensaios.

Ângulos estreitos (5°, 15° e 25°) foram escolhidos para avaliar o efeito do ângulo de injeção, junto ao casco, no método de injeção de ar.

Com o objetivo de facilitar a identificação dos casos simulados na análise dos resultados, é montado um quadro relacionando as abreviaturas dos parâmetros e os valores. Resultando em um código serial de identificação para cada caso simulado, como mostra a Tab. 11.

Na Tabela 11 os parâmetros 'velocidade do casco' e 'ângulo de injeção' estão dispostos nas linhas, identificados pelas siglas VC e AI, respectivamente. Já na coluna, os parâmetros 'quantidade de bicos' e 'espessura da camada de ar', correspondendo as siglas QB e EC, respectivamente.

Tabela 11. Quadro de identificação.

Velo- cidade do Casco DTC [m/s]	Ân- gulo de Inje- ção [°] Sigla: AI	Quantidade de Bicos Injetores Sigla: QB								
		4			6			8		
		Espessura da Camada de Ar [mm] Sigla: EC								
		4	6	8	4	6	8	4	6	8
1,335 Sigla: VC1	5	VC1-QB4- EC4-AI5	VC1-QB4- EC6-AI5	VC1-QB4- EC8-AI5	VC1-QB6- EC4-AI5	VC1-QB6- EC6-AI5	VC1-QB6- EC8-AI5	VC1-QB8- EC4-AI5	VC1-QB8- EC6-AI5	VC1-QB8- EC8-AI5
	15	VC1-QB4- EC4-AI15	VC1-QB4- EC6-AI15	VC1-QB4- EC8-AI15	VC1-QB6- EC4-AI15	VC1-QB6- EC6-AI15	VC1-QB6- EC8-AI15	VC1-QB8- EC4-AI15	VC1-QB8- EC6-AI15	VC1-QB8- EC8-AI15
	25	VC1-QB4- EC4-AI25	VC1-QB4- EC6-AI25	VC1-QB4- EC8-AI25	VC1-QB6- EC4-AI25	VC1-QB6- EC6-AI25	VC1-QB6- EC8-AI25	VC1-QB8- EC4-AI25	VC1-QB8- EC6-AI25	VC1-QB8- EC8-AI25
1,668 Sigla: VC2	5	VC2-QB4- EC4-AI5	VC2-QB4- EC6-AI5	VC2-QB4- EC8-AI5	VC2-QB6- EC4-AI5	VC2-QB6- EC6-AI5	VC2-QB6- EC8-AI5	VC2-QB8- EC4-AI5	VC2-QB8- EC6-AI5	VC2-QB8- EC8-AI5
	15	VC2-QB4- EC4-AI15	VC2-QB4- EC6-AI15	VC2-QB4- EC8-AI15	VC2-QB6- EC4-AI15	VC2-QB6- EC6-AI15	VC2-QB6- EC8-AI15	VC2-QB8- EC4-AI15	VC2-QB8- EC6-AI15	VC2-QB8- EC8-AI15
	25	VC2-QB4- EC4-AI25	VC2-QB4- EC6-AI25	VC2-QB4- EC8-AI25	VC2-QB6- EC4-AI25	VC2-QB6- EC6-AI25	VC2-QB6- EC8-AI25	VC2-QB8- EC4-AI25	VC2-QB8- EC6-AI25	VC2-QB8- EC8-AI25

4.10. Redução da Resistência ao Avanço

É a redução da resistência total ao avanço, com o método de injeção de ar, em relação à resistência total ao avanço para o casco padrão, em cada velocidade simulada. Indica a redução da resistência total ao avanço alcançada com o método de injeção de ar.

Para encontrar essa redução é necessário achar a parcela da resistência total ao avanço reduzida (R_{red}). Essa parcela fica compreendida pela diferença entre a resistência total ao avanço para o casco padrão e a resistência total ao avanço com o método de injeção de ar. Sendo assim, a parcela da resistência total ao avanço reduzida é dada por

$$R_{red} = R_T - R_{Tar} \quad (38)$$

onde R_{Tar} é a resistência total ao avanço com o método de injeção de ar [N].

Logo, a redução da resistência total ao avanço com o método de injeção de ar pode ser calculada da seguinte forma

$$RA = \left(\frac{R_{red}}{R_T} \right) \times 100 \quad (39)$$

4.11. Redução da Potência

A redução líquida tem a finalidade de encontrar o real ganho energético com o método de injeção de ar, visto que, energia é consumida pelo sistema pneumático responsável por suprir as vazões de ar necessárias ao método. Consiste em encontrar a parcela de potência reduzida e subtrair desta a parcela de energia requerida pelo compressor. São consideradas na análise, a eficiência do compressor e a pressão total nos bicos injetores. As perdas de pressão na distribuição do ar não são consideradas. Considerando um processo politrópico, John Campbell (2014) estima a potência requerida pelo compressor, dada por

$$P_c = \frac{Q_{ar} p_1}{\eta_c} \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \quad (40)$$

onde η_c é a eficiência do compressor, n é o coeficiente politrópico, p_1 é a pressão na entrada do compressor (pressão atmosférica) [Pa] e p_2 é a pressão total na saída nos bicos injetores [Pa].

Segundo John Campbell (2014) compressores centrífugos possuem eficiências entre 0,70 e 0,85. Considerando a vazão requerida e o baixo gradiente de pressão entre a entrada e a saída (bicos) no compressor, a análise da potência requerida no processo de injeção de ar adota a eficiência de um compressor do tipo centrífugo, genérico. Jang et al. (2014) propõe, para essa eficiência genérica, um valor igual a 0,75 e coeficiente politrópico de 1,4.

A vazão volumétrica de ar varia em função da espessura da camada de ar requerida e da velocidade do casco. Assim, os valores da vazão volumétrica diferem em cada caso que a

velocidade do casco for diferente. Desta forma, a Tabela 12 mostra as vazões volumétricas requeridas. Representando a espessura da camada de ar, em m, devido à compatibilidade de unidades.

Tabela 12. Vazões volumétricas requeridas no casco em escala.

Velocidade do Casco [m/s]	Espessura da Camada de Ar [m] (Eq. (32))	Vazão Volumétrica [m ³ /s]
1,335	0,004	$3,86 \times 10^{-3}$
	0,006	$5,78 \times 10^{-3}$
	0,008	$7,71 \times 10^{-3}$
1,668	0,004	$4,82 \times 10^{-3}$
	0,006	$7,22 \times 10^{-3}$
	0,008	$9,63 \times 10^{-3}$

A potência efetiva reduzida pelo método de injeção de ar é a diferença entre a potência efetiva para o casco padrão e a potência efetiva com o método de injeção de ar. A potência efetiva de um casco é determinada pelo produto da velocidade do casco com a resistência total ao avanço MAN (2013). Sendo assim, a potência efetiva reduzida com o método de injeção de ar, a potência efetiva para o casco padrão e a potência efetiva com o método de injeção de ar, ficam escritas, respectivamente

$$P_{Ered} = P_E - P_{Ear} \quad (41)$$

$$P_E = R_T V \quad (42)$$

$$P_{Ear} = R_{Tar} V \quad (43)$$

em que P_{Ered} é a potência efetiva reduzida pelo método de injeção de ar no casco [W], P_E é a potência efetiva para o casco padrão [W] e P_{Ear} é a potência efetiva com o método de injeção de ar no casco [W].

A potência do compressor é uma potência mecânica, ou seja, para encontrar a potência salva pelo método de injeção de ar é necessário, primeiramente, encontrar a potência mecânica entregue

pelo motor principal do DTC. Esta potência é denominada potência no freio e é escrita em função da eficiência total propulsiva (η_T), que leva em consideração as seguintes eficiências: eficiência do casco (η_H), a eficiência do hélice (η_B) e a eficiência no eixo (η_S) (MAN, 2013). Segundo MAN (2013) para cascos com alto coeficiente de bloco e um hélice, as eficiências recebem os valores: entre 1,1 a 1,4 para eficiência do casco, 0,35 a 0,8 para eficiência do hélice e 0,96 a 0,99 para eficiência do eixo. Assim, os valores assumidos no estudo foram: 1,2 para eficiência do casco, 0,55 para a eficiência do hélice e 0,98 para a eficiência do eixo; resultando no valor aproximado de 0,65 para a eficiência total. Logo, a redução líquida de potência mecânica, com a injeção de ar, pode ser calculada da seguinte forma

$$RL = \left(\frac{\left(\frac{P_{Ered}}{\eta_T} \right) - P_{comp}}{\frac{P_E}{\eta_T}} \right) \times 100 \quad (44)$$

As pressões nos bicos injetores variam de acordo com as compensações energéticas envolvidas no escoamento do fluido. O valor da pressão foi obtido diretamente na simulação, na região dos bicos injetores. A pressão lida é atribuída a pressão de saída, p_2 , no compressor. Devido os bicos injetores serem formados por diversas faces discretizadas injetando ar, e cada face possuindo um valor distinto de pressão, foi levantado, com a ferramenta de estatísticas pertencente ao ParaView (Kitware, 2021), o valor médio da pressão para cada caso simulado.

Os valores médios da pressão total - para os parâmetros ‘velocidade do casco’, ‘vazão’, ‘ângulo de injeção’ e ‘quantidade de bicos’ - não oscilaram significativamente, em toda a árvore de ensaios os valores ficaram entre 293 e 312 Pa. Esta diferença significa uma diferença menor que 3% nos valores de potência do compressor. Assim, foi atribuído o valor constante de 300 Pa, para a pressão de saída no compressor, em todos os casos simulados.

5. RESULTADOS

Inicialmente a simulação ocorre sem a injeção de ar. Esta condição é mantida até que a solução estabilize, o que ocorre a partir de aproximadamente 2.000 s. Após 4.000 s inicia-se a injeção de ar pelos bicos injetores, gradualmente, a vazão de ar aumenta com o tempo de injeção (1.000 s) com o objetivo de avaliar o efeito da injeção de ar nas resistências: viscosa, de pressão e total. A injeção gradual ajuda, também, na estabilização da simulação, durante e após a injeção de ar. Com a completa vazão de ar ocorrendo a partir a 5.000 s de simulação. Como mostra a Fig. 9, 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 estabilizado.

A análise da Fig. 10 corresponde ao caso mais crítico da árvore de ensaios (ver Fig. 9), o caso VC2-QB8-EC8-AI5.

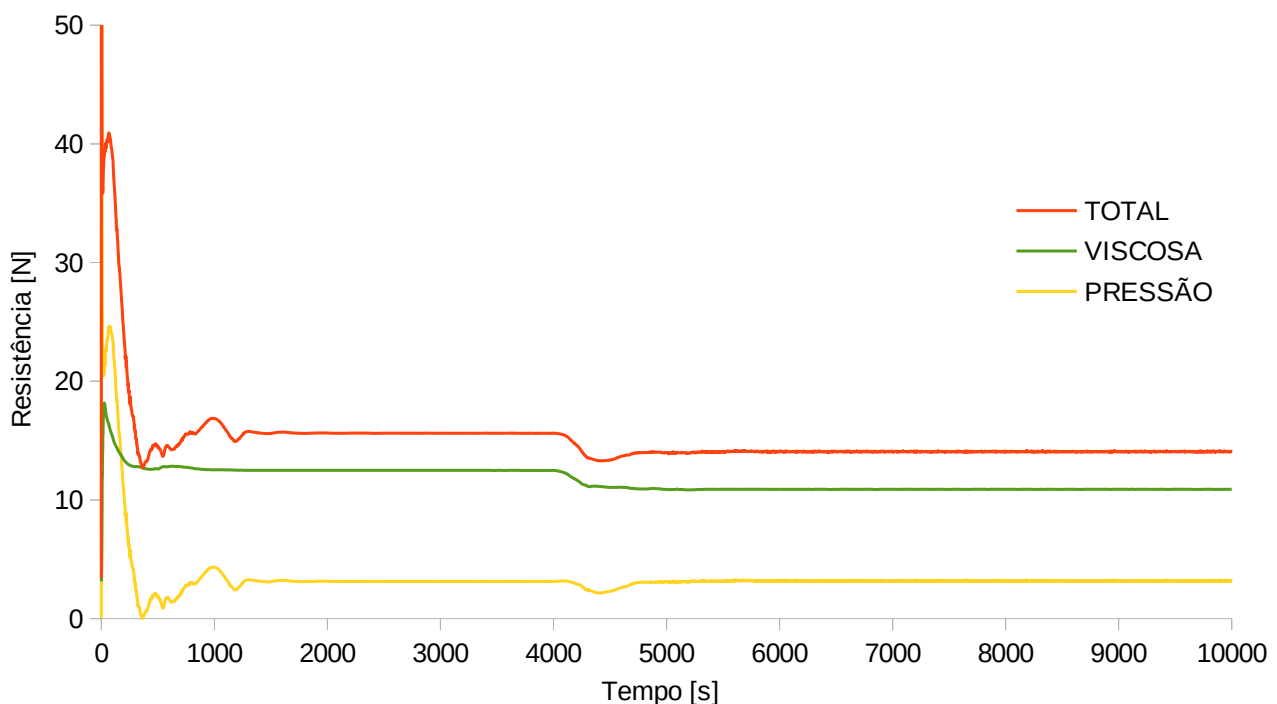


Figura 10. Resistência em função do tempo simulado.

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.

5.1. Resistências Sem Injeção de Ar

Com a finalidade de estimar o ganho com o método de injeção de ar, foram realizadas duas simulações no casco padrão (sem a injeção de ar), para as velocidades de operação do casco de 1,335 e 1,668 m/s. As resistências, viscosas, de pressão e totais são mostradas na Tab. 13.

Tabela 13. Resistência para o casco padrão.

Velocidade do Casco [m/s]	Resistência [N]		
	Viscosa	Pressão	Total
1,335	16,54 (86,78%)	2,52 (13,22%)	19,06
1,668	24,90 (83%)	5,10 (17%)	30,00

*os valores entre parênteses () representam a parcela de significância em relação a resistência total

Os valores referentes à velocidade de 1,668 m/s são os mesmos utilizados na validação do estudo, realizado na seção 4.7.

5.2. Reduções das Resistências

As reduções relativas das resistências com o método de injeção de ar foram encontradas em razão das resistências para o casco padrão, levantadas na Tab. 13. Os resultados foram compilados em gráficos, visando uma melhor análise da relação entre os parâmetros de injeção. Estes gráficos descrevem a redução relativa da resistência ao avanço em função do ângulo de injeção na ordenada, ainda no mesmo gráfico, o parâmetro de espessura da camada de ar é analisado na assinatura de múltiplas curvas. Desta forma, cada gráfico contém 9 casos simulados. Outros parâmetros são analisados na comparação entre esses gráficos. A redução relativa da resistência para velocidade de 1,335 m/s são apresentadas nos gráficos contidos na Fig. 11, já para a velocidade de 1,668 m/s são mostradas na Fig. 12.

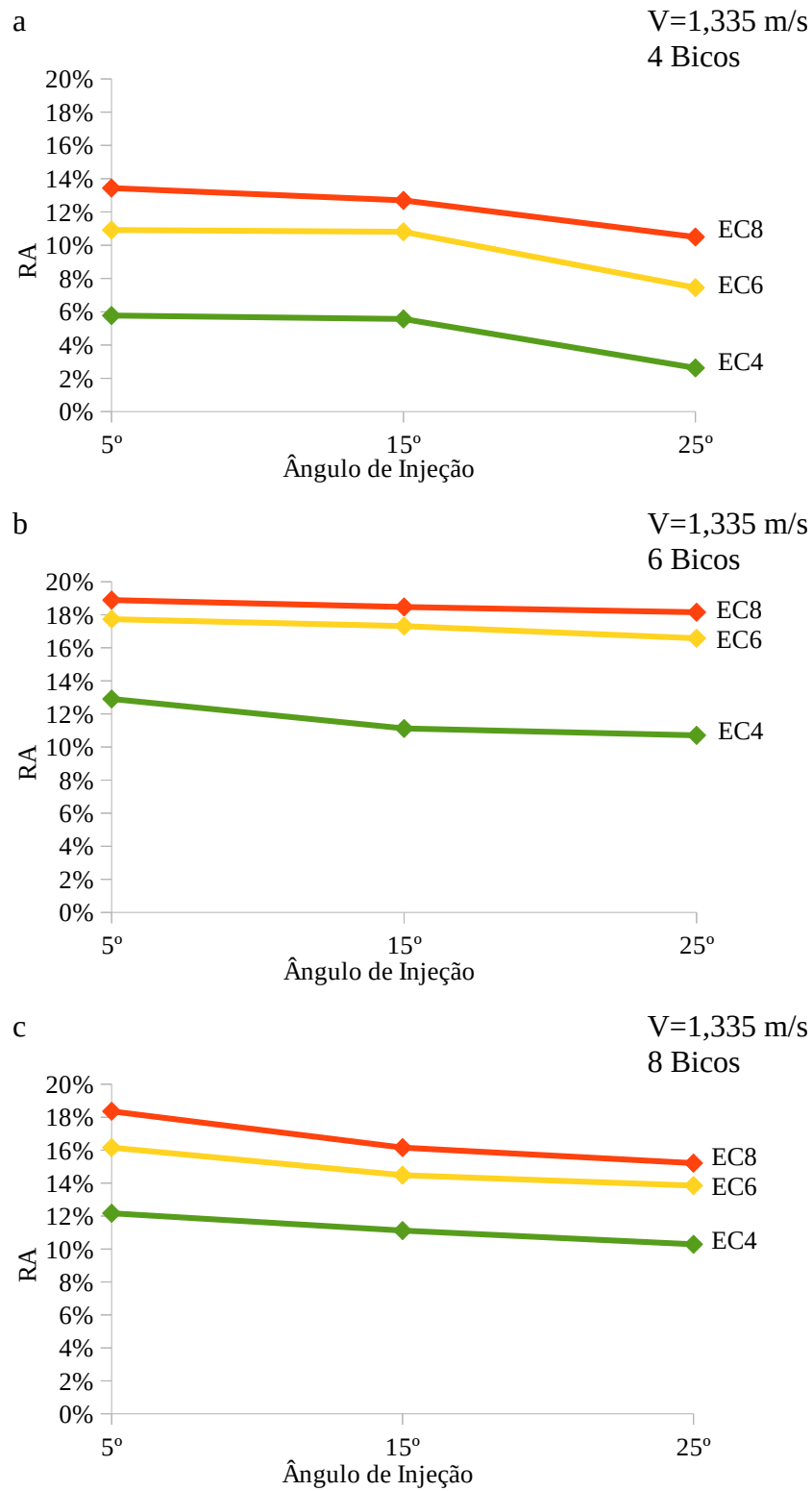


Figura 11. Redução da resistência total ao avanço para a velocidade de 1,335 m/s: a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.

A redução relativa da resistência total, relacionada à velocidade 1,335 m/s, apresenta padrões em função dos parâmetros: ângulo de injeção, quantidade de bicos e espessura da camada de ar. A redução foi diretamente proporcional aos parâmetros: quantidade de bicos e espessura da camada de ar. Já para o ângulo de injeção, essa redução apresentou ser menos efetiva para ângulos maiores.

Tomando a quantidade de bicos como referencial, no gráfico da Fig. 11a, quantidade de bicos igual a 4, a redução mais expressiva aconteceu para o decréscimo de ângulo de injeção de 25° para 15°, sendo esta redução superior na curva de espessura da camada de ar correspondente a 6 mm (EC6). Já no gráfico da Fig. 11b, quantidade de bicos igual a 6, a redução apontou ser indiferente à variação do ângulo de injeção para as curvas de espessura da camada de ar 8 mm e 6 mm. Contudo, para a curva de espessura da camada de ar de 4 mm o ângulo de injeção apresentou um decréscimo de 15° para 5°, sendo este o mais efetivo para a redução da resistência ao arrasto. O gráfico da Fig. 11c, quantidade de bicos igual a 8, as reduções seguiram de forma quase linear em função do ângulo de injeção. Especificamente para a curva de espessura da camada de ar de 4 mm.

Analisando as reduções em vista da espessura da camada de ar, é observado que a redução pode mais que dobrar somente com o incremento da espessura da camada de ar, isto ocorre em específico no gráfico 11a, 4 bicos injetores. Para as outras quantidades de bicos, gráficos 11b e 11c, o ganho na redução fica por volta de 50% quando a espessura da camada de ar vai de 4 mm para a espessura da camada de ar máxima, 8 mm. Poucos ganhos de redução frente ao acréscimo da espessura da camada de ar indicam que a distribuição do ar no fundo do casco formou uma película, ou seja, o ar no fundo do casco se encontra desenvolvida no regime ALDR. Deste modo, não há mais ganhos efetivos na redução do arrasto viscoso e, conseqüentemente, na redução do arrasto total do casco.

É observado que, o ângulo de injeção foi o parâmetro mais relevante para a eficácia do método de injeção de ar, para a velocidade de 1,335 m/s. Para todas as curvas de espessura da camada de ar os maiores ganhos da redução foram para os ângulos de 5°. Isso ocorre devido ao desenvolvimento do ar ser direcionado a jusante do escoamento, de modo quase paralelo ao escoamento. Assim, são evitados vazamentos precoces pelas laterais, e melhores cobrimentos do ar na região da popa são atingidos.

A maior redução encontrada para a velocidade de 1,335 m/s foi de 18,89%, correspondente à simulação QB6-EC8-AI5. Assim como, a menor redução atingida ficou em 2,62%, para a simulação QB4-EC4-AI25.

De maneira semelhante, as reduções relativas da resistência ao avanço, para velocidade de 1,668 m/s, são apresentadas nos gráficos contidos na Fig. 12.

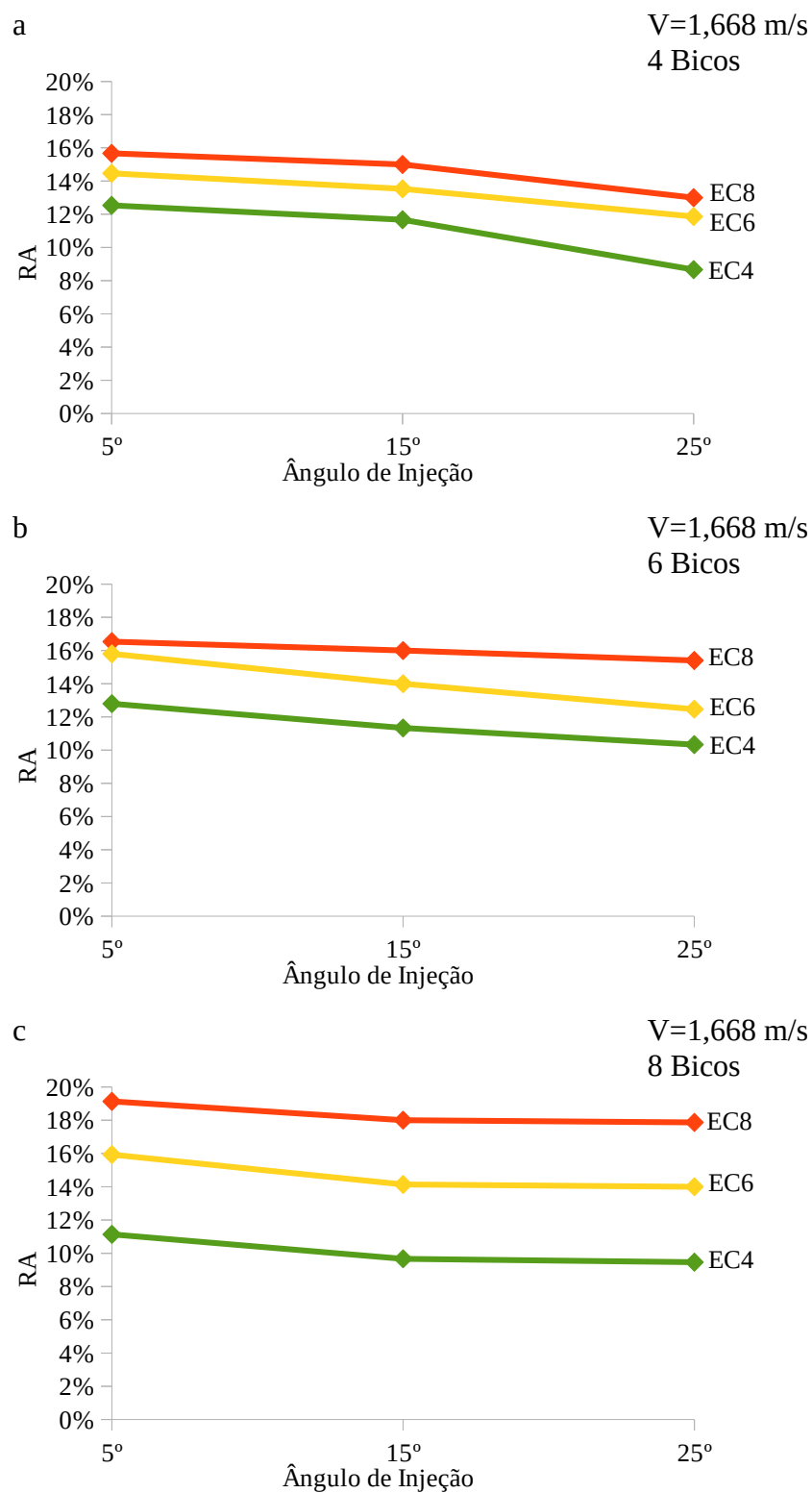


Figura 12. Redução da resistência total ao avanço para a velocidade de 1,668 m/s: a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.

A redução relativa da resistência total, para a velocidade de 1,668 m/s, também apresentou padrões em função dos parâmetros: ângulo de injeção, quantidade de bicos e espessura da camada de ar. Porém, melhores resultados foram obtidos. Portanto, a redução segue, igualmente na velocidade de 1,335 m/s, proporcionalmente aos parâmetros: quantidade de bicos e espessura da camada de ar. E inversamente proporcional ao ângulo de injeção. Na discussão a seguir são feitas comparações dos resultados entre as velocidades 1,335 e 1,668 m/s.

Analisando as reduções com a quantidade de bicos como referencial, no gráfico da Fig. 12a, com quantidade de bicos igual a 4, a redução mais expressiva se repetiu no decréscimo do ângulo de injeção de 25° para 15°; todavia, a maior redução aconteceu na curva de espessura da camada de ar correspondente a 4 mm. Para a velocidade de 1,335 m/s (ver Fig. 11a) ocorre na espessura da camada de ar de 6 mm, isto indica que a velocidade do escoamento possui interdependência com o ângulo de injeção na eficiência do método. Já para o gráfico da Fig. 12b, quantidade de bicos igual a 6, a indiferença em relação ao ângulo de injeção, ocorrida na velocidade de 1,335 m/s (ver Fig. 11b), não se repetiu, entretanto, as reduções atingiram menores resultados. No gráfico da Fig. 12c, quantidade de bicos igual a 8, seguiu os mesmos padrões acontecidos para a velocidade de 1,335 m/s (ver Fig. 11c), porém, os ganhos de reduções foram maiores para a curva de espessura da camada de ar 8 mm. No geral, a análise em razão da quantidade de bicos indica que: para maiores velocidades do casco e maior quantidade de bicos injetores a eficiência do método é aumentada.

Investigando as reduções em razão da espessura da camada de ar, semelhante ao observado na velocidade de 1,335 m/s, a redução melhora com o acréscimo da espessura da camada de ar, porém, essa redução ocorre em menor escala para a velocidade de 1,668 m/s. No gráfico da Fig. 12b, quantidade de bicos igual a 6, a redução para a velocidade de 1,335 m/s obteve melhores resultados em relação à velocidade de 1,668 m/s, nas curvas de espessuras de camada de ar de 6 e 8 mm. Esta análise aponta que, para a velocidade de 1,668 m/s, o método performa melhor para maiores quantidades de bicos.

O ângulo de injeção, para a velocidade de 1,668 m/s, obteve relevância na eficácia do método de injeção de ar, porém com menor expressividade. Igualmente analisado na velocidade 1,335 m/s, todas as curvas de espessura da camada de ar obtiveram melhores ganhos de redução para os ângulos de 5°. Para os gráficos das Fig. 12a e 12c, 4 bicos e 8 bicos respectivamente, os ganhos de redução para as curvas de espessuras de camada de ar não sofrem grandes alterações em função do ângulo de injeção, comparado com os mesmos gráficos para a velocidade de 1,335 m/s (ver Figs. 11a e 11c). Indicando que para maiores velocidades do casco, o ângulo de injeção reduz sua influência sobre a eficiência do método.

A maior redução encontrada para a velocidade de 1,668 m/s foi de 19,13%, correspondente à simulação QB8-EC8-AI5. Assim como, a menor redução atingida ficou em 8,67%, para a simulação QB4-EC4-AI25. Estes intervalos indicam que, o método de injeção de ar no fundo do casco performa melhor em maiores velocidades de cruzeiro do casco. Uma terceira velocidade do casco, para todos os parâmetros, seria necessária para confirmar tal indicação.

5.3.Reduções Líquidas de Potência

Com o objetivo de obter a efetiva redução líquida de potência mecânica no avanço do casco com o método de injeção de ar, é levantada a potência entregue no compressor. A Tabela 14 apresenta as potências requeridas pelo compressor para cada vazão volumétrica.

Tabela 14. Potências requeridas pelo compressor.

Espessura da Camada de Ar [mm]	Velocidade do Casco [m/s]	Vazão Volumétrica [m ³ /s]	Potência [W]
4	1,335	0,00386	1,54
	1,668	0,00482	1,92
6	1,335	0,00578	2,30
	1,668	0,00722	2,88
8	1,335	0,00771	3,08
	1,668	0,00963	3,86

A velocidade do casco e a espessura da camada de ar implicam diretamente na vazão volumétrica de ar injetado.

Com as reduções líquidas é possível avaliar o efeito do custo energético da injeção de ar nos resultados obtidos anteriormente, presentes nas Figs. 11 e 12. Tais comparações podem ser realizadas, pois, o produto entre a ‘velocidade do casco’ e a ‘parcela da resistência total ao avanço reduzida’ (R_{red}) resulta em potência e, essas velocidades utilizadas são as mesmas. As reduções (RI e RL) são expostas nos gráficos contidos nas Figs. 13 e 14.

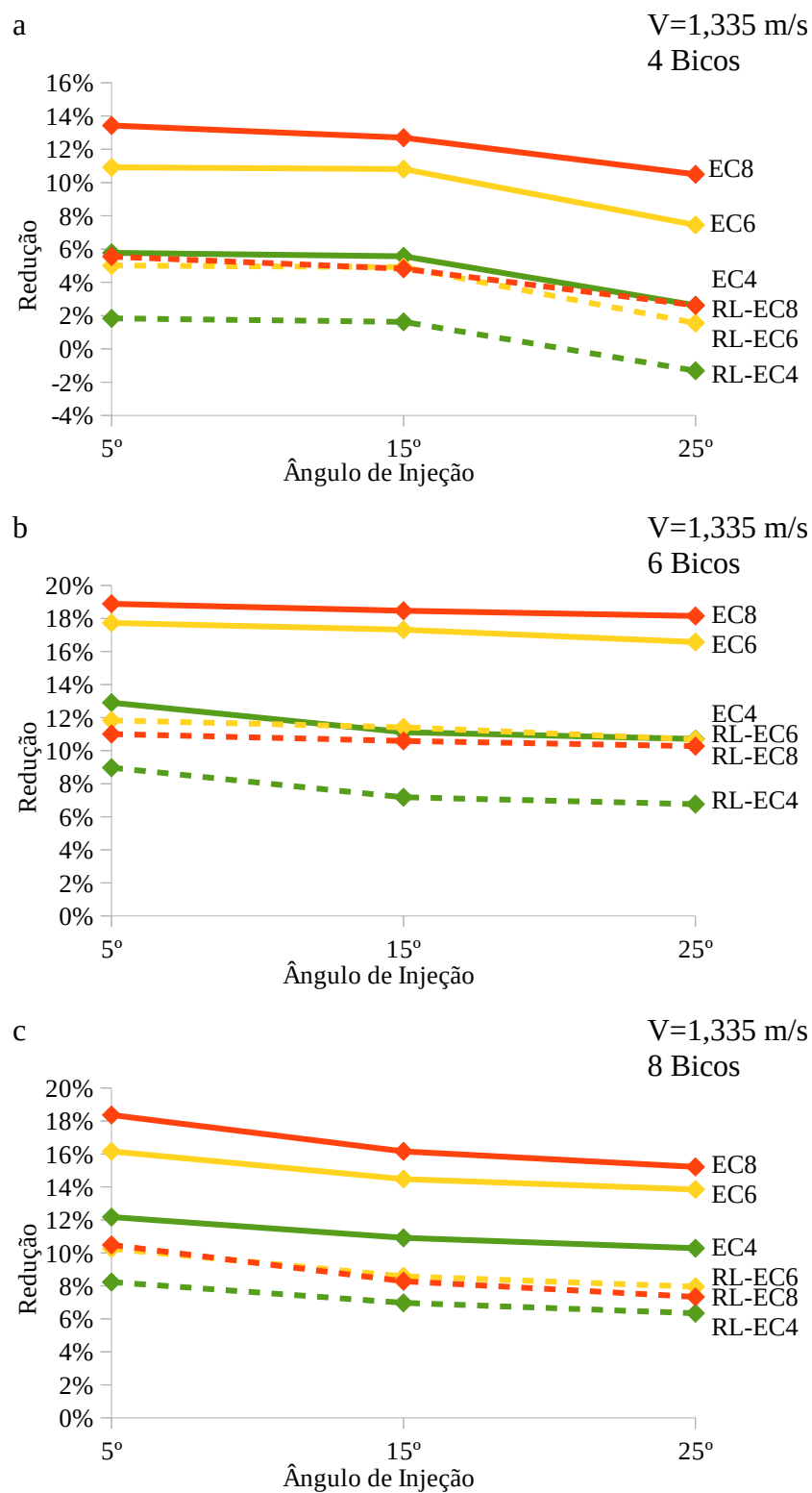


Figura 13. Redução líquida de potência para a velocidade de 1,335 m/s: a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.

A partir da Fig. 13, fica evidenciado que os custos energéticos envolvidos na injeção do ar para a velocidade de 1,335 m/s apresentam melhores resultados para as curvas de espessura da camada de ar de injeção de 6 mm. O ganho de redução de potência alcançado pela espessura da camada de ar a 8 mm em relação à curva de espessura da camada de ar a 6 mm não compensa o aumento energético requerido para essa vazão, resultando para a curva de espessura da camada de ar de 6 mm melhores resultados. Em específico, a curva de espessura da camada de ar a 8 mm, no gráfico da Fig. 13c, quantidade de bicos igual a 8, obteve redução líquida menor do que a curva de espessura da camada de ar a 4 mm.

As reduções líquidas de potência, para as curvas de espessuras de camada de ar, obtiveram resultados próximos entre si. Esse padrão ocorreu, mais expressivamente, nos gráficos das Figs. 13a e 13c, quantidade de bicos 4 e 8, respectivamente. Isto indica que o custo energético na injeção do ar serve de convergência para as reduções líquidas de potência para as curvas de espessuras de camada de ar.

As demais características discutidas para as Figs. 11 e 12 se repetem para as curvas de reduções líquidas, visto que o custo energético é constante para cada vazão volumétrica prescrita, e independe do ângulo de injeção e da quantidade de bicos. Assim as curvas de redução líquida repetem os mesmos perfis apresentados pelos gráficos das reduções com a injeção de ar, sendo a redução líquida o decréscimo, ponto a ponto, da potência requerida pelo compressor.

A maior redução líquida de potência encontrada, para a velocidade de 1,335 m/s, foi de 11,83%, correspondente à simulação RL-VC1-QB6-EC6-AI5. A menor redução líquida atingida foi -1,32%, para a simulação RL-VC1-QB4-EC4-AI25. Redução negativa indica que a potência requerida no avanço do casco aumentou, com o método de injeção de ar, em relação ao casco padrão.

De modo semelhante, as reduções líquidas de potência, para velocidade de 1,668 m/s, são apresentadas nos gráficos contidos na Fig. 14.

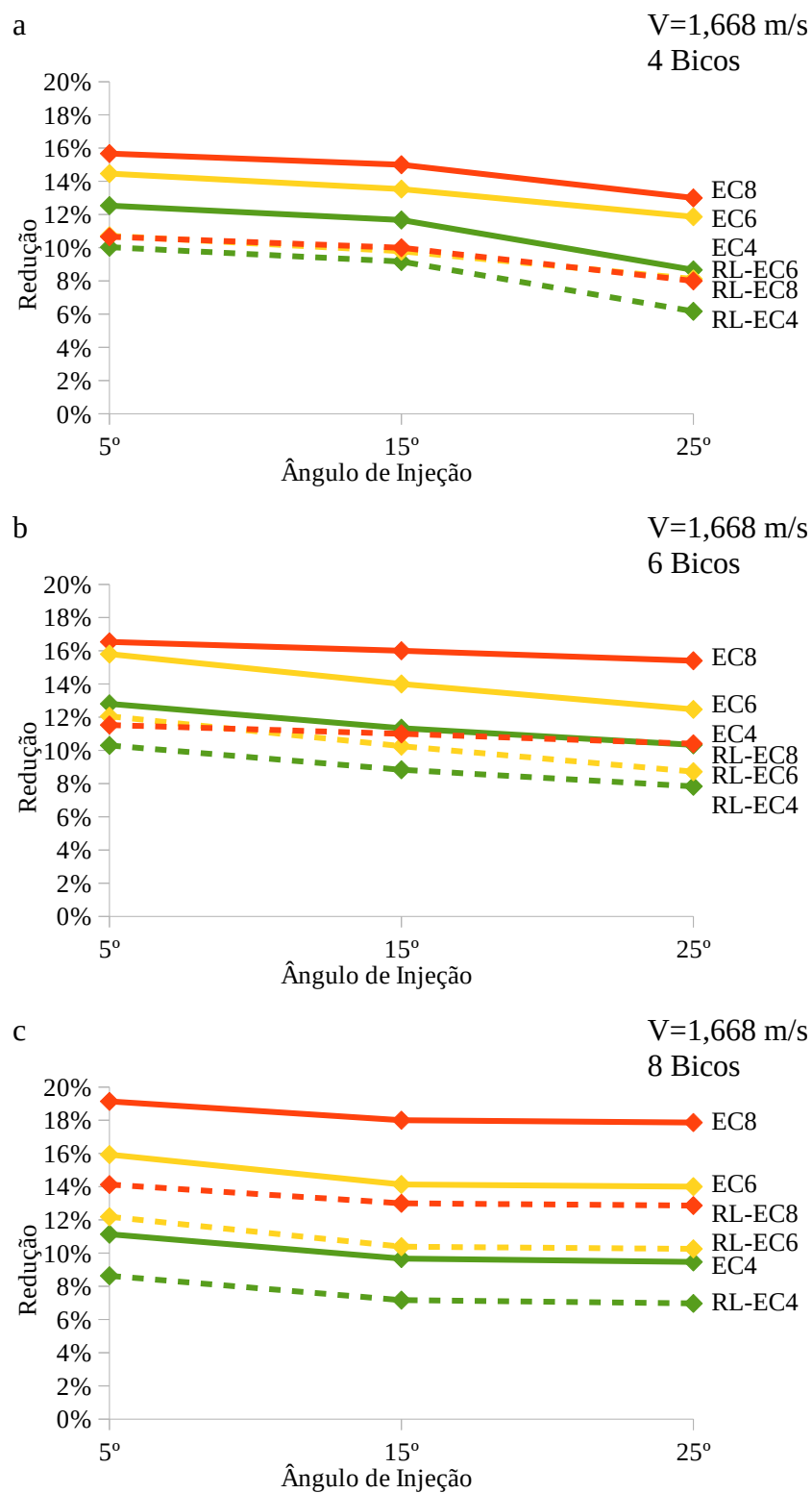


Figura 14. Redução líquida para a velocidade de 1,668 m/s. a) 4 bicos injetores, b) 6 bicos injetores, c) 8 bicos injetores.

Para a velocidade de 1,668 m/s também ficou evidenciado que as curvas de espessuras de camada de ar com 6 mm atingiram melhores resultados ao método, porém com menores diferenças em relação aos resultados encontrados na velocidade de 1,335 m/s. Além de, para o gráfico da Fig. 14c, quantidade de bicos injetores igual a 8, o maior ganho na redução líquida de potência foi encontrado para a curva de espessura da camada de ar a 8 mm. Nos gráficos 14a e 14b é possível analisar que as reduções líquidas de potência alcançadas na espessura da camada de ar a 8 mm, em relação à curva de espessura da camada de ar a 6 mm, não compensaram os custos energéticos requeridos para essas vazões. Obtendo para as curvas de espessura da camada de ar a 6 mm melhores resultados. Como exceção, a curva de espessura da camada de ar a 8 mm, no gráfico 14c quantidade de bicos igual a 8, obteve a maior redução líquida de potência.

Os valores das reduções líquidas de potência, para as curvas das espessuras de camada de ar na velocidade de 1,335 m/s, ocorreram mais agrupados em relação à velocidade do casco de 1,668 m/s (Fig. 14a e Fig. 14b). Assim como ocorrido na velocidade de 1,335 m/s a maior redução líquida de potência ocorreu justamente na quantidade de bicos menos afetada pela convergência, ou seja, a maior redução líquida de potência, para a velocidade de 1,335 m/s, pertence à quantidade de bicos igual a 6, e para a velocidade de 1,668 m/s a maior redução líquida de potência ocorreu para a quantidade de bicos igual a 8.

A maior redução líquida de potência encontrada, para a velocidade de 1,668 m/s, foi de 14,13%, correspondente à simulação RL-VC2-QB8-EC8-AI5. E a menor redução líquida de potência alcançou 6,16%, relativa à simulação RL-VC2-QB4-EC4-AI25.

Portanto, o melhor resultado encontrado pertence ao caso ‘VC2-QB8-EC8-AI5’, reduzindo 19,13% da resistência total ao avanço. Por fim, levando em consideração o custo energético na injeção de ar, esta redução atingiu 14,13% na potência mecânica total ao avanço do casco DTC. As reduções das resistências de pressão são exibidas na Tab. 15. As reduções das resistências viscosas são exibidas na Tab. 16. Na Tabela 17 são mostradas todas as reduções da resistência ao avanço, com o método de injeção de ar. Por fim, os valores das reduções líquidas de potência são exibidas na Tab. 18.

Tabela 15. Resistências de pressão com injeção de ar.

Velo- cidade do Casco DTC [m/s]	Ângulo de Injeção [°] Sigla: AI	Resistência de Pressão [N]								
		QB4- EC4	QB4- EC6	QB4- EC8	QB6- EC4	QB6- EC6	QB6- EC8	QB8- EC4	QB8- EC6	QB8- EC8
1,335 Sigla: VC1	5	2,22 (11,90%)	2,14 (15,08%)	2,10 (16,67%)	2,18 (13,49%)	2,12 (15,87%)	2,06 (18,25%)	2,10 (16,67%)	2,12 (15,87%)	2,06 (18,25%)
	15	2,24 (11,11%)	2,18 (13,49%)	2,16 (14,29%)	2,22 (11,90%)	2,16 (14,29%)	2,12 (15,87%)	2,14 (15,08%)	2,16 (14,29%)	2,14 (15,08%)
	25	2,34 (7,14%)	2,24 (11,11%)	2,22 (11,90%)	2,22 (11,90%)	2,14 (15,08%)	2,14 (11,90%)	2,16 (14,29%)	2,18 (13,49%)	2,20 (12,70%)
1,668 Sigla: VC2	5	4,44 (12,94%)	4,44 (12,94%)	4,46 (12,55%)	4,54 (10,98%)	4,60 (9,80%)	4,48 (12,16%)	4,52 (11,37%)	4,52 (11,37%)	4,42 (13,33%)
	15	4,56 (10,59%)	4,62 (9,41%)	4,56 (10,59%)	4,58 (10,20%)	4,64 (9,02%)	4,64 (9,02%)	4,56 (10,59%)	4,58 (10,20%)	4,56 (10,59%)
	25	4,62 (9,41%)	4,66 (8,63%)	4,70 (7,84%)	4,64 (9,02%)	4,70 (7,84%)	4,74 (7,06%)	4,58 (10,20%)	4,60 (9,80%)	4,60 (9,80%)

*os valores entre parênteses () representam as reduções das resistências de pressão em relação ao casco padrão.

Tabela 16. Resistências viscosas com injeção de ar.

Velo- cidade do Casco DTC [m/s]	Ângulo de Injeção [°] Sigla: AI	Resistência Viscosa [N]								
		QB4- EC4	QB4- EC6	QB4- EC8	QB6- EC4	QB6- EC6	QB6- EC8	QB8- EC4	QB8- EC6	QB8- EC8
1,335 Sigla: VC1	5	15,74 (4,84%)	14,84 (10,28%)	14,40 (12,94%)	14,42 (12,82%)	13,56 (18,02%)	13,40 (18,98%)	14,64 (11,49%)	13,86 (16,20%)	13,50 (18,38%)
	15	15,76 (4,72%)	14,82 (10,40%)	14,48 (12,45%)	14,72 (11,00%)	13,60 (17,78%)	13,42 (18,86%)	14,84 (10,28%)	14,14 (14,51%)	13,84 (16,32%)
	25	16,22 (1,93%)	15,40 (6,89%)	14,84 (10,28%)	14,80 (10,52%)	13,76 (16,81%)	13,46 (18,62%)	14,94 (9,67%)	14,24 (13,91%)	13,96 (15,60%)
1,668 Sigla: VC2	5	21,80 (12,45%)	21,22 (14,78%)	20,84 (16,31%)	21,62 (13,17%)	20,66 (17,03%)	20,56 (17,43%)	22,14 (11,08%)	20,70 (16,87%)	19,84 (20,32%)
	15	21,94 (11,89%)	21,32 (14,38%)	20,94 (15,90%)	22,02 (11,57%)	21,16 (15,02%)	20,56 (17,43%)	22,54 (9,48%)	21,18 (14,94%)	20,04 (19,52%)
	25	22,78 (8,51%)	21,78 (12,53%)	21,40 (14,06%)	22,26 (10,60%)	21,56 (13,41%)	20,64 (17,11%)	22,58 (9,32%)	21,20 (14,86%)	20,04 (19,52%)

*os valores entre parênteses () representam as reduções das resistências viscosas em relação ao casco padrão.

Tabela 17. Resistências ao avanço com injeção de ar.

Velo- cidade do Casco DTC [m/s]	Ângulo de Injeção [°] Sigla: AI	Resistência ao Avanço [N]								
		QB4- EC4	QB4- EC6	QB4- EC8	QB6- EC4	QB6- EC6	QB6- EC8	QB8- EC4	QB8- EC6	QB8- EC8
1,335 Sigla: VC1	5	17,96 (5,77%)	16,98 (10,91%)	16,50 (13,43%)	16,60 (12,91%)	15,68 (17,73%)	15,46 (18,89%)	16,74 (12,17%)	15,98 (16,16%)	15,56 (18,36%)
	15	18,00 (5,56%)	17,00 (10,81%)	16,64 (12,70%)	16,94 (11,12%)	15,76 (17,31%)	15,54 (18,47%)	16,98 (11,12%)	16,30 (14,48%)	15,98 (16,16%)
	25	18,56 (2,62%)	17,64 (7,45%)	17,06 (10,49%)	17,02 (10,70%)	15,90 (16,58%)	15,60 (18,15%)	17,10 (10,28%)	16,42 (13,85%)	16,16 (15,22%)
1,668 Sigla: VC2	5	26,24 (12,53%)	25,66 (14,47%)	25,30 (15,67%)	26,16 (12,80%)	25,26 (15,80%)	25,04 (16,53%)	26,66 (11,13%)	25,22 (15,93%)	24,26 (19,13%)
	15	26,50 (11,67%)	25,94 (13,53%)	25,50 (15,00%)	26,60 (11,33%)	25,80 (14,00%)	25,20 (16,00%)	27,10 (9,67%)	25,76 (14,13%)	24,60 (18,00%)
	25	27,40 (8,67%)	26,44 (11,87%)	26,10 (13,00%)	26,90 (10,33%)	26,26 (12,47%)	25,38 (15,40%)	27,16 (9,47%)	25,80 (14,00%)	24,64 (17,87%)

*os valores entre parênteses () representam as reduções das resistências ao avanço em relação ao casco padrão.

Tabela 18. Resultados das reduções líquidas de potência.

Velo- cidade do Casco DTC [m/s]	Ângulo de Injeção [°] Sigla: AI	Redução [%]								
		QB4- EC4	QB4- EC6	QB4- EC8	QB6- EC4	QB6- EC6	QB6- EC8	QB8- EC4	QB8- EC6	QB8- EC8
1,335 Sigla: VC1	5	1,83%	5,01%	5,55%	8,97%	11,83%	11,01%	8,23%	10,26%	10,48%
	15	1,62%	4,91%	4,82%	7,18%	11,41%	10,59%	6,97%	8,58%	8,28%
	25	-1,32%	1,55%	2,61%	6,76%	10,68%	10,27%	6,34%	7,95%	7,34%
1,668 Sigla: VC2	5	10,03%	10,72%	10,66%	10,30%	12,05%	11,53%	8,63%	12,19%	14,13%
	15	9,16%	9,79%	10,00%	8,83%	10,25%	11,00%	7,16%	10,39%	13,00%
	25	6,16%	8,12%	8,00%	7,83%	8,72%	10,40%	6,96%	10,25%	12,86%

5.4. Análise Qualitativa

Com objetivo de analisar o que ocorre no casco e sua vizinhança durante a injeção de ar, o melhor e o pior caso para cada velocidade foram escolhidos. Para a velocidade do casco de 1,335 m/s são: 'VC1-QB6-EC8-AI5', referente ao melhor caso; e 'VC1-QB4-EC4-AI25' como o pior caso dentre todas as simulações. Para a velocidade do casco de 1,668 m/s, são: 'VC2-QB8-EC8-AI5', o melhor caso geral da árvore de ensaios; e 'VC2-QB4-EC4-AI25', o pior resultado para esta velocidade. Estas análises foram realizadas considerando a simulação em regime estabilizado, a 10.000 s. Na Figura 15 são mostrados o perfil do casco e a vista do fundo do casco para o caso 'VC1-QB6-EC8-AI5'.

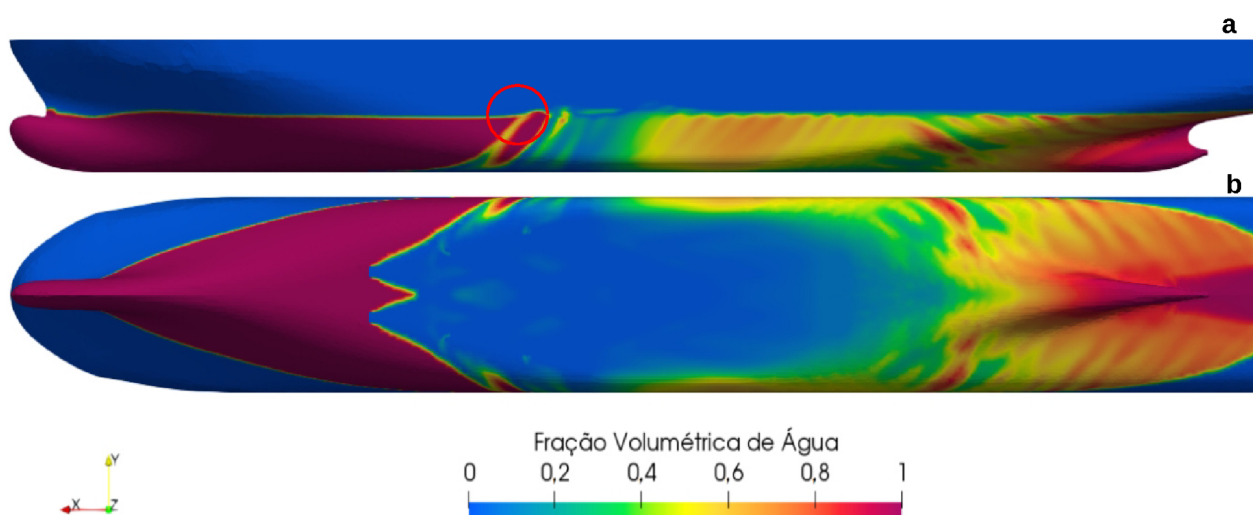


Figura 15. Fração volumétrica de água sobre o casco 'VC1-QB6-EC8-AI5': a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco

O melhor caso, para a velocidade de 1,335 m/s, ocorreu para a quantidade de 6 bicos injetores, considerando somente a redução com a injeção de ar, 'VC1-QB6-EC8-AI5'. É possível avaliar que a cobertura de ar com frações volumétricas de água entre 0,5 e 0,8 alcançaram a região da popa, a jusante do escoamento. Em azul é a película de ar no regime ALDR, cobrindo toda parte plana do fundo do casco. Na Figura 15a é mostrado um discreto vazamento precoce de ar para o ar injetado pelos bicos injetores 1A e 1B (vide página 45), indicado pelo círculo em vermelho. É considerado um vazamento precoce de ar todo aquele que, injetado pelo bico descreva uma trajetória direta para a superfície, desta forma não ocorre o desenvolvimento da camada de ar no fundo ou costado do

casco a BB e EB. Nos costados do casco, na região da meia-nau, o regime ALDR também foi desenvolvido, a jusante do escoamento, com frações volumétricas de água entre 0,3 a 0,6.

Na Figura 16 são mostrados o perfil do casco e a vista do fundo do casco para o caso ‘VC1-QB4-EC4-AI25’.

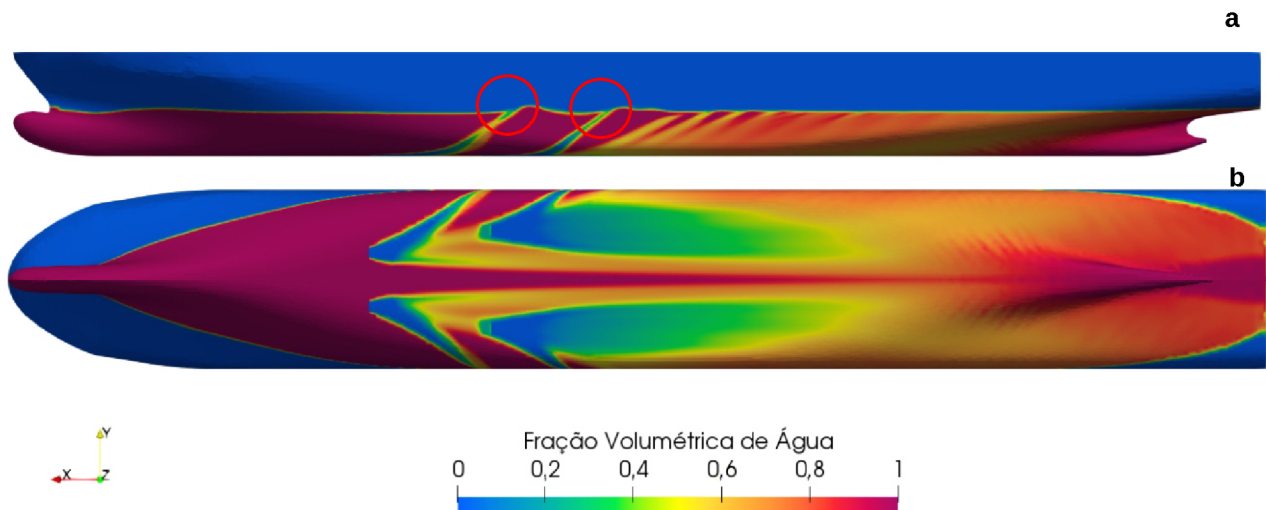


Figura 16. Fração volumétrica de água sobre o casco ‘VC1-QB4-EC4-AI25’: a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco

Ainda para a velocidade de 1,335 m/s, o pior caso ‘VC1-QB4-EC4-AI25’ ocorreu para 4 bicos injetores. No fundo do casco, Fig. 16b, é visível a inconsistência da cobertura de ar, apresentando somente o regime ALDR imediatamente após a injeção do ar pelos bicos 1A, 1B, 2A e 2B. Não ocorrendo cobertura de ar, na região plana e central do fundo do casco, para qualquer fração volumétrica de água que difira de 1 (somente água). Dois vazamentos precoces de ar, identificados no costado, são destacados pelos círculos em vermelho na Fig. 16a. Na região da popa foram apresentados altos valores de fração volumétrica de água, entre 0,7 e 0,9.

Na Figura 17 são mostrados o perfil do casco e a vista do fundo do casco para o caso ‘VC2-QB8-EC8-AI5’.

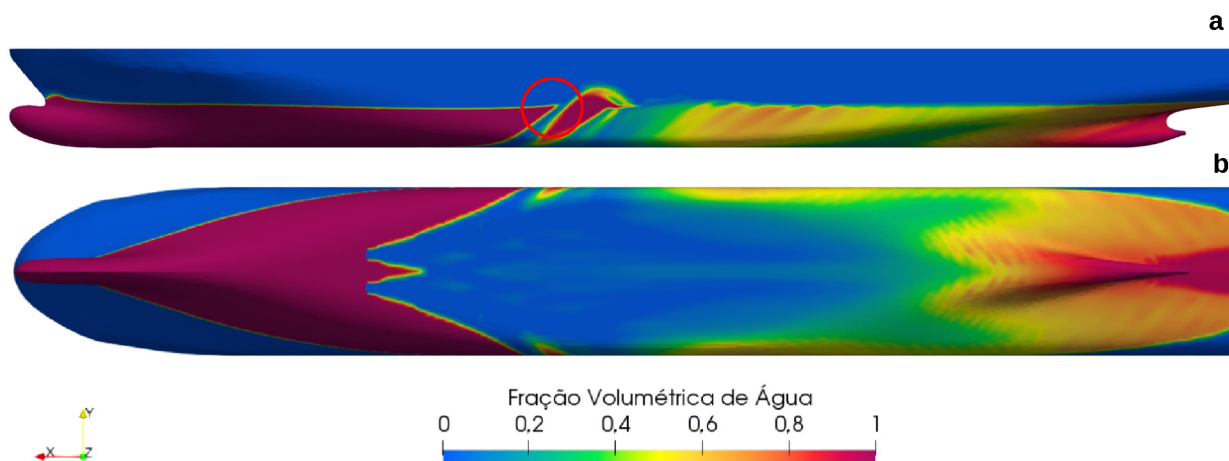


Figura 17. Fração volumétrica de água sobre o casco ‘VC2-QB8-EC8-AI5’: a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco

Qualitativamente, pode-se observar na Fig. 17a um vazamento de ar pelo costado do casco na altura da meia-nau, indicado pelo círculo em vermelho. Possivelmente, a relativa proximidade entre as linhas de injeção formam um acúmulo de ar, resultando no vazamento precoce observado nas extremidades do casco. Na Figura 17b, análise do melhor caso, observa-se a cobertura de ar quase completamente formada a jusante. Na região plana do fundo do casco nota-se uma boa presença de baixas frações volumétricas de água, o que indica que o regime ALDR foi desenvolvido. Na região da popa, para o fundo e costado, ocorreram baixos valores de frações volumétricas de água, entre 0,5 a 0,8, menor faixa de fração volumétrica de ar encontrada em toda a árvore de ensaios para essa região. Contudo, uma coluna d’água logo após o vazamento de ar é desenvolvida, isto indica que a velocidade presente no vazamento desse ar ocorreu com maiores intensidades, em relação aos outros casos analisados.

Na Figura 18 são mostrados o perfil do casco e a vista do fundo do casco para o caso ‘VC2-QB4-EC4-AI25’.

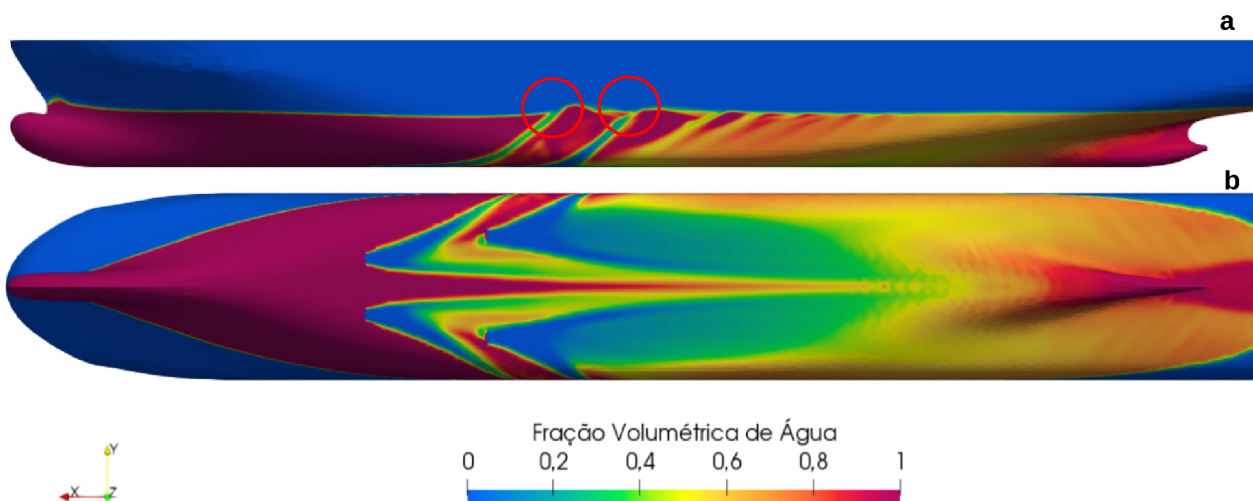


Figura 18. Fração volumétrica de água sobre o casco ‘VC2-QB4-EC4-AI25’: a) cobertura da camada de ar na lateral do casco e b) cobertura da camada de ar no fundo do casco

Para a velocidade de 1,668 m/s, o pior caso ‘VC2-QB4-EC4-AI25’ ocorreu para 4 bicos injetores. Similar ao acontecido para a velocidade de 1,335 m/s, no fundo do casco, Fig. 18b, é possível avaliar a inconstância da cobertura de ar, com o regime ALDR desenvolvido apenas após a injeção do ar pelos bicos 1A, 1B, 2A e 2B. Uma considerável parcela da região plana e central do fundo do casco não foi coberta por qualquer fração volumétrica de água menor que 1. Dois vazamentos precoces de ar, percebidos no costado, são indicados pelos círculos em vermelho na Fig. 18a. Apesar dos dois vazamentos precoces de ar, houve para a velocidade de 1,668 m/s, 0,4 de fração volumétrica de água a jusante do escoamento no fundo do casco e frações volumétricas de água entre 0,6 a 0,9 na região da popa.

Os dois melhores casos, as velocidades de 1,335 e 1,668 m/s, ‘VC1-QB6-EC8-AI5’ e ‘VC2-QB8-EC8-AI5’, respectivamente, apresentaram uma região de vazamento precoce de ar. Já os piores casos, ‘VC1-QB4-EC4-AI25’ e ‘VC2-QB4-EC4-AI25’, apresentaram duas regiões de vazamento de ar precoce. É observado que a maior cobertura de ar no fundo do casco com menores frações volumétricas de água ocorrem justamente para os casos em que há menor presença de vazamentos precoces de ar, implicando melhores resultados para o método.

A seguir, são feitas análises, de pressão e velocidade, para o melhor caso ‘VC2-QB8-EC8-AI5’. Estas análises são formadas por 3 *iso volumes* (descritos pelos valores de $\alpha = 0,1, 0,5$ e $0,9$). Os perfis de pressão e velocidade são levantados para a simulação em regime estabilizado, em 10.000 s simulados. Estes são expostos nas Figs. 19 e 20, respectivamente.

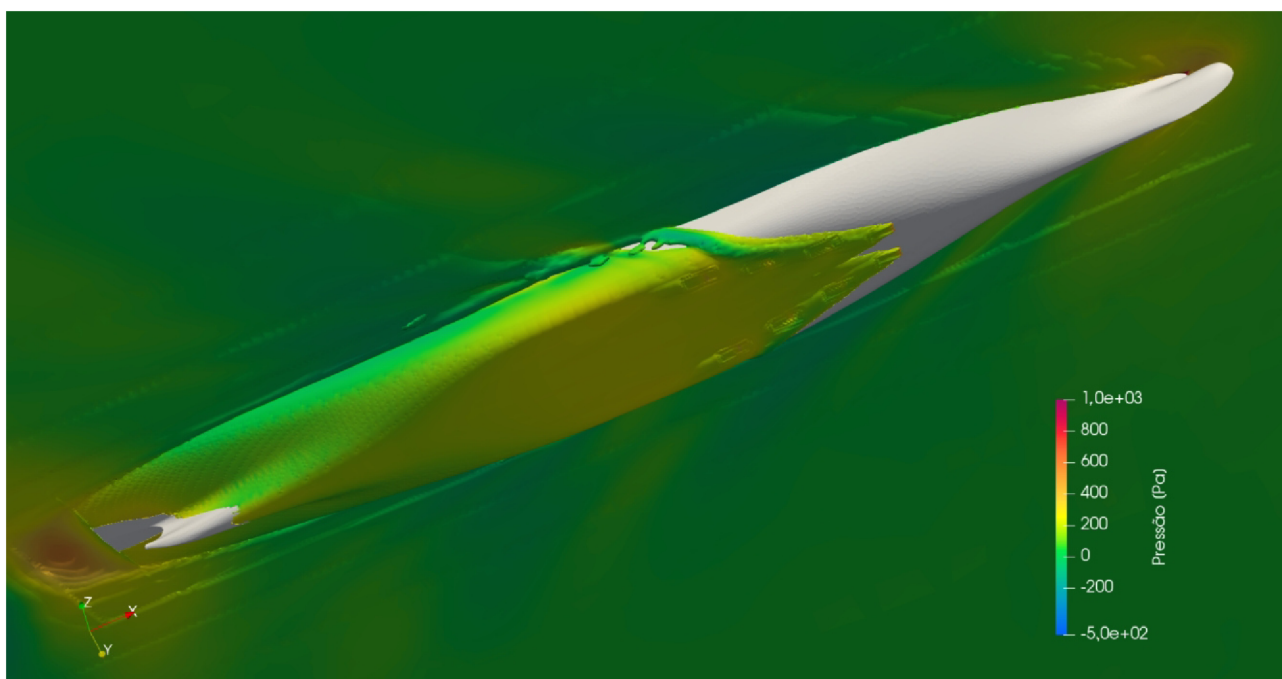


Figura 19. Perfil para pressão para o casco VC2-QB8-EC8-AI5.

Nota-se uma homogeneidade da pressão dinâmica, esperada, pois o estudo foi realizado em um casco de deslocamento. A baixa velocidade do escoamento no entorno do casco não implica significativas mudanças no campo de pressão, logo, os efeitos dinâmicos possuem baixa expressividade nos resultados. A jusante, ocorre um leve aumento da pressão no fluido. Já que a parcela de energia cinética é reduzida, resultante da perda de velocidade na região, como mostra a Fig. 19.

Na região do vazamento de ar (ver Fig. 17) ocorre uma redução da pressão para o escoamento de ar, indicando que há naquela região uma velocidade maior do escoamento, provavelmente, provocado pela fuga do ar em direção à superfície. Devido a grande presença de ar, nessa região, as camadas de ar se sobrepõem, reduzindo as forças cisalhantes para as camadas mais afastadas daquelas próximas ao casco. Os volumes contendo o vazamento de ar, possuem baixas frações volumétricas de água, assim, a força de campo ‘gravidade’ atuante, acelera o ar livre (camadas mais afastadas do casco) para a superfície, atingindo maiores velocidades. No campo de velocidades, Fig. 20, fica visto com mais detalhe o ocorrido.

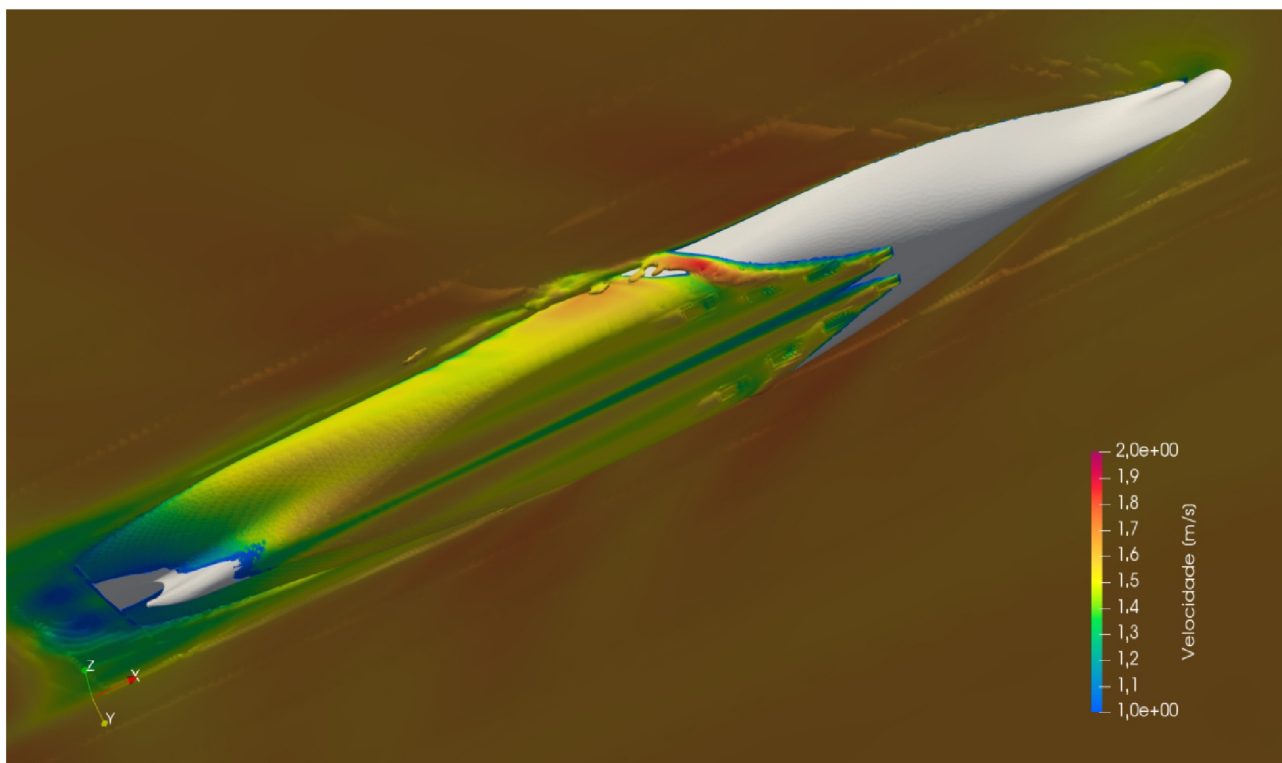


Figura 20. Perfil de velocidades para o casco VC2-QB8-EC8-AI5.

As velocidades, entre o escoamento livre e a região de injeção de ar, são parecidas, pois a velocidade de injeção de ar é descrita em função da espessura da camada de ar, área de injeção dos 8 bicos e ângulo de injeção, resultando no valor de $\sim 1,8$ m/s para a velocidade de injeção; sendo similar a velocidade do escoamento livre: 1,668 m/s. Na região da popa, ocorre uma redução de velocidade devido ao efeito de parede junto ao casco, como esperado.

Levantada a discussão sobre a presença da coluna d'água logo após o vazamento de ar na Fig. 17a, é possível confirmar, na Fig. 20, que de fato o vazamento de ar ocorreu com velocidades maiores em razão ao campo de velocidades. E que de fato, a força de campo 'gravidade' atuou nesses excessivos vazamentos de ar.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentado um estudo sobre a redução do arrasto viscoso e, consequentemente, arrasto total ao avanço do casco DTC, através da injeção de ar na região plana no fundo do casco. Os resultados mostraram que a injeção de ar pode reduzir significativamente o arrasto total da embarcação, possibilitando assim uma redução do consumo de combustíveis e, ainda que de forma indireta, reduções de poluentes emitidos provenientes da queima desses combustíveis. O método obteve redução máxima de 19,13% na resistência total ao avanço e 14,13% de redução da potência mecânica total ao avanço, quando considerada a energia necessária na injeção do ar no casco DTC.

Dentre os parâmetros pertencentes à injeção de ar, o ângulo de injeção foi o único parâmetro que, para todos os casos simulados, apresentou relação direta com a performance do método, tendo como referência a redução da resistência ao avanço. Houve melhores resultados ao reduzir o ângulo (aproximando do casco) de injeção, em específico de 25° para 5° de injeção. Esse comportamento se repetiu na curva de reduções líquidas de potência, contudo ângulos maiores reduzem a eficiência do método, já que a energia requerida na injeção do ar não se altera com o ângulo de injeção.

Melhores resultados foram encontrados com o uso dos 8 bicos injetores. Em parte eles dispersaram o ar no fundo do casco de modo mais homogêneo, permitindo uma camada ALDR mais abrangente; além de ser menos suscetível às fugas prematuras de ar. Outra importante conclusão foi que as quantidades de bicos injetores alteram a pressão dinâmica na saída do ar. Pressões menores foram encontradas no uso de 8 bicos injetores. Esta relação com a pressão dinâmica conduziu a melhores resultados da redução líquida na resistência total ao avanço.

Como proposto pelas patentes Hideki et al. (2008) e Phan et al. (2012) as vazões de ar equivalente na faixa de 4 a 8 mm desempenham boas eficiências no método de injeção de ar. Porém, o estudo mostrou que para a velocidade de 1,335 m/s o custo energético requerido pelo compressor torna a espessura da camada de ar de 6 mm mais eficaz na redução líquida de potência ao avanço do casco DTC. Para a velocidade de 1,668 m/s tal padrão foi observado para as quantidades de bicos 4 e 6, enquanto a quantidade de bicos igual a 8 resultou no maior ganho de redução líquida de potência para a espessura da camada de ar de 8 mm. Foi encontrado redução líquida de potência negativa, significando que, no balanço energético, o método de injeção de ar

aumentou a potência necessária ao avanço do casco. O caso que apresentou redução líquida de potência negativa foi o 'VC1-QB4-EC4-AI25'. Para a velocidade do casco de 1,668 m/s não houve reduções líquidas de potência negativas. Desta forma, o método de injeção foi mais vantajoso para velocidade de operação de 1,668 m/s. Uma possível explicação para a diferença entre os valores de redução encontrados para cada velocidade seria quanto ao não desenvolvimento por completo do regime ALDR observado a jusante do escoamento; devido à velocidade inferior, 1,335 m/s, propagar o ar com maior dificuldade para a região da popa.

É importante notar que, as resistências de pressão apresentam valores similares quando comparadas às simulações com e sem injeção de ar, ver Tab. 15. Isto mostra como o método de injeção de ar não interfere, de modo significativo, na parcela de arrasto por pressão no casco DTC.

6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

A primeira sugestão é analisar uma terceira velocidade operacional do casco DTC, possibilitando avaliar a relação entre os resultados do método de injeção de ar com as velocidades operacionais. Juntamente, analisar os efeitos de ondas regulares e irregulares na eficiência do método.

A otimização da posição dos bicos injetores tem o possível potencial de aperfeiçoar os resultados do método de injeção de ar. Além de, estudar novos arranjos que possibilitem a compreensão do problema de vazamentos prematuros de ar e desenvolvimentos homogêneos da camada ALDR frente aos efeitos de *Yaw*, *Pitch* e *Roll* da embarcação. E arranjos que evitem ao máximo a presença de ar no sistema propulsivo.

Estudar o real ganho na redução do impacto ambiental com o método de injeção de ar seria de grande importância. Com os valores das reduções líquidas de potência é possível empregar, para um casco em escala real, motores de menor porte. Consequentemente, ao longo da vida útil, a embarcação emitiria menos poluentes derivados da queima de combustíveis e outros produtos nocivos intrínsecos a motores convencionais de sistemas propulsivos, como óleos lubrificantes.

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. Poupança de tempo e recursos na implementação do método em um

casco real. Assim como, um estudo de viabilidade econômica da embarcação em regime operacional, no modal de transporte marítimo.

Analisar em sistemas auxiliares presentes nas embarcações, a viabilidade técnica de suprir a demanda da injeção de ar do método. Seja por balanços energéticos e/ou rejeitos de outros gases que possam substituir o ar na injeção do método. Desde que, não gere maior poluição ao meio ambiente.

7. REFERÊNCIAS

- ANTAQ. 2021. **Anuário Estatístico Aquaviário 2.1.4.**
<http://ea.antaq.gov.br/QvAJAXZfc/opensdoc.htm?document=painel\antaq - anuário 2014 - v0.9.3.qvw&anonymous=true> (Acessado em 30 de abril de 2022).
- Bistafa, S. R. 2010. **Mecânica dos fluidos: Noções e aplicações.** Editora Blucher. São Paulo, São Paulo, Brasil. 355 pp.
- Dogrul, A., Ozdemir, Y. H., Sezen, S., e Barlas, B. 2010. **Uncertainty Assessment and Self-Propulsion Estimation of Duisburg Test Case.** 3rd International Symposium on Naval Architecture and Maritime, 16 : 829-843.
- Elbing, B. R., Winkel, E. S., Lay, K. A., Ceccio, S. L., Dowling, D. R., e 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., e Rezende, A. L. T. 2019. **Comparação entre modelos de turbulência K- ω aplicados em um escoamento em canal com junção T.** Revista Militar de Ciência e Tecnologia, 34: 9.
- Fox, McDonald, e Pritchard. 2010. **Introdução a Mecânica dos Fluidos.** LTC. West Lafayette, Indiana, United States of America. 1018 pp.
- Guebey, P. 2021. **CMA CGM BOUGAINVILLE** (MMSI: 215857000). Ship Photos AIS Marine Traffic. <https://www.marinetraffic.com/en/photos/of/ships/shipid:6699070/ships> (Acessado em 17 de Maio de 2021).
- Hao, W. U., e Yongpeng, O. U. 2019. **Numerical simulation of air layer morphology on flat bottom plate with air cavity and evaluation of the drag reduction effect.** International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 11: 510–520.
- Hao, W. U., Yongpeng, O., e Qing, Y. E. 2019. **Experimental study of air layer drag reduction on a flat plate and bottom hull of a ship with cavity.** Ocean Engineering, 183: 236–248.
- Hideki Kawashima, Tetsugo Fukuda, Yoshiaki Kodama, Munehiko Hinatsu, Toshifumi Hori, Masahiko Makino, Kazuyoshi Harumi, et al. 2008. **Skin frictional resistance reduction device for ship hull and its method.** Japan Patent No. JP 2008 – 120246.
- Hirt, C. W., e 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.** Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel

Oil Consumption Database in GISIS.

[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air pollution/MEPC 77-6-1 - 2020](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC%2077-6-1%20-%202020) (Acessado em 30 de abril de 2022).

Jang, J., Choi, S. H., Ahn, S.-M., Kim, B., e Seo, J. S. 2014. **Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship**. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 6: 363–379.

John Campbell. Hubbard, R. e Snow McGregor, K. 2014. **Gas Conditioning and Processing - The Equipment Modules**. Campbell Petroleum Series, Norman, Oklahoma. 459 pp.

Jouse, M. 2020, November 6. **Y+ Using SimScale Fluid Flow CFD**.

<https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394> (Acessado em 18 de julho de 2022).

Kitware. 2021. **ParaView**. Free CFD Software. <https://www.paraview.org/> (Acessado em 4 de agosto de 2022).

MAN. 2013. **Basic Principles of Ship Propulsion**, MAN Diesel & Turbo, Copenhagen SV, Denmark, 45 pp.

MARIN. 2016. **The influence of y+ in wall functions applied in ship viscous flows**, Internship report: 58.

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

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

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

Park, S. H., e 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.

Phan Anh Tuan e Pham Thi Thanh Huong. 2012. **Bubble injection device for ship skin frictional resistance reduction**. Japan Patent No. JP 2012 – 166704.

UNCTAD, R. 2021. **Review of Maritime Transport 2021**. United Nations Publications, New York, New York, United States of America. 177 pp.

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

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

- Yanuar, Waskito, K. T., Pratama, S. Y., Candra, B. D., e Rahmat, B. A. 2018. **Comparison of Microbubble and Air Layer Injection with Porous Media for Drag Reduction on a Self-propelled Barge Ship Model**. Journal of Marine Science and Application, 17: 165–172.
- Zhao, X., e Zong, Z. 2022. **Experimental and numerical studies on the air-injection drag reduction of the ship model**. Ocean Engineering, 18: 101-110.

8. APÊNDICE: configurações e implementações de algoritmos no OpenFOAM

Algumas discussões que não foram tratadas no corpo do texto ficam colocadas aqui como complemento para a compreensão técnica do problema proposto pelo estudo. Na Tabela 19 são mostradas as configurações das condições de contorno para cada superfície.

Tabela 19. Condições de contorno para cada superfície

Superfície / Fenômeno	Sigla	Condição de Contorno
Entrada		
Escoamento	U	fixedValue
	p_{rgh}	fixedFluxPressure
Fração Volumétrica de Água	α	fixedValue
Turbulência	κ	fixedValue
	ω	fixedValue
Viscosidade	ν	fixedValue
Saída		
Escoamento	U	outletPhaseMeanVelocity
	p_{rgh}	zeroGradient
Fração Volumétrica de Água	α	variableHeightFlowRate
Turbulência	κ	inletOutlet
	ω	inletOutlet
Viscosidade	ν	zeroGradient
Atmosfera		
Escoamento	U	pressureInletOutletVelocity
	p_{rgh}	prghEntrainmentPressure
Fração Volumétrica de Água	α	inletOutlet
Turbulência	κ	inletOutlet
	ω	inletOutlet
Viscosidade	ν	zeroGradient
Casco		
Escoamento	U	movingWallVelocity
	p_{rgh}	fixedFluxPressure
Fração Volumétrica de Água	α	zeroGradient
Turbulência	κ	kqRWallFunction
	ω	omegaWallFunction
Viscosidade	ν	nutkRoughWallFunction
Bicos Injetores		

Escoamento	U	uniformFixedValue
Fração Volumétrica de Água	p_{rgh}	fixedFluxPressure
Turbulência	α	fixedValue
	κ	fixedValue
	ω	fixedValue
Viscosidade	ν	fixedValue

8.1.Algoritmo de controle da injeção de ar no fundo do casco

O algoritmo que calcula e controla a injeção do ar realizada pelos bicos injetores, esta incluído no arquivo U.orig utilizado pelo OpenFOAM. Esse algoritmo controla a vazão volumétrica de ar e o ângulo de injeção de ar especificado por decomposição vetorial (eixos X e Z) na área de injeção do bico. Abaixo segue o exemplo do algoritmo empregado para os casos que utilizaram $9,64 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de vazão volumétrica e 5° de injeção. Devido a simulação ocorrer somente para metade do domínio (condição de simetria), no exemplo, alguns valores estão pela metade.

```
// * * * * * //
```

```
UMean 1.668;
dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField    uniform (#neg $UMean 0 0);
no_Nozzles 4;    // qtd de bicos injetores
angle           5; // graus
flowRate        #calc "0.00482 / $no_Nozzles"; // [m3/s]
area1           0.000589063; //m2
area2           0.000589377;
area3           0.000589608;
area4           0.000589697;
```

```
// Função linear da injeção de ar
```

```
varying_Start    4000; // início da injeção de ar
```

```
varying_Full 5000; // estabilização da injeção de ar
```

```
mag_Velocity1 #calc "$flowRate / ($area1 * sin(degToRad($angle)))";  
component_X1 #calc "$mag_Velocity1 * cos(degToRad($angle))";  
component_Z1 #calc "$mag_Velocity1 * sin(degToRad($angle))";  
component_XYZ1 (#neg $component_X1 0 #neg $component_Z1);
```

```
varying_air1 table  
(  
    ($varying_Start (0 0 0))  
    ($varying_Full $component_XYZ1)  
);
```

```
mag_Velocity2 #calc "$flowRate / ($area2 * sin(degToRad($angle)))";  
component_X2 #calc "$mag_Velocity2 * cos(degToRad($angle))";  
component_Z2 #calc "$mag_Velocity2 * sin(degToRad($angle))";  
component_XYZ2 (#neg $component_X2 0 #neg $component_Z2);
```

```
varying_air2 table  
(  
    ($varying_Start (0 0 0))  
    ($varying_Full $component_XYZ2)  
);
```

```
mag_Velocity3 #calc "$flowRate / ($area3 * sin(degToRad($angle)))";  
component_X3 #calc "$mag_Velocity3 * cos(degToRad($angle))";  
component_Z3 #calc "$mag_Velocity3 * sin(degToRad($angle))";  
component_XYZ3 (#neg $component_X3 0 #neg $component_Z3);
```

```
varying_air3 table  
(  
    ($varying_Start (0 0 0))  
    ($varying_Full $component_XYZ3)
```

```

);

mag_Velocity4 #calc "$flowRate / ($area4 * sin(degToRad($angle)))";
component_X4 #calc "$mag_Velocity4 * cos(degToRad($angle))";
component_Z4 #calc "$mag_Velocity4 * sin(degToRad($angle))";
component_XYZ4 (#neg $component_X4 0 #neg $component_Z4);

varying_air4 table
(
    ($varying_Start (0 0 0))
    ($varying_Full $component_XYZ4)
);

// ***** //

```

8.2.Algoritmo de distribuição espacial dos bicos injetores no fundo do casco

O algoritmo que calcula o tamanho e a posição de cada bico injetor, em X e Y, a ser discretizado no fundo do casco, é incluído ao arquivo topoSetDict utilizado pelo OpenFOAM. Abaixo segue o exemplo do algoritmo para os casos que utilizaram 8 bicos injetores.

```

// ***** //

#include "../0/U"

initial_head 3.12; // início em X da área de injeção
breadth 0.361; // largura da película de ar

length_air_X 0.01172; // comprimento em X do bico de injeção
length_air_Y 0.05; // comprimento em Y do bico de injeção

OriginX4.35; // fim em X da área de injeção

```

```
OriginY#calc "-((( $breadth - $length_air_Y) / ($no_Nozzles + 1)) + $length_air_Y)";
```

```
distX      #calc "($OriginX - $initial_head - $length_air_X) / $no_Nozzles";
```

```
distY      #calc "(0.361 - $length_air_Y) / ($no_Nozzles + 1)";
```

```
box1X      $OriginX;
```

```
box1Y      $OriginY;
```

```
box2X      #calc "$box1X - $distX";
```

```
box2Y      #calc "$box1Y - $distY";
```

```
box3X      #calc "$box2X - $distX";
```

```
box3Y      #calc "$box2Y - $distY";
```

```
box4X      #calc "$box3X - $distX";
```

```
box4Y      #calc "$box3Y - $distY";
```

```
// Uso no setFields
```

```
position1B ($box1X $box1Y -0.01);
```

```
position1A (#calc "$box1X + $length_air_X" #calc "$box1Y + $length_air_Y" 0.01);
```

```
position2B ($box2X $box2Y -0.01);
```

```
position2A (#calc "$box2X + $length_air_X" #calc "$box2Y + $length_air_Y" 0.01);
```

```
position3B ($box3X $box3Y -0.01);
```

```
position3A (#calc "$box3X + $length_air_X" #calc "$box3Y + $length_air_Y" 0.01);
```

```
position4B ($box4X $box4Y -0.01);
```

```
position4A (#calc "$box4X + $length_air_X" #calc "$box4Y + $length_air_Y" 0.01);
```

```
// ***** //
```