

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO LUIZ NORILLER

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE AERAÇÃO EM ESCOAMENTOS DE ALTAS
VELOCIDADES COM O USO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

CURITIBA

2021

MARCELO LUIZ NORILLER

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE AERAÇÃO EM ESCOAMENTOS DE ALTAS
VELOCIDADES COM O USO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Professor José Junji Ota, DSc

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

N841i Noriller, Marcelo Luiz
Investigação do processo de aeração em escoamentos de altas velocidades com o uso da dinâmica dos fluidos computacional [recurso eletrônico] / Marcelo Luiz Noriller – Curitiba, 2021.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Professor José Junji Ota

1. Dinâmica dos fluidos. 2. Escoamento. 3. OpenFOAM (software). I. Universidade Federal do Paraná. II. Ota, José Junji. III. Título.

CDD: 006.25

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCELO LUIZ NORILLER** intitulada: **INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE AERAÇÃO EM ESCOAMENTO DE ALTA VELOCIDADE COM O USO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**, sob orientação do Prof. Dr. JOSÉ JUNJI OTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 02 de Junho de 2021.

Assinatura Eletrônica
28/07/2021 20:44:17.0
JOSÉ JUNJI OTA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
05/07/2021 16:11:23.0
MARCOS ROGÉRIO SZELIGA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Assinatura Eletrônica
02/07/2021 07:37:05.0
ANDRE LUIZ TONSO FABIANI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
02/07/2021 09:55:44.0
BRUNO VICTOR VEIGA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - DEP. DE
HIDRÁULICA)

AGRADECIMENTOS

À Deus por providenciar força e coragem nos momentos mais difíceis, sem nunca me abandonar e sempre me guiar.

Àqueles que são meus guardiões e que me mantêm em pé, deixo aqui o meu salve e meu axé.

À minha família por me mostrar o valor do conhecimento e por sempre me apoiar e incentivar a continuar lutando. Em especial, agradeço à minha amada Anna Paula, pelo tempo dedicado a mim e a esse trabalho, pelas palavras de incentivo e por todos os momentos dedicados a nós.

Agradeço ao meu professor orientador, José Junji Ota, pela confiança e dedicação que, somados à sua experiência, sabedoria e paciência, contribuiu muito para o desenvolvimento desse estudo.

Aos meus professores a quem registro minha profunda gratidão e admiração. Cada um de vocês teve um papel fundamental no meu crescimento. Em especial, aos professores da banca de Qualificação e Defesa, professor André Luiz Tonso Fabiani, professor Bruno Victor Veiga e professor Marcos Rogério Szeliga, por aceitarem o convite e pelas contribuições e comentários tão pertinentes que enriqueceram o conteúdo desse trabalho.

E ao CEHPAR pela oportunidade de trabalhar com pessoas tão experientes e poder compartilhar do conhecimento delas, proporcionando-me crescimento profissional e até mesmo pessoal. Agradeço também, pelo incentivo à busca do conhecimento, pelo tempo e ferramentas disponibilizados para a realização dessa pesquisa. Em especial ao Carlos Olavo Slota Ovelar, Felipe Ferreira de Souza, Fernanda Hiromi Scheffer Yamakawa, Marcelo Yudi Minoda Takenobu e Márcio Froelich Friedrich, por me ajudarem ao longo das etapas deste trabalho, o que foi fundamental para a realização das mesmas.

Deus está no controle.

*“Jamais ache que estas sozinho,
pois eu sempre estarei com você.”*

*“Nunca disse que seria fácil,
mas sempre avisei que estou contigo.”*

RESUMO

Esta dissertação investigou, por meio da dinâmica dos fluidos computacional, o processo de aeração em escoamentos de altas velocidades, especificamente, o escoamento sobre a calha do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia. As simulações numéricas foram realizadas no *software* OpenFOAM, utilizando os modelos de simulação RANS (em conjunto com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST) e DES (em conjunto com o modelo Spalart-Allmaras DDES). Foram realizadas duas abordagens principais de simulações numéricas, uma considerando a escala de protótipo e outra a escala geométrica 1:30. Os resultados numéricos foram comparados com dados de protótipo disponíveis na literatura. Além da análise quantitativa dos resultados, também foi realizada uma análise qualitativa para avaliar se o comportamento geral do escoamento foi reproduzido adequadamente pelo modelo numérico. As modelagens com o modelo de simulação RANS não representaram adequadamente o processo de aeração. Obteve-se uma diferença de até 85,1% referente as vazões de ar do modelo computacional e os resultados da obra. Já as modelagens com o modelo DES representaram mais adequadamente as características do escoamento sobre a calha do vertedouro, o que conduziu a resultados de vazões de ar no interior da torre de aeração maiores em relação as simulações RANS e, por consequência, indicou que o processo de aeração foi melhor representado. Nessas novas simulações, a diferença entre as vazões de ar foram de até 44,0%. De maneira geral, a utilização da modelagem numérica para este estudo permitiu avaliar o escoamento sob a calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia de uma forma que seria consideravelmente mais complexa de modo experimental. E, por mais que os resultados da entrada de vazão de ar das simulações em escala de protótipo não tenham alcançado os valores medidos em obra, o comportamento do escoamento foi representando adequadamente nas simulações DES.

Palavras-chaves: Aeração. Escoamentos de altas velocidades. Dinâmica dos fluidos computacional. OpenFOAM. Modelos de Simulação RANS e DES.

ABSTRACT

This dissertation investigated, through computational fluid dynamics, the aeration process in high velocity flows, specifically, the flow over the spillway of the Foz do Areia Hydroelectric Plant. The numerical simulations were performed in the OpenFOAM software, using the simulation models RANS (with the turbulence model $k - \omega$ SST) and DES (with the Spalart-Allmaras DDES model). Two main approaches to numerical simulations were carried out, one considering the prototype scale and the other 1:30 geometric scale. The numerical results were compared with prototype data available in the literature. In addition to the quantitative analysis of the results, a qualitative analysis was also carried out to assess whether the general flow behavior was properly reproduced by the numerical model. The modeling with the RANS simulation model did not adequately represent the aeration process. A difference of up to 85.1% was obtained regarding the air flows of the computational model and the results of the prototype. Modeling with the DES model, on the other hand, more adequately represented the characteristics of the flow over the spillway chute, which led to higher airflow results inside the aeration tower compared to the RANS simulations and, consequently, indicated that the process of aeration was better represented. In these new simulations, the difference between the air flows was up to 44.0%. In general, the use of numerical modeling for this study allowed to evaluate the flow under the spillway of the Foz do Areia HPP in a way that would be considerably more complex in an experimental way. And, even though the results of the air flow input from the prototype scale simulations did not reach the values measured on site, the flow behavior was adequately represented in the DES simulations.

Key-words: Aeration. High velocity flows. Computational fluid dynamics. OpenFOAM. RANS and DES Turbulence Models.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – AUTO-AERAÇÃO NO VERTEDOURO	26
FIGURA 2.2 – ESBOÇO DE UM AERADOR TÍPICO DE VERTEDOURO	27
FIGURA 2.3 – PRINCIPAIS TIPOS DE SISTEMA DE AERAÇÃO	27
FIGURA 2.4 – PRINCIPAIS SOLUÇÕES PARA ADMISSÃO DE AR	28
FIGURA 2.5 – APLICAÇÃO PRÁTICA DE UM AERADOR DA CALHA DO VERTEDOURO DE KÁRAHNJÚKAR, ISLÂNDIA	29
FIGURA 2.6 – MECANISMO DE AERAÇÃO	30
FIGURA 2.7 – MECANISMO DE AERAÇÃO, PRESSÃO NO FUNDO E CONCENTRAÇÃO DE AR	32
FIGURA 2.8 – GEOMETRIA BÁSICA DE UM AERADOR	41
FIGURA 2.9 – VAZÃO DE AR CONTRA VAZÃO DE ÁGUA - RESULTADOS DE MODELO FÍSICO E PROTÓTIPO	45
FIGURA 2.10 – CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO DE AR E VAZÃO DE ÁGUA (ESQUERDA) E CORRELAÇÃO ENTRE O FATOR DE EFEITO DE ESCALA E A ESCALA DO MODELO (DIREITA)	46
FIGURA 2.11 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE MODELO COMPUTACIONAL DE ESCALA 1:40 E ESCALA COMPLETA (PROTÓTIPO)	49
FIGURA 2.12 – VÓRTICES DE DIFERENTES ESCALAS NO ESCOAMENTO EM CONDUTOS FECHADOS	52
FIGURA 2.13 – PROCESSO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA CINÉTICA	53
FIGURA 2.14 – CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO	54
FIGURA 2.15 – COMPARAÇÃO ENTRE DNS E LES	55
FIGURA 2.16 – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE AO LONGO DO TEMPO PARA AS PARCELAS MÉDIAS \bar{u} E INSTANTÂNEAS u' EM MODELOS RANS PARA ESCOAMENTOS PERMANENTE E NÃO PERMANENTE	57
FIGURA 2.17 – CONFIGURAÇÃO DA SOLUÇÃO DE ESCOAMENTO CONSIDERANDO A SIMULAÇÃO DES	64
FIGURA 2.18 – ESCOAMENTO MULTIFÁSICO: À ESQUERDA ESCOAMENTO SEPARADO E À DIREITA ESCOAMENTO DISPERSO	67
FIGURA 2.19 – ABORDAGENS DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO: MODELOS a) EULER-LAGRANGE E b) EULER-EULER	68
FIGURA 2.20 – MODELO <i>VOLUME OF FLUID</i> a) INTERFACE REAL ENTRE FLUIDOS, b) FRAÇÃO DE VOLUME CALCULADA PELO VoF E c) INTERPOLAÇÃO LINEAR DA SUPERFÍCIE	70

FIGURA 2.21 – VISÃO GERAL DA ESTRUTURA DO OpenFOAM	71
FIGURA 2.22 – ELEMENTOS DE MALHAS ESTRUTURADAS E NÃO ESTRUTURADAS, 2D E 3D	72
FIGURA 2.23 – ESQUEMA DAS CONDIÇÕES AVALIADAS COM O <code>checkMesh</code> .	73
FIGURA 2.24 – CONDIÇÕES DE CONTORNO NO OpenFOAM	74
FIGURA 2.25 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO <code>snappyHexMesh</code>	76
FIGURA 3.1 – DIMENSÕES GERAIS DO VERTEDOIRO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA (PERFIL E PLANTA)	82
FIGURA 3.2 – DIMENSÕES GERAIS DAS TORRES VERTICAIS (ENTRADA DE AR NO SISTEMA DE AERAÇÃO) DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA	83
FIGURA 3.3 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE UMA SIMULAÇÃO	84
FIGURA 3.4 – DOMÍNIO ESTUDADO - ARQUIVO <code>.STL</code>	85
FIGURA 3.5 – DESENHO <code>.STL</code> DO VERTEDOIRO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA	86
FIGURA 3.6 – DOMÍNIO ESTUDADO - OpenFOAM	87
FIGURA 3.7 – MALHA COMPUTACIONAL - REFINAMENTO MÁXIMO 12.5 cm (ESCALA DE PROTÓTIPO)	89
FIGURA 3.8 – MALHA COMPUTACIONAL - REFINAMENTO MÁXIMO 6.25 cm (ESCALA DE PROTÓTIPO)	90
FIGURA 3.9 – MALHA COMPUTACIONAL - DETALHES DA REGIÃO INFERIOR DO TÚNEL DE AERAÇÃO E DO DEGRAU DA CALHA DO VERTEDOIRO	91
FIGURA 3.10 – DEFINIÇÃO DO MODELO DE TURBULÊNCIA NO OpenFOAM	92
FIGURA 3.11 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DAS SIMULAÇÕES	92
FIGURA 3.12 – ESQUEMA PARA DETERMINAR O COMPRIMENTO DO JATO DE ÁGUA	96
FIGURA 4.1 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 12,5 cm - RANS	98
FIGURA 4.2 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	98
FIGURA 4.3 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA	99
FIGURA 4.4 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA	99
FIGURA 4.5 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE	100

FIGURA 4.6 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE	100
FIGURA 4.7 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL / JUSANTE	101
FIGURA 4.8 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - RANS - 12,5 cm	101
FIGURA 4.9 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	102
FIGURA 4.10 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 6,25 cm - RANS	103
FIGURA 4.11 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	103
FIGURA 4.12 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA	104
FIGURA 4.13 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA	104
FIGURA 4.14 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE	105
FIGURA 4.15 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE	105
FIGURA 4.16 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL / JUSANTE	106
FIGURA 4.17 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - RANS - 6,25 cm	106
FIGURA 4.18 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	107
FIGURA 4.19 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 12,5 cm - DES	109
FIGURA 4.20 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	109

FIGURA 4.21 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA .	110
FIGURA 4.22 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA	110
FIGURA 4.23 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE	111
FIGURA 4.24 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE	111
FIGURA 4.25 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL / JUSANTE	112
FIGURA 4.26 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 12,5 cm	112
FIGURA 4.27 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	113
FIGURA 4.28 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 6.25 cm - DES	114
FIGURA 4.29 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	115
FIGURA 4.30 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA .	115
FIGURA 4.31 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA	116
FIGURA 4.32 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE	116
FIGURA 4.33 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE	117
FIGURA 4.34 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE	117
FIGURA 4.35 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 6.25 cm	118
FIGURA 4.36 – LINHA PIEZOMÉTRICA A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 6.25 cm	118

FIGURA 4.37 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE	119
FIGURA 4.38 – MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR - CORTE TRANSVERSAL NA REGIÃO DO SISTEMA DE AERAÇÃO	119
FIGURA 4.39 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 6.25 cm - DES - MODELO 1:30	121
FIGURA 4.40 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE - MODELO 1:30	122
FIGURA 4.41 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA - MODELO 1:30	122
FIGURA 4.42 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA - MODELO 1:30	123
FIGURA 4.43 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA / JUSANTE - MODELO 1:30	123
FIGURA 4.44 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE - VALORES DE MODELO 1:30	124
FIGURA 4.45 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE - VALORES DE MODELO 1:30	124
FIGURA 4.46 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 4.2 mm - VALORES DE MODELO 1:30	125
FIGURA 4.47 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE - VALORES DE MODELO 1:30	125
FIGURA 4.48 – CROQUI DA POSIÇÃO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE AR ABAIXO DO JATO DE ÁGUA	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – LIMITAÇÕES PARA EVITAR EFEITOS DE ESCALA SIGNIFICATIVOS EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS (AR-ÁGUA) SOB A SEMELHANÇA DE FROUDE	47
TABELA 2.2 – COEFICIENTES DO MODELO <i>STANDARD</i> $k - \varepsilon$	59
TABELA 2.3 – COEFICIENTES DO MODELO $k - \omega$ SST	61
TABELA 2.4 – COEFICIENTES DO MODELO RSM	63
TABELA 2.5 – CONSTANTES E TERMOS DE FECHAMENTO NA SIMULAÇÃO DES	64
TABELA 2.6 – CONSTANTES E TERMOS DE FECHAMENTO NA SIMULAÇÃO DDES	65
TABELA 2.7 – RESUMO DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA	66
TABELA 3.1 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO OpenFOAM	93
TABELA 4.1 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE SIMULAÇÃO RANS	108
TABELA 4.2 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DES	120
TABELA 4.3 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DADOS DE PROTÓTIPO CONSIDERANDO MEIO VÃO DA CALHA DO VERTEDOURO	126
TABELA 4.4 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS E RESULTADOS DE MODELO FÍSICO CONSIDERANDO MEIO VÃO DA CALHA DO VERTEDOURO	126
TABELA 4.5 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DADOS DE PROTÓTIPO - VELOCIDADE DO AR ABAIXO DO JATO DE ÁGUA	128

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da seção transversal do orifício de controle (m ²)
A_a	área atravessada pelo ar no sistema de aeração (m ²)
A_s	constante (adm.)
A_w	área atravessada pela água no início do salto sobre o aerador (m ²)
A_0	constante (adm.)
B	largura do canal (m)
c	coeficiente de descarga do duto de ar relacionado à diferença entre a pressão atmosférica e a pressão sob o jato de água (adm.)
C	concentração de ar (%); constante de proporcionalidade (adm.)
C_1	coeficiente que depende da geometria do aerador e varia de 0,02 a 0,10; constante (adm.)
C_2	coeficiente que depende da geometria do vertedouro e varia de 0 a 5; constante (adm.)
C_μ	constante (adm.)
$C_{\varepsilon 1}$	constante (adm.)
$C_{1\varepsilon}$	constante (adm.)
$C_{\varepsilon 2}$	constante (adm.)
C_{DES}	constante relacionada as condições de contorno do modelo DES (adm.)
C_{DES}^{SA}	constante (adm.)
$C_{DES}^{k-\omega}$	constante (adm.)
$C_{DES}^{k-\varepsilon}$	constante (adm.)
C_{b1}	constante (adm.)
C_{b2}	constante (adm.)
C_{w1}	constante (adm.)

C_s	coeficiente de rugosidade (adm.)
Co	número de Courant (adm.)
d	altura do degrau (m)
d_{ab}	diâmetro da bolha de ar (m)
\tilde{d}	comprimento da escala (m)
e_{ijk}	símbolo alternado semelhante ao delta de Kronecker
Eu	número de Euler do escoamento (adm.)
$F_{i,k}$	força de interação com outras fases
Fr	número de Froude do escoamento (adm.)
Fr_{cr}	número de Froude crítico quando $\beta = 0$ (adm.)
$F_{i,Drag}$	força de arraste
$F_{i,Press}$	força de pressão
$F_{i,Virt}$	força de massa virtual devido à aceleração do fluido ao redor
$F_{i,History}$	força de história ou de Basset relacionada às mudanças nas condições de contorno
$F_{i,Bouy}$	força devido à gravidade
$F_{i,Lift}$	força de sustentação de Saffman e Magnus
$F_{i,Therm}$	força termoforese (<i>thermophoretic</i>)
$F_{i,Turb}$	força devido às flutuações turbulentas
$F_{i,Brown}$	força Browniana devido às colisões moleculares
f_d	função “delay”
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
h	altura do escoamento (m); distância vertical entre o ponto considerado e a origem do sistema de coordenadas (m)
k	dimensões físicas fundamentais independentes; energia cinética turbulenta por unidade de massa; representa uma fase qualquer
K	constante (adm.)

K_s	rugosidade (m)
l	comprimento de escala turbulenta (m)
L	dimensão característica; comprimento do jato de água (m)
L_{DES}	comprimento de escala LES (m)
L_{RANS}	comprimento de escala RANS (m)
$L_{RANS}^{k-\omega}$	constante (adm.)
Mo	número de Morton (adm.)
\dot{m}_{kl}	transporte de massa da fase k para l
m_d	massa da partícula (kg)
n	variáveis físicas dimensionais
Na	fator de efeito de escala (adm.)
p	variáveis adimensionais; pressão sob a face do elemento (N/m ²); número de fases
\bar{p}	componente da pressão média (N/m ²)
p_{atm}	pressão atmosférica (N/m ²)
q_ϕ	termo fonte de ϕ
q_a	vazão específica de ar (m ³ /s/m)
Q_a	vazão de ar (m ³ /s)
Q_{a_m}	vazão de ar no modelo físico (m ³ /s)
Q_{a_p}	vazão de ar no protótipo (m ³ /s)
q_w	vazão específica de água (m ³ /s/m)
Q	vazão de água (m ³ /s)
Q_w	vazão de água (m ³ /s)
$Q_{w.inlet}$	vazão de água de entrada no domínio computacional (m ³ /s)
$Q_{w.outlet}$	vazão de água de saída no domínio computacional (m ³ /s)
Re	número de Reynolds do escoamento (adm.)

Re_m	número de Reynolds do escoamento no modelo (adm.)
Re_p	número de Reynolds do escoamento no protótipo (adm.)
Re_t	número mínimo de Reynolds para escoamento plenamente turbulento (adm.)
s'_{ij}	taxa de deformação flutuante
S	escala do modelo (adm.)
S_{ij}	tensor taxa de deformação
t	altura da rampa (m); tempo (s)
u	componente da velocidade (m/s)
\bar{u}	componente da velocidade média (m/s)
u'	flutuação turbulenta de velocidade na direção x (m/s)
\mathbf{u}_r	vetor de velocidade relativa, também chamado de velocidade de compressão (m/s)
\mathbf{u}_l	vetor velocidade da fase líquida (m/s)
\mathbf{u}_g	vetor velocidade da fase gasosa (m/s)
$U_{i,d}$	velocidade linear da partícula (m/s)
U_{ar}	velocidade média do ar (m/s)
V	velocidade (m/s)
v'	flutuação turbulenta de velocidade na direção y (m/s)
We	número de Weber do escoamento (adm.)
We_m	número de Weber do escoamento no modelo (adm.)
We_p	número de Weber do escoamento no protótipo (adm.)
w'	flutuação turbulenta de velocidade na direção z (m/s)
x	direção
y^+	distância adimensional da parede (adm.)
α	ângulo entre o fundo do canal e a horizontal (rad)
α_k	fração de volume de uma fase k qualquer

β	parâmetro de arrastamento de ar; constante (adm.)
β_{max}	parâmetro máximo de arrastamento de ar (adm.)
β^*	constante (adm.)
δ	delta de Kronecker
Δp	diferença de pressão, carga hidráulica ou perda de carga (N/m ²)
$\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$	comprimento nas dimensões celulares aos respectivos eixos (m)
L_{LES}	maior comprimento em uma das direções da célula (m)
ϵ	coeficiente igual a 0,35 (adm.)
γ_{ar}	peso específico do ar (N/m ³)
ϵ	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
θ	ângulo da rampa com o fundo do canal (rad)
ϑ	escala da velocidade do escoamento (adm.)
κ	constante (adm.)
λ	relação de escala geométrica (adm.)
μ	viscosidade dinâmica (N·s/m ²)
μ_a	viscosidade dinâmica do ar (N·s/m ²)
μ_t	viscosidade dinâmica turbulenta (N·s/m ²)
μ_w	viscosidade dinâmica da água (N·s/m ²)
ν	viscosidade cinemática (m ² /s)
ν_t	viscosidade cinemática turbulenta (m ² /s)
$\tilde{\nu}$	viscosidade turbulenta modificada (m ² /s)
ρ	densidade do fluido (kg/m ³)
ρ_a	densidade do ar (kg/m ³)
ρ_w	densidade da água (kg/m ³)
σ	tensão superficial (N/m)
σ_{nut}	constante (adm.)

σ_k	constante (adm.)
σ_ε	constante (adm.)
σ_ω	constante (adm.)
σ_{ω^2}	constante (adm.)
σ_{ν_t}	constante (adm.)
τ	tensor cisalhante sob a face do elemento (N/m ²)
$\bar{\tau}_{ij}$	componentes viscosos do tensor de tensão
ϕ	grandeza escalar
ϕ'	parcela da variável instantânea
$\bar{\phi}$	parcela da variável (propriedade) média
ω	dissipação específica
ω_1	coeficiente de ajuste de proporcionalidade ente β e a expressão global (adm.)
ω_2	coeficiente que exprime a importância da perda de energia na tubulação de adução de ar (adm.)
ω_3	coeficiente que exprime a importância relativa das forças nas direções x e y no movimento do jato (adm.)
ω_k	velocidade angular (m/s); vetor rotativo
Γ	coeficiente de difusividade da propriedade ϕ
Γ_t	difusividade turbulenta
$\bar{\Omega}_{ij}$	taxa média do tensor de rotação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 OBJETIVOS	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1 AERAÇÃO	24
2.1.1 Aeradores de Fundo	26
2.1.2 Mecanismo de Aeração em Aeradores de Fundo	29
2.1.3 Equações de Quantidade de Entrada de Ar em Aeradores de Fundo	33
2.2 ESCALA GEOMÉTRICA	36
2.3 CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA	38
2.3.1 Análise Dimensional de Fluxos Aerados	40
2.4 EFEITOS DE ESCALA	43
2.5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	49
2.5.1 Equações Governantes	50
2.5.2 Modelos de Turbulência	52
2.5.2.1 <i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i> – RANS	56
2.5.2.2 <i>Detached-Eddy Simulation</i> – DES	63
2.5.3 Simulação Computacional de escoamentos Multifásicos	67
2.5.3.1 Tipos de Modelos Computacionais Multifásicos	67
2.5.4 OpenFOAM	70
2.5.4.1 Pré-Processamento	72
2.5.4.2 Processamento	76
2.5.4.3 Pós-Processamento	79
3 MATERIAIS E MÉTODOS	81
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA	81
3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	83
3.2.1 Definição da Geometria do Problema	84
3.2.2 Geração da Malha Computacional	86
3.2.3 Definição dos Modelos de Simulação e de Turbulência do escoamento	91
3.2.4 Definição das Condições de Contorno e Iniciais	91
3.2.5 Definição do Método de Solução	94
3.2.6 Execução do Cálculo Numérico	94
3.2.7 Análise dos Resultados	95
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	97

4.1 ESCALA DE PROTÓTIPO - RANS	97
4.1.1 Refinamento Máximo da Malha de 12,5 cm	97
4.1.2 Refinamento Máximo da Malha de 6,25 cm	102
4.2 ESCALA DE PROTÓTIPO - DES	108
4.2.1 Refinamento Máximo da Malha de 12,5 cm	108
4.2.2 Refinamento Máximo da Malha de 6,25 cm	113
4.3 ESCALA GEOMÉTRICA 1:30 - DES	120
4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS COM DADOS DE PROTÓTIPO E DE MODELO FÍSICO	126
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
REFERÊNCIAS	133

1 INTRODUÇÃO

Vertedouro é a estrutura hidráulica responsável por extravasar a vazão excedente de um reservatório de água e é de suma importância para a segurança de barragens. Em vertedouros, os escoamentos de altas velocidades atrelados a baixas pressões podem produzir problemas de cavitação no fundo da calha e, conseqüentemente, resultar em danos ao concreto e comprometer a segurança e estabilidade da estrutura.

Para evitar a cavitação na calha do vertedouro, pode-se considerar a construção de um dispositivo de aeração, o qual consiste em dois componentes principais: uma estrutura de fundo com uma descontinuidade de superfície, cujo objetivo é incorporar ar ao fluxo de água, e um sistema de auto suprimento de ar para permitir uma incorporação contínua. Economicamente, a implantação de aeradores de fundo se mostra viável, visto que outras soluções, como o uso de técnicas de tratamento superficial do concreto, elevam o custo significativamente e podem não ser tão eficientes.

Estudos em modelos físicos reduzidos sobre a aeração na calha de vertedouro foram desenvolvidos desde a década de 1980 (PINTO; NEIDERT; OTA, 1982a; PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b; PINTO; NEIDERT, 1983; PINTO, 1991; LIMA, 2003; LIMA; SCHULZ; GULLIVER, 2008; ARANTES et al., 2010). Esses estudos envolvem principalmente os seguintes objetivos: *a)* a caracterização do escoamento na região de aeração induzida; *b)* a quantificação de incorporação de ar no fluxo; *c)* a configuração da geometria de aeradores de fundo com efeito de otimizar e aumentar a eficiência de aeração.

Os modelos reduzidos comumente são conduzidos por meio da semelhança de Froude em que a aceleração da gravidade é o parâmetro de maior importância. Entretanto, as semelhanças de Reynolds (forças de natureza viscosa) e de Weber (forças de tensão superficial) também podem ser relevantes em estudos de aeração. Desse modo, a modelagem ideal dos fluxos aerados deveria consistir em uma semelhança dinâmica completa, o que é fisicamente inviável. Isso faz com que o fenômeno de aeração em escala reduzida gere um efeito de escala, conforme observado nos estudos de Pinto, Neidert e Ota (1982a), Pinto, Neidert e Ota (1982b), Pinto e Neidert (1983) e Pinto (1991).

Para minimizar os problemas relacionados aos efeitos de escala no processo de aeração do escoamento, pesquisadores sugerem limitações quanto aos números de Reynolds e de Weber sob o critério de semelhança de Froude – (KOBUS, 1984; PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b; PFISTER; CHANSON, 2012). Além disso, também sugerem

utilizar modelos reduzidos de grande escala, tais como 1:3, 1:5, 1:10 e 1:15 (BOLLER, 2006; HELLER, 2011; TERRIER, 2016; AYDIN; ISIK; ULU, 2019).

Devido às diversas limitações observadas para estudar o processo de aeração em modelos físicos, estudos recomendam a utilização de modelos computacionais para tal finalidade – (AYDIN; OZTURK, 2009; TORRES et al., 2018; TASSINARI et al., 2018; AYDIN; ULU; KARADUMAN, 2019; YANG; TENG; ZHANG, 2019; AYDIN; ISIK; ULU, 2019) – uma ferramenta que seria capaz de reproduzir numericamente os fenômenos de aeração de escoamentos em diversos domínios. Os modelos computacionais neste contexto referem-se ao uso da dinâmica dos fluidos computacional ou CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamic*).

Em sendo assim, apresentam-se os objetivos desta dissertação.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho consistiu no estudo do processo de aeração em escoamentos de altas velocidades com o uso da dinâmica dos fluidos computacional. Para tanto, foram utilizados como base o projeto hidráulico e dados medidos durante a operação da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia, além de resultados de modelo físico dessa obra. Essas informações foram empregadas para a validação do modelo computacional, com dimensões de modelo e protótipo. Nesse contexto, elencam-se os Objetivos Gerais e Específicos desta dissertação de mestrado:

Objetivo Geral

Verificar a representatividade do processo de aeração em escoamentos de altas velocidades com o uso da dinâmica dos fluidos computacional aplicada a uma estrutura real.

Objetivos Específicos

- Realizar a simulação do modelo computacional em escala de protótipo da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia e avaliar os processos de aeração na calha do vertedouro mediante comparação com dados de protótipo disponíveis na literatura;
- Aplicar o modelo computacional da UHE de Foz do Areia em escala de modelo físico e verificar os resultados de vazão de ar na torre de aeração comparando com dados de modelo físico disponíveis na literatura;
- Identificar eventuais problemas na modelagem matemática e contribuir na solução desses inconvenientes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta o levantamento bibliográfico e o estado da arte com respeito ao processo de aeração em escoamentos de altas velocidades, introduzindo inicialmente os conceitos básicos de aeração em aeradores de fundo onde estão apresentados sua definição, seu processo de aeração e equações para descrever a quantidade de entrada de ar. Na sequência, serão abordados conceitos de escala geométrica, critérios de semelhança e efeitos de escala. Posteriormente, o trabalho apresenta conceitos sobre dinâmica dos fluidos computacional, simulação de escoamentos multifásicos e o *software* OpenFOAM (programa utilizado para as modelagens computacionais).

2.1 AERAÇÃO

O estudo dos escoamentos aerados abrange uma ampla gama de situações de fluxo. Mesmo a restrição ao fluxo aerado de superfície livre deixa, ainda, uma ampla gama de situações, todas bastante complexas. Por essa razão, este estudo é restrito a escoamentos aerados de altas velocidades de superfície livre.

O termo alta velocidade significa que a magnitude da velocidade (V) do escoamento aerado é muito maior que a componente de velocidade de subida da bolha. Normalmente, a velocidade de subida de uma bolha isolada em água parada é inferior a 30 cm/s, considerando bolhas com diâmetros menores que 30 mm (CHANSON, 1993; CHANSON, 2006). Ou seja, um fluxo de alta velocidade significa que $V \gg 0,3$ m/s.

Fluxos aerados de altas velocidades são sempre turbulentos, caracterizados por um comportamento aleatório e de forte potencial de mistura, onde a difusão advectiva das bolhas de ar é o fenômeno dominante (CHANSON, 2006). Em vertedouros uma grande quantidade de ar pode ser arrastada por meio da superfície livre para a água em escoamentos de altas velocidades (WEI et al., 2016).

Quanto mais alta a velocidade de água, mais crítico se torna o problema de cavitação. Para velocidades em torno de 40 m/s ou mais, o campo de pressão é particularmente sensível. Para essa faixa de velocidade, um aumento local de 5 a 10% é suficiente para causar reduções de pressão correspondentes a cerca de 10 m de coluna de água (PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b).

Falvey (1990) menciona que a tolerância à cavitação torna-se crítica quando as velocidades do fluxo estão acima de 30 m/s.

Em estruturas hidráulicas, a entrada de ar no fluxo pode ocorrer naturalmente

ou artificialmente (CHANSON, 1995). A aeração natural de superfície livre inclui, por exemplo, a auto-aeração de escoamentos de altas velocidades em canais abertos ou vertedouros. Os fluxos auto-aerados de altas velocidades são frequentemente descritos como “águas brancas” por causa do ar arrastado (CHANSON, 2016).

O processo de aeração é descrito em diversos estudos presentes na literatura. Como referência podemos citar Brito (2011), onde descreve que a incorporação natural de ar se inicia quando a camada limite turbulenta aflora na superfície livre da água. Segundo Chanson (2016), a entrada de ar no escoamento é causada pela turbulência que atua na interface água-ar. Por meio dessa interface, o ar é continuamente aprisionado e liberado, e a mistura de água e ar pode se estender por toda a coluna de água. Em Chanson (2006), é citado que a aeração por superfície livre ocorre quando o nível de turbulência é grande o suficiente para superar os efeitos de tensão superficial e empuxo. Para complementar, Ervine e Falvey (1987) comentam que a energia turbulenta próxima à superfície livre de um fluxo supera a tensão superficial e impulsiona uma gota de água para a atmosfera. A gota, por sua vez, trará uma bolha de ar no impacto com a superfície livre do fluxo.

Na Figura 2.1 é apresentada a auto-aeração em vertedouros. Como mencionado por Brito (2011), observa-se que o início da aeração se dá quando a camada limite atinge a superfície livre da água. Além disso, a figura contém mais detalhes das características do fluxo aerado.

Com o aumento da vazão unitária, conseqüentemente com o aumento da profundidade da água, a turbulência gerada junto ao fundo necessita de maior extensão ao longo do escoamento para enfim aflorar na superfície. Da mesma forma, a aeração iniciada na superfície de água necessita de maior extensão para atingir o contorno sólido no fundo. Percebe-se que, no caso de grandes vertedouros, com altas velocidades associadas a grandes vazões específicas, a aeração natural dificilmente atingirá a superfície do vertedouro ao longo de toda a sua extensão e, quando viesse a atingi-la, em vertedouros longos, os danos por cavitação já teriam ocorrido em algum trecho a montante (BRITO, 2011).

Por essa razão, a fim de evitar danos por cavitação ao longo de grandes vertedouros, a aeração artificial é uma solução viável para proteger estruturas hidráulicas quando as altas velocidades e, portanto, as baixas pressões, não podem ser evitadas. Como mencionado por Ervine e Falvey (1987), a aeração nesse caso ocorre tanto na superfície do fluxo quanto na região inferior onde está localizado o aerador.

Para que a aeração artificial em vertedouros ocorra, são utilizadas estruturas como defletores, rampas e ranhuras ao longo da calha. Na sequência, serão apresentados os tipos, o mecanismo de aeração e as equações que representam a quantidade de entrada de ar nos aeradores de fundo.

FIGURA 2.1 – AUTO-AERAÇÃO NO VERTEDOURO



FONTE: Adaptado de Chanson (1993)

2.1.1 Aeradores de Fundo

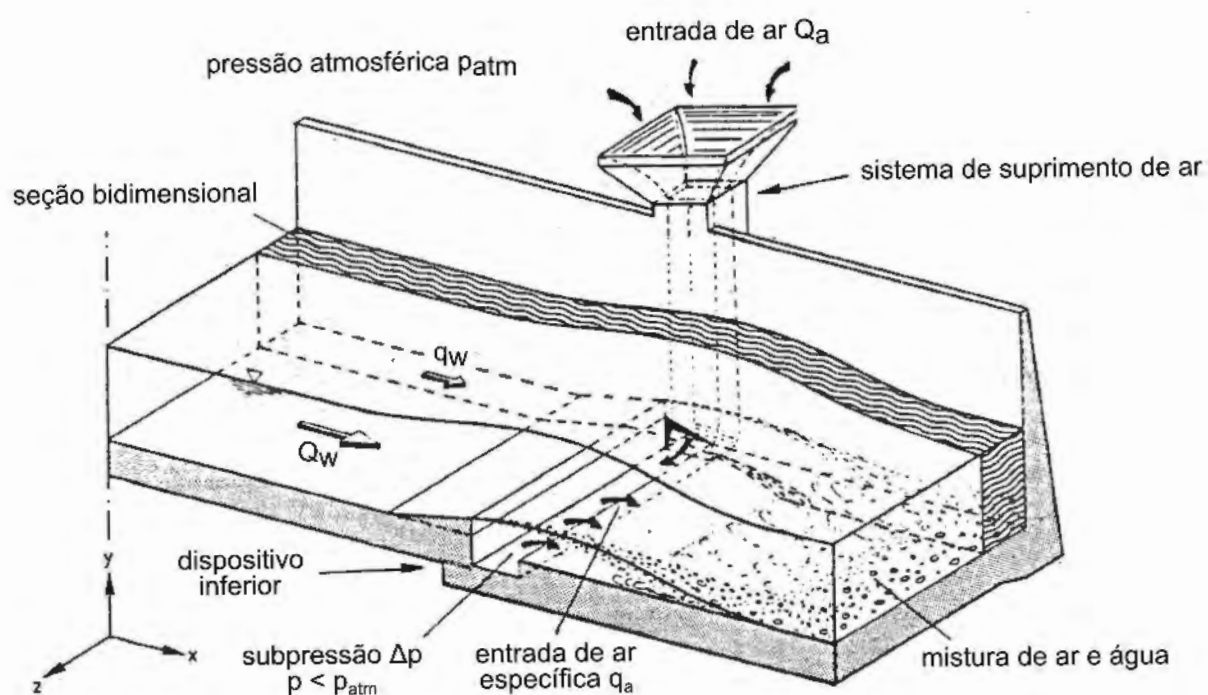
Um dispositivo de aeração de vertedouro consiste em dois componentes principais (conforme observado na Figura 2.2): um sistema de suprimento de ar e um dispositivo de fundo com uma descontinuidade de superfície cujo o ar é arrastado pelo fluxo de água (KOSCHITZKY; KOBUS, 1988).

As estruturas mais simples e práticas usadas a fim de causar aeração natural no fluxo de água em superfícies da calha do vertedouro são defletores ou degraus, conforme observado na Figura 2.3 (a, b). Pinto, Neidert e Ota (1982b) comentam que a brusca descontinuidade no alinhamento inferior da calha cria uma interface ar-água fazendo com que o fluxo de alta velocidade arraste o ar em um intenso processo de mistura.

Para melhorar as condições de entrada de ar no fluxo na região inferior do jato de água e para melhorar a eficiência do aerador, uma galeria transversal pode ser adicionada, ver Figura 2.3 (c, d). Ainda, uma combinação desses vários sistemas é possível, Figura 2.3 (e, f).

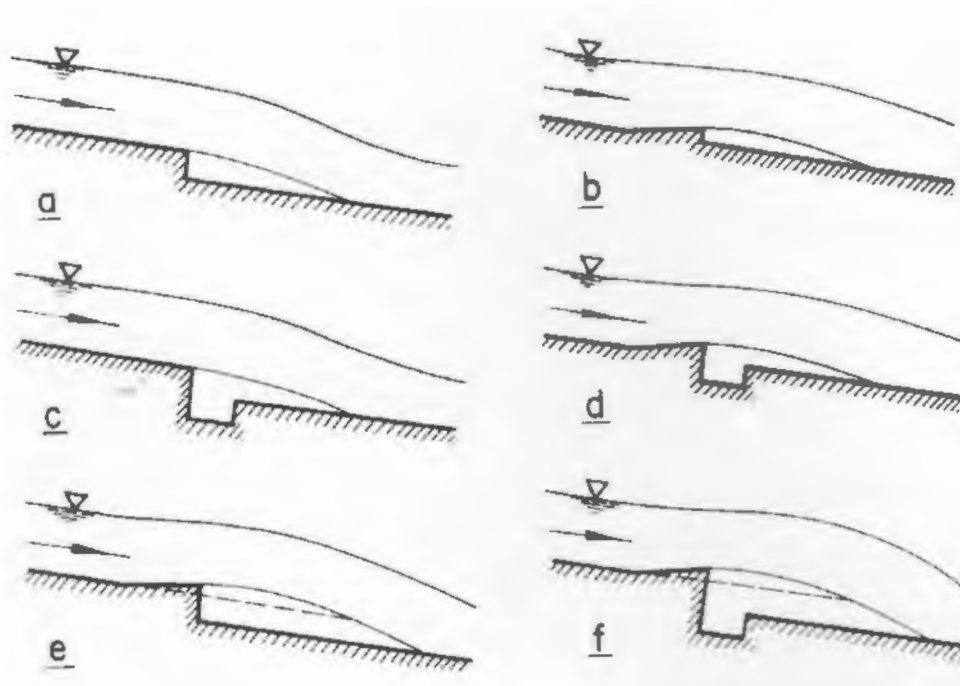
Geralmente, uma combinação dos três tipos (Figura 2.3f) fornece o melhor projeto: a rampa domina a operação em pequenas vazões, enquanto o degrau fornece espaço para o suprimento de ar e o deslocamento aumenta a trajetória do jato em vazões maiores (CHANSON, 1988).

FIGURA 2.2 – ESBOÇO DE UM AERADOR TÍPICO DE VERTEDOURO



FONTE: Adaptado de Koschitzky e Kobus (1988)

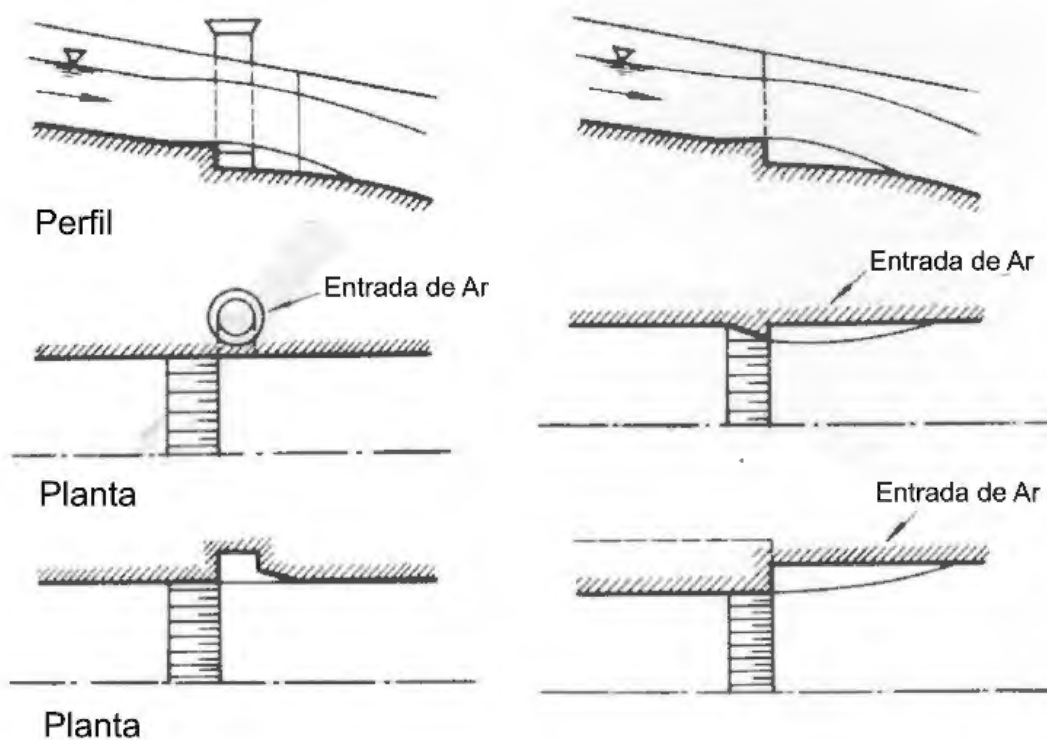
FIGURA 2.3 – PRINCIPAIS TIPOS DE SISTEMA DE AERAÇÃO



FONTE: Pinto, Neidert e Ota (1982b)

Outras soluções para a admissão de ar no escoamento são apresentadas na Figura 2.4, observam-se dutos, ranhuras e defletores nas paredes da calha do vertedouro.

FIGURA 2.4 – PRINCIPAIS SOLUÇÕES PARA ADMISSÃO DE AR



FONTE: Adaptado de Pinto, Neidert e Ota (1982b)

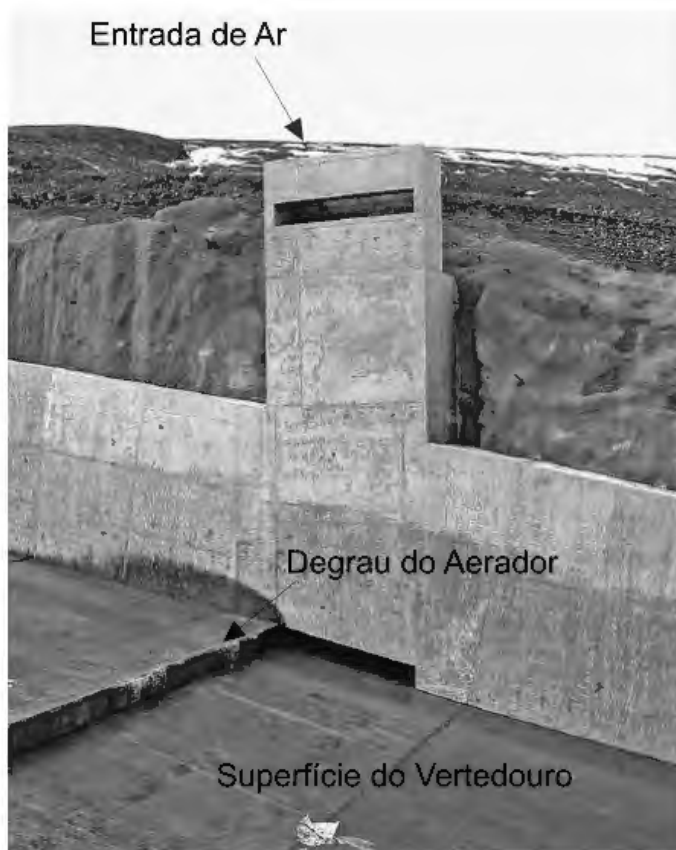
De acordo com Kökpınar e Göğüş (2002), o projeto e o desempenho de um sistema de aeração requer que sejam avaliados os seguintes aspectos: (i) determinação das condições do fluxo na calha, principalmente velocidades e pressões, com os quais será possível prever a tendência de danos por cavitação; (ii) estimativa da quantidade de ar necessária para evitar danos por cavitação; e (iii) geometria e localização do aerador.

Os aeradores devem atender a duas finalidades. A primeira, produzir uma subpressão local, de modo que o ar seja succionado em direção à água e a segunda, fornecer a quantidade de ar necessária ao longo de todo o escoamento, de modo a evitar a ocorrência de danos por cavitação (BRITO, 2011).

Conforme comentado por Volkart e Rutschmann (1984), qualquer dispositivo de aeração deve atender as seguintes condições: reter grandes quantidades de ar, especialmente para que a concentração de ar seja alta nas superfícies mais ameaçadas a efeitos de cavitação; e ter um projeto simples e econômico.

A Figura 2.5 apresenta uma aplicação prática de um sistema de aeração na calha do vertedouro de Kárahnjúkar, Islândia.

FIGURA 2.5 – APLICAÇÃO PRÁTICA DE UM AERADOR DA CALHA DO VERTEDOURO DE KÁRAHNJÚKAR, ISLÂNDIA



FONTE: Adaptado de Pfister (2011)

2.1.2 Mecanismo de Aeração em Aeradores de Fundo

O arrasto inicial do ar é caracterizado pela tensão tangencial entre a água e o ar na interface logo abaixo do ponto de separação no degrau ou rampa. A turbulência do fluxo é responsável pela rugosidade da superfície do líquido que tende a aumentar ao longo do jato, o que intensifica o arrasto (PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b). No que diz respeito à influência da intensidade da turbulência do fluxo, um aumento acentuado da rugosidade da superfície na rampa do aerador resulta em um aumento correspondente da incorporação de ar em 20% a 30% (KOSCHITZKY; KOBUS, 1988).

Uma vez superados os efeitos de tensão superficial, a interface ar e água se transforma em um jato pulverizado que possui uma eficiência maior como mecanismo de retenção de ar no fluxo (VOLKART; RUTSCHMANN, 1984). De acordo com Pinto, Neidert e Ota (1982b), nas estruturas de protótipo o efeito da pulverização é o mecanismo preponderante da incorporação de ar.

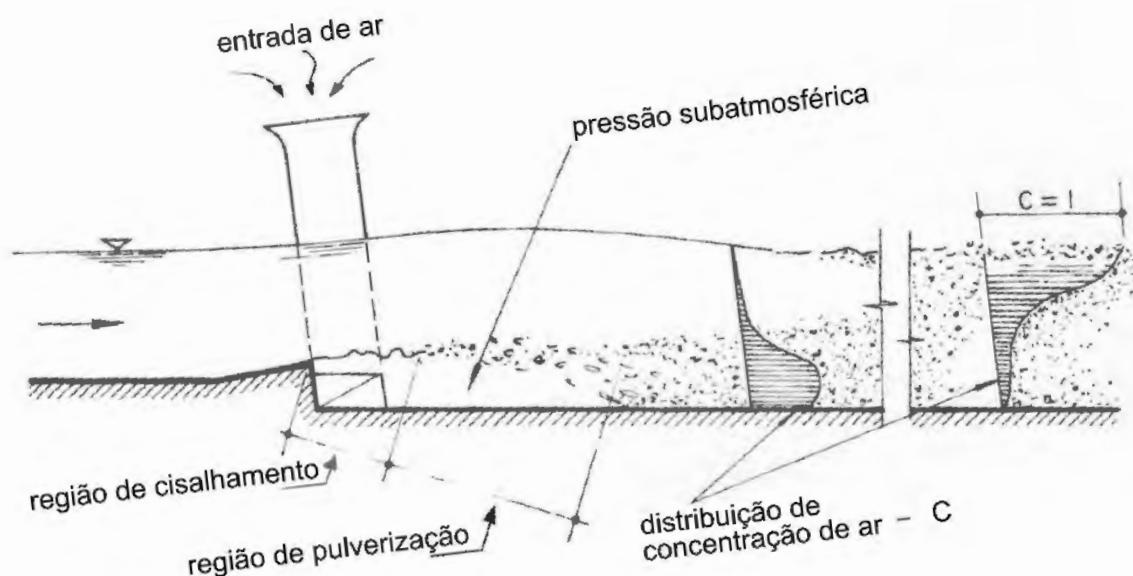
Após o fluxo passar pelo sistema de aeração e o jato de água atingir novamente o fundo do canal, um volume de ar será movido a jusante como uma mistura aerada. As bolhas de ar tendem a subir, enquanto a turbulência tende a manter a mistura dentro

da camada limite turbulenta (PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b). Wood (1985) cita que à medida que o fluxo passa pela rampa, a distribuição de pressão muda drasticamente e não há mais tensão de cisalhamento na linha de corrente inferior. Na região de impacto, segundo Chanson (1989), o fluxo é altamente turbulento e ocorre uma alta perda de energia.

Koschitzky e Kobus (1988) comentam que a incorporação de ar no fluxo ocorre por vórtices na interface ar e água que resultam na queda repentina de pressão na borda da rampa, na mudança da distribuição de velocidade, nas flutuações turbulentas do fluxo de aproximação e na perturbação da pressão a montante, devido à geometria da rampa. Além disso, de acordo com os autores, a incorporação de ar está relacionada com o comprimento da interface ar e água na região inferior do jato e que para uma dada geometria do aerador a incorporação de ar pode ser expressa pelo número de Froude do fluxo.

A Figura 2.6 apresenta os principais aspectos do mecanismo de arrasto de ar e do processo de mistura. Observa-se que a concentração de ar máxima ocorre imediatamente a jusante do ponto de impacto do jato e diminui, gradualmente, até atingir uma condição de equilíbrio, conforme comentado por Volkart e Rutschmann (1984) e Wood (1985).

FIGURA 2.6 – MECANISMO DE AERAÇÃO



FONTE: Adaptado de Pinto, Neidert e Ota (1982b)

A continuidade do processo de aeração requer um suprimento contínuo de ar para o espaço criado sob o jato. Nessa região, as pressões sempre serão subatmosféricas devido à velocidade do fluxo de ar e às perdas de carga através dos dutos de aeração. A diferença de pressão fará com que uma deflexão da trajetória do jato de água em relação a parábola normal de queda livre seja refletida no comprimento

do jato, certamente um parâmetro importante no que diz respeito à quantidade de ar arrastado (PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b).

Volkart e Rutschmann (1984) apresentam o mecanismo de aeração na calha de vertedouros com base na Figura 2.7. De acordo com os autores, o objetivo dos dispositivos de aeração de fundo é produzir uma queda de pressão local para que o ar seja aspirado para o fluxo. As principais regiões do mecanismo de aeração são:

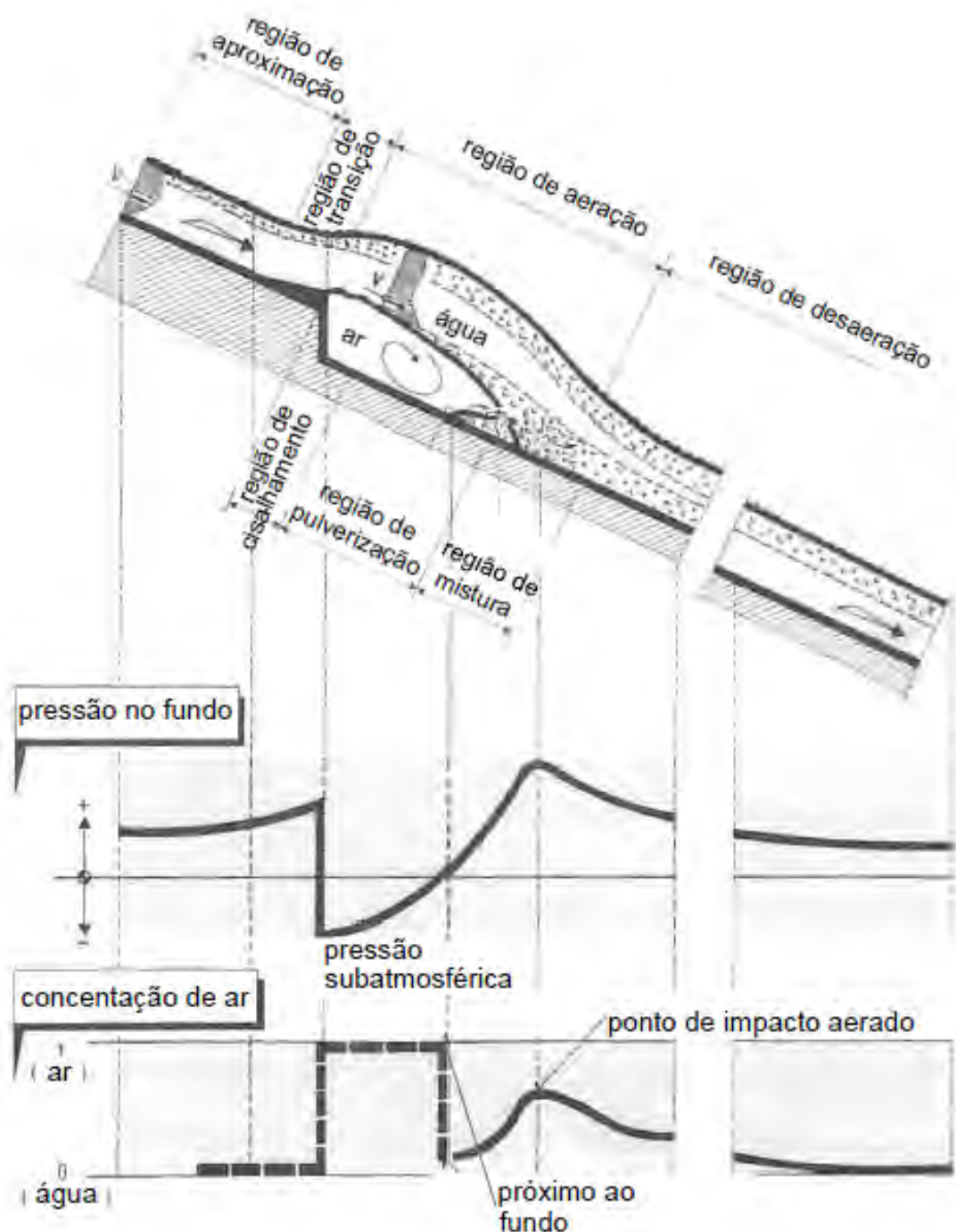
- região de aproximação: o fluxo é caracterizado pelos perfis de velocidade usuais e por uma camada superficial que pode conter bolhas de ar arrastadas pela auto-aeração na superfície livre;
- região de transição: definida pelo comprimento da rampa e pelo aumento de pressão acima da pressão hidrostática;
- região de aeração: dividida em região de cisalhamento, de pulverização e de mistura;
 - região de cisalhamento: nessa região não há mais tensão de cisalhamento atuando nas linhas de corrente inferiores e o fluido é acelerado. Esse fato faz com que as instabilidades se desenvolvam na superfície da água. O comprimento dessa região depende da geometria e da rugosidade da rampa;
 - região de pulverização: a água na interface água e ar se transforma em *spray* quando a tensão superficial é superada. Essa região possui alta eficiência na retenção de ar e possui pressões subatmosféricas devido à velocidade do fluxo de ar;
 - região de mistura: localizada onde o jato atinge novamente o fundo do canal (região de impacto). Ângulos relativamente íngremes entre o jato pulverizado e o fundo do canal fazem com que uma quantidade de ar adicional seja incorporada ao fluxo. Nessa região a concentração de ar e a pressão do fundo do canal são máximas;
- região de desaeração: localizada logo após a região de mistura, pois a partir desse ponto, a concentração de ar começa a diminuir à medida que as bolhas de ar sobem.

A Figura 2.7 também contém a representação esquemática de pressão e concentração de ar junto ao fundo da calha na vizinhança do aerador.

O estudo de entrada de ar no aerador de vertedouro é complexo devido à interação entre os diferentes processos de entrada de ar. Diversos estudos sobre este tema foram desenvolvidos e encontram-se disponíveis na literatura, tais como: Pinto, Neidert e Ota (1982a), Pinto, Neidert e Ota (1982b), Vischer, Volkart e Sigenthaler

(1982), Pinto e Neidert (1983), Volkart e Rutschmann (1984), Wood (1985), Chanson (1988), Koschitzky e Kobus (1988), Chanson (1989), Rutschmann e Hager (1990), Chanson (1992), Chanson (1993), Kökpinar e Göğüş (2002), Kramer, Hager e Minor (2006), Aydin e Ozturk (2009), Pfister e Hager (2010a), Brito (2011), Schulz e Brito (2011), Pfister (2011), Fuhrhop, Schulz e Wittenberg (2012), Terrier (2016), Yang, Teng e Zhang (2019). Na sequência estes estudos são abordados neste trabalho.

FIGURA 2.7 – MECANISMO DE AERAÇÃO, PRESSÃO NO FUNDO E CONCENTRAÇÃO DE AR



FONTE: Adaptado de Volkart e Rutschmann (1984)

2.1.3 Equações de Quantidade de Entrada de Ar em Aeradores de Fundo

Nessa revisão, apresentam-se alguns modelos matemáticos para a determinação da quantidade de entrada de ar em aeradores de fundo.

Pinto, Neidert e Ota (1982a) apresentaram uma análise dimensional (ver seção 2.3.1) na qual definiram que o parâmetro de arrastamento de ar β é igual a razão entre a vazão de ar Q_a incorporada pelo fluxo e a vazão de água Q_w . Segundo os autores, o parâmetro β está linearmente relacionado ao comprimento do jato de água L e inversamente proporcional a profundidade do escoamento a montante do aerador h .

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = K \left(\frac{L}{h} \right) \quad (2.1)$$

A constante K foi obtida a partir de dados de protótipo da Usina Hidrelétrica Foz do Areia e assume os valores de 0,033 e 0,023 para testes de fluxo de ar simétrico e assimétrico, respectivamente.

Posteriormente, Pinto e Neidert (1983) expressaram K em função da geometria do aerador e de parâmetros adimensionais:

$$K = f \left[Fr, Eu, \left(t + \frac{d}{h} \right) \right] \quad (2.2)$$

onde:

Fr : número de Froude;

Eu : número de Euler;

t : altura da rampa;

d : altura do degrau.

O estudo apresentado por Pinto e Neidert (1983) sugere que a variação do número de Euler é causada, principalmente, pela alteração das condições de entrada de ar no aerador.

A partir de resultados de modelo físico de escala 1:50 e de dados de protótipo da UHE Foz do Areia, apresentado por Pinto, Neidert e Ota (1982a), Wood (1985) apontou que a constante K é função do número de Froude, da diferença de pressão na região do aerador Δp e da geometria do aerador. Com isso, o autor chegou na seguinte expressão:

$$K = 0,0079 (Fr - Fr_c) \quad (2.3)$$

onde:

$$Fr_c = 4,3 \left[1 + 4,7 \left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \frac{t}{h} \right) \right] \quad (2.4)$$

onde:

ρ_w : densidade específica da água;

g : aceleração da gravidade.

Koschitzky e Kobus (1988) apresentaram uma análise dimensional cujo parâmetro de arrastamento de ar é função do número de Froude:

$$\beta = f \left(Fr; \frac{\Delta p}{\rho_w g h}; \text{geometria do aerador} \right) \quad (2.5)$$

E, de acordo com os estudos dos autores, o parâmetro β pode ser descrito a partir da seguinte função empírica:

$$\beta = C_1 (Fr - Fr_{cr})^{1,5} \left[1 - C_2 \left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) \right] \quad (2.6)$$

onde:

- C_1 : coeficiente que depende da geometria do aerador e varia de 0,02 a 0,10;
- C_2 : coeficiente que depende da geometria do vertedouro e varia de 0 a 5;
- Fr_{cr} : número de Froude crítico quando $\beta = 0$ para uma determinada geometria.

A Equação 2.6 foi obtida para um número de Froude crítico de aproximadamente $3,5 \pm 1$. De acordo com Rutschmann e Hager (1990), o número de Froude crítico depende, principalmente, dos números de Reynolds Re e de Weber We .

Conforme comentado por Pinto (1987), o número de Froude é importante na quantificação do parâmetro de arrastamento de ar β . Em sendo assim, Rutschmann e Hager (1990) sugerem que:

$$\beta_{max} = (\tan \alpha)^{1,15} \exp [(1,15 \tan \theta)^2] (Fr - 5, 4)^\epsilon \quad (2.7)$$

onde:

- α : ângulo entre o fundo do canal e a horizontal;
- θ : ângulo da rampa;
- ϵ : coeficiente igual a 0,35.

Nesse caso, o parâmetro β_{max} representa a maior entrada de ar se as características do escoamento são constantes e $\Delta p = 0$.

Rutschmann e Hager (1990) também mostraram que β_{max} é função linear de L/h , conforme já sugerido por Pinto, Neidert e Ota (1982b), pelas seguintes expressões:

$$\beta_{max} = 0,030 \left(\frac{L}{h} - 5 \right) \text{ para } \frac{L}{h} > 7 \quad (2.8)$$

$$\beta_{max} = 0,030 \left(\frac{L}{h} \right) \text{ para } Fr > 6 \quad (2.9)$$

Pinto (1991) apresentou uma equação para a incorporação de ar por meio de estudos em modelos físicos das usinas de Foz do Areia (Brasil), Emborcação (Brasil), Amaluza (Equador), Colbun (Chile) e Tarbela (Paquistão) e de uma análise dimensional

sobre as variáveis que influenciam o parâmetro de arrastamento de ar. Portanto, a expressão de incorporação de ar para as usinas mencionadas é:

$$\beta = 0,29 (Fr - 1)^{0,62} (D^*/h)^{0,59} \text{ com } D^* = cA/B \quad (2.10)$$

onde:

- c : coeficiente de descarga do duto de ar relacionado a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão sob o jato de água;
- A : área da seção transversal do orifício de controle;
- B : largura do canal.

A expressão apresentada por Pinto (1991) engloba todas as diferentes geometrias dos aeradores das usinas apresentadas acima. A equação resultou em um fator de determinação de 97,6%, em uma faixa de número de Froude de 4 a 21 e D^*/h de 0,028 a 3,23. Também observa-se que o termo $(Fr - 1)$ significa que a equação 2.10 é válida para um regime supercrítico. E, o termo D^*/h pode ser interpretado pela razão entre a área atravessada apenas pelo ar no orifício de controle e a área atravessada apenas pela água.

Kökpinar e Göğüş (2002) apresentaram o seguinte equacionamento da taxa de entrada de ar no fluxo pelo sistema de aeração:

$$\beta = 0,0189 \left(\frac{L}{h}\right)^{0,83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w}\right) (1 + \tan \theta)\right]^{0,24} \quad (2.11)$$

onde:

- A_a : área atravessado pelo ar no sistema de aeração;
- A_w : área atravessada pela água no início do salto sobre o aerador.

A Equação 2.11 é válida para números de Froude entre 5,56 e 10,00, números de Weber entre 109 e 182, inclinação da rampa entre 0° e $9,45^\circ$, inclinação do canal do vertedouro entre 0° e 51° , além das seguintes razões: $0 \leq t/d \leq 0,8$, $0 \leq t/h \leq 0,4$, $0,02 < A_a/A_w < 1$.

Essa equação apresenta duas características interessantes que a diferenciam das demais anteriores propostas. A primeira é o fato de que a dependência entre β e L/h não é linear e a segunda é que foi introduzido um parâmetro vinculado ao escoamento de ar. A razão A_a/A_w expressa a relação entre a área atravessada apenas pelo ar, na tubulação de suprimento, e a área atravessada apenas pela água, no início do salto sobre o aerador (BRITO, 2011).

Kökpinar e Göğüş (2002) concluíram que o parâmetro de arrastamento de ar apresentado na Equação 2.11 aumenta com o aumento da relação A_a/A_w , da inclinação do canal e do número de Froude.

Estudos desenvolvidos por Pfister e Hager (2010b) onde investigaram a influência das condições do fluxo e da geometria da calha, mostraram que apenas o número

de Froude do fluxo de aproximação, o ângulo da rampa e o ângulo da calha influenciam a incorporação de ar no fluxo. Em sendo assim, os autores propuseram a seguinte expressão empírica:

$$\beta = 0,0028Fr^2 (1 + Fr \tan \alpha) - 0,1 \text{ para } 0 < \beta < 0,80 \quad (2.12)$$

A Equação 2.12 resultou em um fator de determinação de 93% e é válida para números de Froude entre 5,8 e 16,1, inclinação da rampa entre 0° e 11,3°, inclinação do canal entre 0° e 50° e para a seguinte razão: $0,06 \leq (d + t/h) \leq 2,1$.

Pfister e Hager (2010b) utilizaram as medições do parâmetro de arrastamento de ar de cinco usinas — Foz do Areia (Brasil), Emborcação (Brasil), Amaluza (Equador), Colbun (Chile) e Tarbela (Paquistão), dados de Pinto (1991) — para validar a Equação 2.12. A análise resultou em um fator de determinação de 88%.

Posteriormente, Schulz e Brito (2011) apresentam a seguinte equação para a estimativa da vazão de ar:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = \omega_1 \sqrt{\frac{\rho_w L A_a}{\rho_a h A_w}} \sqrt{\frac{1}{\left[\left(\frac{A_a}{A_w}\right)^2 + \omega_2 \left(\frac{L}{h}\right)^2\right]}} \times \dots \dots \sqrt{\frac{1}{[\omega_3 \sin \theta \cos(\theta - \alpha) - \sin(\theta - \alpha) \cos \theta]}} \quad (2.13)$$

onde:

- ω_1 : coeficiente de ajuste de proporcionalidade ente β e a expressão global;
- ω_2 : coeficiente que exprime a importância da perda de energia na tubulação de adução de ar;
- ω_3 : coeficiente que exprime a importância relativa das forças nas direções x e y no movimento do jato.

Observa-se que as equações para quantificar a entrada de ar em fluxos da calha de aeradores tornaram-se mais complexas ao longo do tempo com a adição de novos parâmetros para um cálculo mais preciso. Contudo, a literatura fornece uma gama muito ampla de outros equacionamentos apresentados por diferentes autores. Como referência, pode-se citar os estudos de Chanson (1988), Chanson (1989), Chanson (1992) e Chanson (1993), onde o autor considera as características cinemáticas e dinâmicas associadas a princípios físicos, como por exemplo, a quantificação dos perfis de concentração de ar e a descrição de fenômenos que ocorrem intrinsecamente no escoamento bifásico.

2.2 ESCALA GEOMÉTRICA

Escala é a redução ou ampliação de todas as magnitudes geométricas e seus derivados, além da igualdade de ângulos correspondentes entre modelo e protótipo.

A partir da escala é possível transpor os resultados de modelo para protótipo, desde que uma série de condições de semelhanças sejam asseguradas. A primeira delas refere-se a modelos geometricamente semelhantes, aqueles em que existe semelhança entre todas as variáveis geométricas.

A semelhança geométrica é o requisito mais óbvio em um modelo projetado para corresponder a um determinado protótipo. No entanto, nem sempre é simples obter semelhança geométrica perfeita, uma vez que também se faz necessária a representação da rugosidade da superfície.

Um modelo físico normalmente atende a um critério de semelhança, seja ele de Reynolds, Froude, Weber ou outro, como posteriormente descrito na seção 2.3. Porém, isso introduz a erros ou desvios a serem levados em consideração na reprodução de certos fenômenos, conhecidos como efeitos de escala. Por esse motivo o projeto deve minimizar esses efeitos, o que resulta na imposição de limites à escala adotada, conforme apresentado na seção 2.4.

Levando o efeito de escala em consideração, diversos pesquisadores sugerem escalas geométricas nos estudos de aeração de escoamentos. Boller (2006) recomenda utilizar uma escala de 1:3 ou 1:5. Entretanto, o autor comenta que existem limitações para realizar testes com altos números de Froude ou por exigir grandes estruturas em laboratório. Para Heller (2011) e Terrier (2016) é usual adotar escalas maiores que 1:15, sendo o ideal a escala geométrica 1:10.

Diversos estudos remetem ao uso de modelos físicos ou computacionais com o fim de investigar o comportamento hidrodinâmico e a incorporação de ar no fluxo de estruturas hidráulicas.

Aydin e Ozturk (2009) utilizaram resultados relacionados às taxas de entrada de ar em aerador de vertedouro, obtidos com modelagem em CFD, em escala de protótipo. Os resultados foram comparados aos dados do modelo físico de escala 1:25, além de resultados de algumas equações empíricas e observações em protótipo, apresentados por outras pesquisas. O estudo apontou resultados em CFD razoavelmente de acordo com os dados do protótipo. Mas inconsistentes com os dados do modelo físico, em função de consideráveis efeitos de escala. Como conclusão, os autores encorajam o uso de modelos em CFD para estimar a entrada de ar nos estágios iniciais do projeto, juntamente com o modelo físico, se necessário.

Torres et al. (2018) empregaram a modelagem numérica computacional para reproduzir os fluxos de um modelo físico de vertedouro labirinto na escala 1:25, bem como simulá-lo na escala de protótipo. Em relação aos possíveis efeitos de escala os autores concluíram que houve uma boa compatibilidade entre ambos os modelos (CFD e físico), de mesma escala, no que se refere às vazões mais baixas. Quando comparado

os modelos CFD, escala 1:25 e escala de protótipo, os resultados mostraram que em geral a diminuição de profundidade de água e aumento de velocidade no protótipo podem chegar até 16% e 13%, respectivamente, para as vazões mais baixas, com efeitos de escala reduzindo para as vazões mais altas.

Tassinari et al. (2018) investigaram através da modelagem numérica computacional, o efeito de escala no escoamento turbulento sobre vertedouro em degraus, a partir do estudo de uma geometria nas seguintes escalas: protótipo 1:1 (referência para análise dos resultados), escala 1:10 (recomendada em modelos que envolvam fenômenos de entrada de ar) e escala 1:100 (escala limite adotada), todos utilizando o fluido água. Também utilizaram fluidos hipotéticos para duas escalas geométricas (1:10 e 1:100). Os resultados obtidos para simulação com água apresentaram comportamento de distribuição de pressões de acordo com o esperado, sendo que quanto menor a escala, mas rapidamente os resultados se afastaram dos reais. As simulações com fluidos hipotéticos, no entanto, resultaram em uma redução nas diferenças entre pressões. Os autores concluíram que os efeitos de escala que surgem em modelos físicos podem resultar em diferenças de pressões consideráveis, e indicaram a modelagem computacional como uma boa ferramenta para essa avaliação, possibilitando ainda alterar as características do fluido e garantir a semelhança dinâmica entre modelo e protótipo.

Aydin, Ulu e Karaduman (2019) compararam dois modelos computacionais, um de escala 1:40 e outro em escala de protótipo. Para validação do modelo CFD de escala 1:40 foram utilizados resultados de um modelo físico de mesma escala. Os pesquisadores concluíram que os resultados do CFD foram úteis para determinar e eliminar os efeitos de escala. Além disso, observaram que o CFD é uma boa alternativa ao modelo físico, o qual é mais difícil e custoso nos casos de grandes estruturas hidráulicas.

2.3 CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA

Os escoamentos entre modelo e protótipo devem estar correlacionados por leis de semelhança conhecidas, de forma que as medições efetuadas no modelo possam ser transpostas para o protótipo. Conforme apresentado por Fox e McDonald (2001) e Heller (2011), a primeira condição que deve ser satisfeita refere-se à semelhança geométrica, a qual requer que as dimensões lineares (comprimento, área e volume) entre o modelo e o protótipo estejam relacionadas por um fator de escala constante.

Outra condição que os escoamentos de modelo e protótipo devem observar diz respeito à semelhança cinemática, isto é, as velocidades em pontos correspondentes devem estar no mesmo sentido e se relacionarem por um fator de escala constante. Como as fronteiras de escoamento formam as linhas de correntes limítrofes, os esco-

mentos cineticamente semelhantes devem também ser geometricamente semelhantes (FOX; MCDONALD, 2001; HELLER, 2011).

De acordo com Fox e McDonald (2001) e Heller (2011), a terceira condição entre o modelo e o protótipo refere-se a semelhança dinâmica (semelhança das forças). Dois escoamentos são dinamicamente semelhantes quando os valores absolutos das forças, em pontos equivalentes dos dois sistemas, relacionam-se por meio de uma escala constante. Os requisitos da semelhança dinâmica são os mais restritivos e exigem que os regimes de escoamento sejam os mesmos para modelo e protótipo, sendo necessário manter as relações entre as forças homólogas. As forças que determinam o comportamento dos fluidos tem várias origens: forças devido às diferenças de pressões, forças resultantes da ação da viscosidade, forças devido à tensão superficial, forças elásticas, forças de inércia e forças devido à atração gravitacional. Para estabelecer todas as condições necessárias, todas as forças importantes no escoamento, assim como seus efeitos, precisam ser consideradas e devem estar relacionadas pelo mesmo fator de escala.

A análise dimensional permite desenvolver critérios governantes de semelhança dinâmica para escoamentos de escala diferentes, a qual resulta em relações matemáticas entre grandezas físicas relevantes. A análise dimensional pode ser realizada utilizando o teorema dos Π de Buckingham. O teorema afirma que se existe uma relação funcional entre n variáveis físicas dimensionais, sendo que estas variáveis são representadas por k dimensões físicas fundamentais independentes (massa [M], comprimento [L], tempo [T], entre outras), então uma equação de $p = n - k$ parâmetros adimensionais pode ser construída a partir das variáveis originais. O teorema está detalhadamente apresentado em Fox e McDonald (2001).

O método é utilizado para calcular conjuntos de parâmetros adimensionais a fim de simplificar a solução de problemas ou até mesmo resolvê-los, mesmo se um processo físico é desconhecido.

Conforme mostrado por Fox e McDonald (2001), para escoamentos de fluidos há, principalmente, quatro variáveis envolvidas: Δp (diferença de pressão, carga hidráulica ou perda de carga), V (velocidade), L (dimensão característica) e ρ (densidade do fluido). Assim sendo, existem quatro variáveis físicas dimensionais relacionadas com três variáveis dimensionais que resultam em $4 - 3 = 1$ parâmetro adimensional, no caso, o número de Euler:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{\text{Força de Pressão}}{\text{Força de Inércia}} \quad (2.14)$$

Em escoamentos de superfície livre, a força gravitacional caracterizada pela aceleração da gravidade g é o parâmetro de maior importância, uma vez que tem um papel determinante no padrão do fluxo. Nesse caso, conforme apresentado por Freitas,

Michels e Passos (2015), o número adimensional refere-se ao número de Froude, que pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e as forças de gravidade. Este número informa a ocorrência de resposta a um estímulo externo e a relação desta com a propagação de ondas.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g L}} = \frac{\text{Força de Inércia}}{\text{Força de Gravidade}} \quad (2.15)$$

Quando as forças de natureza viscosa (viscosidade dinâmica μ do fluido) são dominantes, o número de Reynolds é o mais importante. O número de Reynolds é caracterizado pela relação entre a força de inércia e a força viscosa, que tem por objetivo demonstrar o tipo do escoamento. Se a força de inércia superar a força viscosa, o escoamento é dito turbulento, ou seja, elevados números de Reynolds. A relação contrária representa um escoamento com características laminares (FOX; MCDONALD, 2001; ALVES, 2008; FREITAS; MICHELS; PASSOS, 2015).

$$Re = \frac{V L \rho}{\mu} = \frac{\text{Força de Inércia}}{\text{Força Viscosa}} \quad (2.16)$$

Em fluxos com interface entre dois fluidos diferentes, em especial para fluxo de multifase, o número adimensional preponderante é o número de Weber. O número de Weber caracteriza-se pela razão entre a força de inércia e a força de tensão superficial σ (FOX; MCDONALD, 2001). Ele está relacionado aos estudos de incorporação de ar em escoamento e aos processos de quebra de bolhas no fluxo.

$$We = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} = \frac{\text{Força de Inércia}}{\text{Força de Tensão Superficial}} \quad (2.17)$$

No que se refere aos escoamentos de superfície livre, cuja gravidade tem importância fundamental, o critério de semelhança comumente utilizado é o critério de semelhança de Froude. Portanto, o número de Froude deverá ser o mesmo no modelo e no protótipo, o que acarreta fatores de escala para que este critério seja satisfeito.

Entretanto, observa-se que para o estudo de aeração em fluxos, os números de Froude, Reynolds e Weber são importantes, o que dificulta a determinação do critério de semelhança.

De acordo com Chanson (2006), os efeitos viscosos, a tensão superficial e os efeitos da gravidade são importantes nos fluxos aerados. Contudo, é possível apenas modelar o mecanismo mais dominante.

2.3.1 Análise Dimensional de Fluxos Aerados

Os estudos analíticos e numéricos dos fluxos aerados são particularmente complexos devido ao grande número de equações relevantes (CHANSON, 2006).

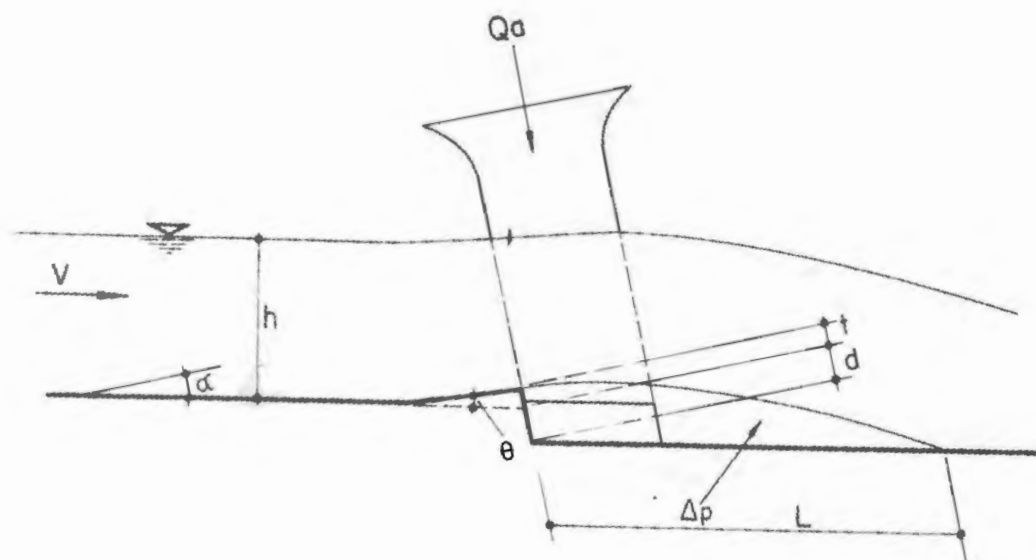
Segundo Chanson (2006), em estudos de fluxos aerados de altas velocidades as variáveis relevantes necessárias para qualquer análise dimensional provêm dos seguintes grupos:

- (A) Propriedades do fluido e constantes físicas como, por exemplo, densidade da água ρ_w e do ar ρ_a [kg/m^3], viscosidade dinâmica da água μ_w e do ar μ_a [Ns/m^2], tensão superficial do ar e da água σ [N/m] e aceleração da gravidade g [m/s^2].
- (B) Geometria do canal ou do fluxo, incluindo a geometria do sistema de aeração.
- (C) Propriedades do fluxo aerado e do fluxo a montante como, por exemplo, distribuição de velocidade V [m/s], distribuição da concentração de ar C e flutuações turbulentas de velocidade u' [m/s].
- (D) Características de entrada da bolha de ar. Segundo Chanson (2006), a taxa de fluxo de ar pode ser deduzida por meio da continuidade das distribuições de concentração e velocidade do ar ou da distribuição do tamanho da bolha de ar d_{ab} [m], o qual não é um parâmetro independente.

Entretanto, como apresentado por Pinto, Neidert e Ota (1982b), a análise dimensional do fluxo aerado pode ser facilmente realizada se os fenômenos de aeração forem inicialmente ignorados, o que torna o procedimento analítico mais simples.

No estudo, o tratamento analítico dos fenômenos foi realizado para um aerador ideal, conforme visto na Figura 2.8, assumindo fluxo bidimensional.

FIGURA 2.8 – GEOMETRIA BÁSICA DE UM AERADOR



FONTE: Pinto, Neidert e Ota (1982b)

A análise dimensional apresentada por Pinto, Neidert e Ota (1982b) considerou as seguintes variáveis:

α : ângulo entre o fundo do canal e a horizontal (rad);

θ : ângulo da rampa com o fundo do canal (rad);

t : altura da rampa (m);

d : altura do degrau (m);

V : velocidade média da água (m/s);

h : altura do escoamento (m);

L : comprimento do jato de água (m);

Δp : diferença de pressão do ar entre a região acima e abaixo do jato de água (N/m²);

g : aceleração da gravidade (m/s²);

ρ : densidade da água (kg/m³);

μ : viscosidade dinâmica da água (N·s/m²);

σ : coeficiente de tensão superficial da água (N/m).

A partir das 12 variáveis dimensionais relacionadas para a resolução do problema estabeleceram-se 9 parâmetros adimensionais (Teorema II de Buckingham), conforme visto na seção 2.3.

$$f' = \left(Fr, Re, Eu, We, \frac{L}{h}, \frac{t}{h}, \frac{d}{h}, \tan \alpha, \tan \theta \right) = 0 \quad (2.18)$$

Muitas combinações podem ser formuladas a partir desses parâmetros adimensionais. No que se refere ao estudo do movimento da bolha a combinação dos números de Weber, Froude e Reynolds conduzem ao número de Morton Mo , cuja história e significado na engenharia hidráulica foram apresentados por Pfister e Hager (2014). O número de Morton é escrito como:

$$Mo = \frac{g \mu^4}{\rho \sigma^3} = \frac{We^3}{Re^4 Fr^2} \quad (2.19)$$

O número de Morton é uma função somente das propriedades do fluido e da constante de gravidade. Para os mesmos fluidos (ar e água) no modelo e no protótipo, o número de Mo é constante (CHANSON, 2006).

O comprimento de referência levado em consideração para os fluxos bifásicos de altas velocidades é tipicamente a profundidade do fluxo h (PFISTER; CHANSON, 2012).

Em um modelo geometricamente semelhante, a semelhança dinâmica somente poderá ser atingida se todos os parâmetros adimensionais tiverem o mesmo valor no modelo e no protótipo, estando a simulação sujeita a efeitos de escala quando um ou mais parâmetros tiverem valores diferentes no modelo e no protótipo.

Estudos de escoamentos com superfície livre, como o escoamento em um vertedouro, normalmente são conduzidos com semelhança de Froude. Porém, os fenômenos relacionados a incorporação de ar dependem da tensão superficial e dos efeitos viscosos, representados pelos números de Weber e Reynolds. Esse fato faz com que a aplicação da similaridade dinâmica seja mais difícil devido aos diversos parâmetros importantes no estudo de aeração.

De acordo com Pfister e Chanson (2012), a semelhança dinâmica existe apenas em grande escala, porém a subestimação do transporte de ar é minimizado se as limitações em termos de We e Re forem respeitadas.

2.4 EFEITOS DE ESCALA

A redução geométrica do modelo diminui conseqüentemente a magnitude dos parâmetros de interesse para o estudo, no qual essas reduções são definidas por relações de escala apropriadas, conforme apresentado na seção 2.3. Com isso, os resultados obtidos em modelo podem ser transpostos para o protótipo.

No entanto, a determinação do critério de semelhança deriva a consideração de apenas forças preponderantes (Fr : força de gravidade, Re : força viscosa, We : força de tensão superficial), desprezando alguns parâmetros e esforços. Quando a escala do modelo é muito menor do que a do protótipo, a escala reduzida permite a ocorrência de processos adicionais que afetam a semelhança do modelo em relação ao protótipo, de modo que os parâmetros de modelo não podem ser transpostos utilizando os critérios e as relações típicas. As discrepâncias causadas pela redução de escala do modelo são denominados efeitos de escala.

A incorporação de ar é um fenômeno frequente nos projetos de estruturas hidráulicas e, no que diz respeito a modelagem física, os efeitos de escala afetam os processos de aeração do fluxo. O critério de semelhança de Froude é, comumente, o mais utilizado para estudos de escoamento com superfície livre. Porém, como mencionado por Chanson (2006), os processos de aprisionamento, quebra e coalescência de bolhas são dominados por efeitos de tensão superficial, o que implica a necessidade da escala de Weber. Já os processos de cisalhamento de água e ar são dominados por forças viscosas, que resultam na semelhança de Reynolds. Ainda de acordo com o autor, o número de Reynolds pode ser substituído pelo número de Morton se os mesmos fluidos forem usados no modelo e no protótipo.

Chanson (2008) comentou que considerando o mesmo fluido (ar e água) no modelo e no protótipo, o processo de entrada de ar no fluxo é afetado negativamente por efeitos de escala significativos em modelos de pequena escala. O autor também considerou que a modelagem numérica pode ser uma ferramenta para a solução de

problemas relacionados a efeitos de escala.

A modelagem correta dos fluxos aerados requer uma semelhança dinâmica completa, conseqüentemente, os números de Mo , Re e Fr deveriam ser idênticos no protótipo e no modelo, visto que todas as forças relacionadas afetam a entrada de ar e os recursos de transporte. O que, no entanto, é fisicamente impossível (PFISTER; HAGER, 2014).

Portanto, como observado por Alves (2008), na prática é de grande dificuldade representar todos os parâmetros adimensionais pertinentes ao fenômeno de aeração em escala reduzida, o que gera assim um efeito de escala.

Para representar o problema, considerando um modelo reduzido com semelhança de Froude, a relação de escalas para o número de Weber se torna:

$$We_m = \frac{We_p}{\lambda^2} \quad (2.20)$$

onde os índices m e p representam o modelo e protótipo, respectivamente e, λ a relação de escala geométrica ($\lambda = L_p/L_m$).

A relação apresentada pelo número de Weber mostra uma drástica redução na capacidade de aeração com a redução de escalas (ALVES, 2008).

Ainda no que se refere aos efeitos de escala, em um escoamento turbulento pleno as características médias e a macroescala de turbulência se tornam independentes do número de Reynolds, uma vez que a transferência de energia do escoamento para os vórtices de maior escala é dominada por efeitos de inércia e a viscosidade é aparente apenas na dissipação de energia em escalas pequenas. Sob estas condições, um critério adequado para minimizar efeitos de escala é manter o número de Reynolds alto o suficiente para que prevaleça o escoamento plenamente turbulento. No protótipo, essa condição é usualmente satisfeita, portanto o modelo deve atender a relação (KOBUS, 1984):

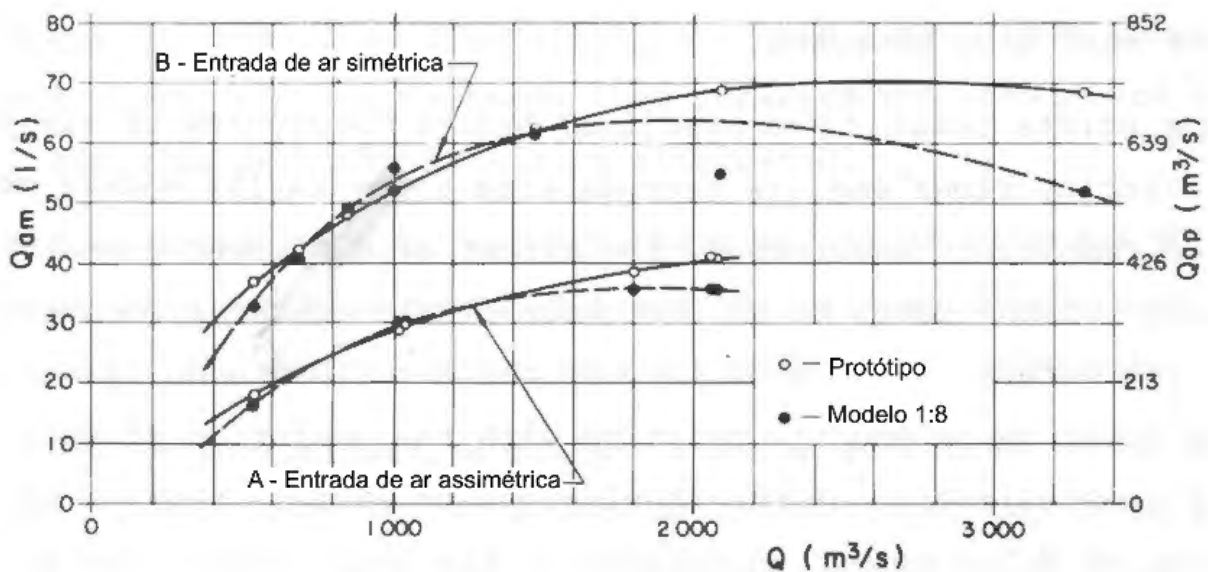
$$Re_m > Re_t \quad (2.21)$$

onde Re_t corresponde ao número mínimo de Reynolds para escoamento plenamente turbulento. Ainda de acordo com Kobus (1984), os valores da velocidade média e da altura do escoamento na seção de entrada de ar devem resultar em um valor de Re_t da ordem de 10^5 para que ocorra o escoamento plenamente turbulento.

Com relação às semelhanças geométrica e dinâmica no processo de incorporação das bolhas no fluxo, Kobus (1984) comentou que a semelhança geométrica é violada visto que as bolhas são do mesmo tamanho absoluto no modelo e protótipo. Da mesma forma, a velocidade absoluta de subida das bolhas tem a mesma ordem de grandeza no modelo e protótipo e, portanto, a semelhança dinâmica também acaba sendo violada.

Pinto, Neidert e Ota (1982b) desenvolveram um estudo sobre aeração em escoamentos de altas velocidades, com foco nos aeradores da calha do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia. O trabalho confrontou dados de protótipo com resultados de modelos de escala 1:50 e 1:8. Os estudos permitiram identificar o limite da influência da tensão superficial, sugerindo que em escoamentos com número de Weber acima de 1.000, os efeitos de tensão superficial podem ser desconsiderados. A Figura 2.9 apresenta a relação entre vazão de ar do modelo e do protótipo e a vazão de água. É possível observar uma boa concordância entre o protótipo e o modelo 1:8.

FIGURA 2.9 – VAZÃO DE AR CONTRA VAZÃO DE ÁGUA - RESULTADOS DE MODELO FÍSICO E PROTÓTIPO



FONTE: Adaptado de Pinto, Neidert e Ota (1982b)

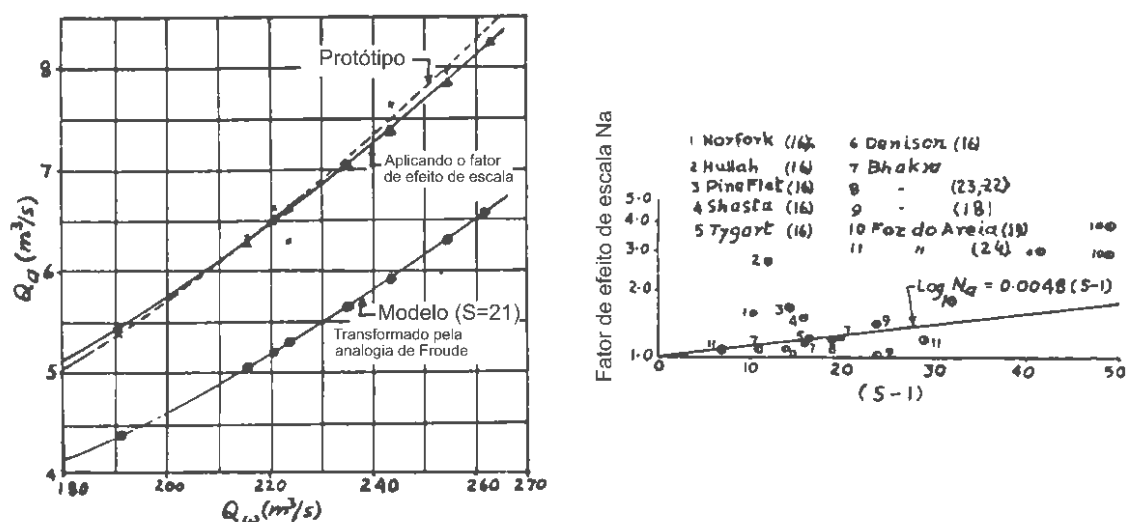
Sakhuja, Paul e Singh (1984) desenvolveram um estudo comparando a distorção na entrada de ar para três modelos com escalas geométricas de 1:21, 1:17 e 1:12 e protótipo. O trabalho sugeriu que a relação entre a incorporação de ar no protótipo e modelo é função da escala geométrica, o que resultou em uma equação empírica obtida pelo melhor ajuste de diversos ensaios em modelo (ver Figura 2.10):

$$\log_{10} Na = 0,0048(S - 1) \quad (2.22)$$

onde Na é o fator de efeito de escala e é dado pela relação entre a vazão de ar no protótipo e no modelo e S é a escala do modelo.

A Figura 2.10 também apresenta a validação da equação empírica (Equação 2.22) nos estudos de aeração da Usina de Beas, localizada na Índia.

FIGURA 2.10 – CORRELAÇÃO ENTRE VAZÃO DE AR E VAZÃO DE ÁGUA (ESQUERDA) E CORRELAÇÃO ENTRE O FATOR DE EFEITO DE ESCALA E A ESCALA DO MODELO (DIREITA)



FONTE: Adaptado de Sakhuja, Paul e Singh (1984)

Chanson e Gualtieri (2008) apresentaram um estudo sobre efeitos de escala na incorporação de ar em ressaltos hidráulicos que considerou dois números diferentes de Froude e escalas geométricas na proporção de 2:1. Os experimentos mostraram efeitos de escala em termos de concentração de ar (*void fraction*) e contagem de bolhas para os testes com $Re < 4 \times 10^4$ no modelo de menor tamanho. Nos testes com $Re < 2,5 \times 10^4$, a entrada de ar foi relativamente pequena e modificou o formato do escoamento aerado. A conclusão da pesquisa é de que modelos de pequenas dimensões podem subestimar a contagem de bolhas e as áreas de interface entre água e ar.

Aydin e Ozturk (2009) apresentaram a verificação e a validação de um modelo de dinâmica dos fluidos computacional relacionados a entrada de ar em aeradores de vertedouros. O modelo computacional foi comparado com dados de um estudo de modelo físico, bem como resultados de equações empíricas e observações de protótipo. Segundo os autores, as taxas de entrada de ar obtidas nas análises CFD estão de acordo com os dados de protótipo e os valores calculados a partir das equações são melhores que os dados do modelo físico, que incluem consideráveis efeitos de escala.

Estudos realizados por Pfister e Chanson (2012) apresentaram dados da literatura os quais mencionaram limitações dos números de Weber e Reynolds para evitar efeitos de escala em escoamentos bifásicos sob a semelhança de Froude, conforme apresentado na Tabela 2.1. Os autores concluíram que as limitações relevantes para os fluxos bifásicos (ar-água) de altas velocidades usando a semelhança de Froude são $We^{0,5} > 140$ ou $Re > 2$ a 3×10^5 (ao considerar apenas uma limitação a outra estará implícita).

TABELA 2.1 – LIMITAÇÕES PARA EVITAR EFEITOS DE ESCALA SIGNIFICATIVOS EM ESCOAMENTOS BIFÁSICOS (AR-ÁGUA) SOB A SEMELHANÇA DE FROUDE

Referência	Limitação	Parâmetro do fluxo aerado	Local de aplicação
Kobus (1984)	$Re \geq 1,0 \times 10^5$	Taxa de transporte de ar	Entrada de ar na calha
Koschitzky (1987)	$Re \geq 1,0 \times 10^5$	Vazão de ar	Aeradores, particularmente β
Rutschmann (1988)	$We^{0,5} \geq 110$	Vazão de ar	Aeradores, particularmente β
Skripalle (1994)	$Re > 2,5 \times 10^5$	Vazão de ar	Aeradores, particularmente β
Boes (2000)	$Re \geq 1,0 \times 10^5$	Concentração de ar e velocidade interfacial	Fluxo aerado do vertedouro
Murzyn and Chanson (2008)	$Re > 1,0 \times 10^5$	Concentração de ar, velocidade interfacial, taxa de contagem de bolhas, intensidade da turbulência, tempo do comprimento da bolha (<i>bubble chord time</i>)	Ressaltos hidráulicos
Felder and Chanson (2009)	$Re > 2,5 \times 10^5$	Concentração de ar, velocidade interfacial, taxa de contagem das bolhas, intensidade da turbulência, escala de tempo turbulenta, comprimento das bolhas	Fluxo aerado do vertedouro
Pfister and Hager (2010)	$Re \geq 2,2 \times 10^5$ $We^{0,5} \geq 114$	Concentração de ar	Aeradores

Fonte: Adaptado de Pfister e Chanson (2012)

A incorporação de ar nos modelos é afetada por efeitos de escala, pois a turbulência do fluxo, representada pelo número de Reynolds, é subestimada, enquanto a tensão superficial, representada pelo número Weber, é superestimada (CHANSON, 2008).

Tassinari et al. (2018) estudaram efeitos de escala em escoamentos sobre vertedouro em degraus por meio de uma investigação de modelagem computacional para uma geometria em diferentes escalas, incluindo dimensões de protótipo. Os autores consideraram diferentes fluidos hipotéticos para a possibilidade de aplicação simultânea de semelhança de números de Froude, Reynolds, Euler e Weber. O parâmetro utilizado para a comparação entre as modelagens foi a pressão. Como conclusão, observaram que a alteração nas características dos fluidos para obter semelhança com outras forças, além da gravitacional, possui grande potencial na modelagem computacional, mesmo com a aplicação de escalas.

Torres et al. (2018) apresentaram uma investigação do efeito de escala de um modelo hidráulico físico com o uso de um modelo computacional. Os autores apresen-

taram resultados do comportamento hidrodinâmico como profundidade e velocidade. A investigação consistiu na comparação entre um modelo físico e um modelo computacional de mesma escala, no caso, 1:25. Posteriormente, os pesquisadores utilizaram um modelo CFD de escala de protótipo para analisar os dados com os modelos de escala pequena. A primeira conclusão realizada refere-se à boa concordância entre o modelo físico e o numérico (escala 1:25) para as menores vazões. Na sequência, os autores concluíram que o modelo CFD de escala de protótipo apresenta profundidades menores (consequentemente, velocidades maiores) em relação ao modelo CFD de escala 1:25. As discrepâncias apresentadas são de 16% para a menor vazão e de 5% para a maior vazão. Por último, Torres et al. (2018) concluíram que os efeitos de escala observados estão de acordo com a teoria, ou seja, as forças de viscosidade e de tensão superficial são relevantes para baixas profundidades e velocidades de modelos de semelhança de Froude.

Yang, Teng e Zhang (2019) estudaram a aeração em fluxos de altas velocidades com o uso da dinâmica dos fluidos computacional. Os autores concluíram que modelos computacionais com dimensões de protótipo apresentam resultados confiáveis para a reprodução das taxas de fluxos de ar e distribuições de concentração de ar.

Em estudos de aeração com modelos reduzidos, a exemplo de um projeto de um aerador, as escalas devem ser maiores que 1:10 quando o objetivo for estimar com precisão a entrada de ar e negligenciar os efeitos de escala (AYDIN; ULU; KARADUMAN, 2019).

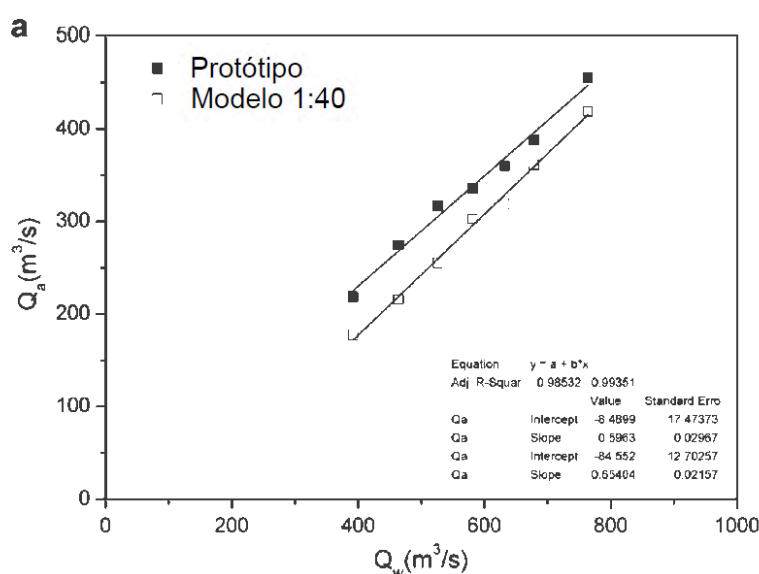
Aydin, Isik e Ulu (2019) apresentaram resultados numéricos da modelagem de aeradores em vertedouros. De acordo com os resultados do modelo numérico e segundo as observações dos autores, a quantidade real de aeração foi muito maior do que a obtida em modelo físico devido aos seus efeitos de escala. Os autores também recomendam o uso de modelos computacionais já validados quando dados de protótipo não estão disponíveis.

Aydin, Ulu e Karaduman (2019) estudaram a aeração dos condutos da barragem de Ilisu, localizada na Turquia. Para isso, os pesquisadores utilizaram um modelo computacional de escala 1:40 e compararam com resultados obtidos em modelo físico de mesma escala para a devida calibração. Posteriormente, os resultados foram comparados com modelo computacional de escala completa (protótipo). Os resultados das análises do modelo CFD estão apresentados na Figura 2.11, onde mostra a relação entre a vazão de ar e a vazão de água dos modelos CFD. De acordo com os autores, a diferença observada refere-se a efeitos de escala, sendo que esta diferença alcança erros de até 23,6% para a mínima vazão ensaiada. Aydin, Ulu e Karaduman (2019) concluíram que efeitos significativos de escala podem ser esperados em modelo físico se os números de Reynolds estiverem nos intervalos de $1,6 \times 10^5 - 3,2 \times 10^5$ para o

modelo de escala 1:40 e $42 \times 10^6 - 81 \times 10^6$ para o protótipo.

Aydin, Ulu e Karaduman (2019) concluíram, ainda, que os estudos em modelo físico são trabalhosos e custosos considerando grandes estruturas. Como os modelos experimentais também exigem pequenas escalas, os efeitos de escala são inevitáveis, especialmente para fluxos multifásicos, como fluxos de mistura ar-água. Portanto, os resultados mostraram que a simulação CFD, por ser mais flexível, pode ser uma boa alternativa para projetos de estruturas hidráulicas. Em relação à eliminação dos efeitos de escala, os autores sugerem a modelagem computacional em dimensões reais.

FIGURA 2.11 – COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS DE MODELO COMPUTACIONAL DE ESCALA 1:40 E ESCALA COMPLETA (PROTÓTIPO)



FONTE: Adaptado de Aydin, Ulu e Karaduman (2019)

2.5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A dinâmica dos fluidos computacional – CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*) – é um método para resolver problemas envolvendo fluidos em que as equações de fluxo clássicas, tais como as equações de Navier-Stokes e a equação da continuidade, são discretizadas e resolvidas para cada célula computacional (RAMALHO, 2016). Segundo Ferreira, Lima e Corrêa (2010), a dinâmica dos fluidos computacional é a ciência de construir soluções numéricas para equações de conservação, avançando a solução no espaço e no tempo para obter uma descrição numérica do escoamento de interesse.

Nas últimas décadas tem se presenciado o aumento do interesse pelos modelos computacionais tridimensionais a fim de simular escoamentos com superfície livre. Esse tipo de modelo é capaz de simular a escala de protótipo e fornecer o mapeamento dos campos de quantidade por todo o domínio da modelagem (TORRES et al., 2018).

Nesse sentido, a capacidade dos modelos computacionais em simular a escala do protótipo torna possível utilizar simulações numéricas para determinar efeitos de escala de modelos físicos.

Os modelos numéricos, incluindo a dinâmica dos fluidos computacional tridimensional (3D), tem se desenvolvido rapidamente nos últimos anos devido aos avanços da tecnologia e dos métodos numéricos. Os modelos em CFD são mais flexíveis e requerem menos tempo, investimento e esforços quando comparados aos modelos físicos. As análises em CFD tem sido amplamente usadas em mecânica dos fluidos como fluxos aerodinâmicos, multifásicos e de superfície livre. Além do que, os modelos CFD se tornaram mais confiáveis na modelagem de estruturas hidráulicas como aeradores de vertedouros (AYDIN; OZTURK, 2009).

A modelagem numérica computacional representa uma importante ferramenta de análise detalhada de escoamentos, posto que proporciona flexibilidade para estudar estruturas hidráulicas com diferentes configurações: geometrias, escalas e fluidos, que seriam muitas vezes inviáveis utilizando a modelagem experimental (TASSINARI et al., 2018).

2.5.1 Equações Governantes

Os programas de modelagem numérica de fluidos utilizam uma série de equações governantes para a resolução das simulações apresentadas (FARIA, 2014). Essas equações governantes da dinâmica dos fluidos computacional provêm da conservação de massa (lei da continuidade), conservação da quantidade de movimento (segunda lei de Newton) e conservação de energia (primeira lei da termodinâmica).

Nos problemas envolvendo fluidos, a técnica CFD utiliza equações de fluxo clássicas, tais como as equações de Navier-Stokes e equação da continuidade, para a discretização e a resolução do problema em cada célula computacional (RAMALHO, 2016).

O conjunto das equações de Navier-Stokes descreve o comportamento do fluido em um domínio definido em que considera efeitos de campos vetoriais (como velocidade), grandezas escalares (pressão, temperatura) e propriedades da matéria (viscosidade e densidade).

Para fluidos compressíveis as equações de Navier-Stokes para a conservação da massa e quantidade de movimento são, respectivamente, expressas pelas seguintes formulações:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2.24)$$

onde:

- ρ : densidade do fluido;
- t : tempo;
- u : componente da velocidade;
- x : direção;
- τ : tensor cisalhante sob a face do elemento;
- p : pressão sob a face do elemento;
- g : aceleração da gravidade.

Nota-se que, devido à grande complexidade e extensão das equações, foi adotada a notação indicial (ou notação de Einstein) para simplificação dos termos aqui apresentados. Os índices i e j são iguais a 1, 2 e 3 para escoamentos tridimensionais.

As chamadas equações de Navier-Stokes são obtidas substituindo-se o tensor das tensões viscosas pela relação constitutiva de um fluido newtoniano. Simplificações podem ser realizadas ao considerar um escoamento incompressível (sem variação temporal da densidade do fluido) e admitir uma viscosidade dinâmica μ constante. Logo, as equações descritas anteriormente se resumem a:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + g_i \quad (2.26)$$

Em forma vetorial a equação de Navier-Stokes para a conservação da quantidade de movimento é expressa como:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.27)$$

As equações de Navier-Stokes representam o equilíbrio entre o transporte da quantidade de movimento e as forças gravitacional, de pressão e viscosa. Portanto, na Equação 2.27 o termo à esquerda da igualdade representa a variação da massa por unidade de volume vezes a aceleração (transporte de quantidade de movimento) e os termos à direita representam as parcelas das forças (força de campo, força de superfície e força viscosa) (RAMALHO, 2016).

Adicionalmente a essas equações, apresenta-se a conservação de uma grandeza escalar ϕ em sua forma diferencial para escoamentos compressíveis e incompressíveis (FERZIGER; PERIC, 2002).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + q_\phi \quad (2.28)$$

onde:

- q_ϕ : termo fonte de ϕ ;
- Γ : coeficiente de difusividade da propriedade ϕ .

A Equação 2.28 representa o transporte de um escalar (passivo ou reativo) que pode ser usada em conjunto com as equações de Navier-Stokes para determinar a distribuição temporal e espacial da concentração de propriedades de interesse, tal como a concentração de ar.

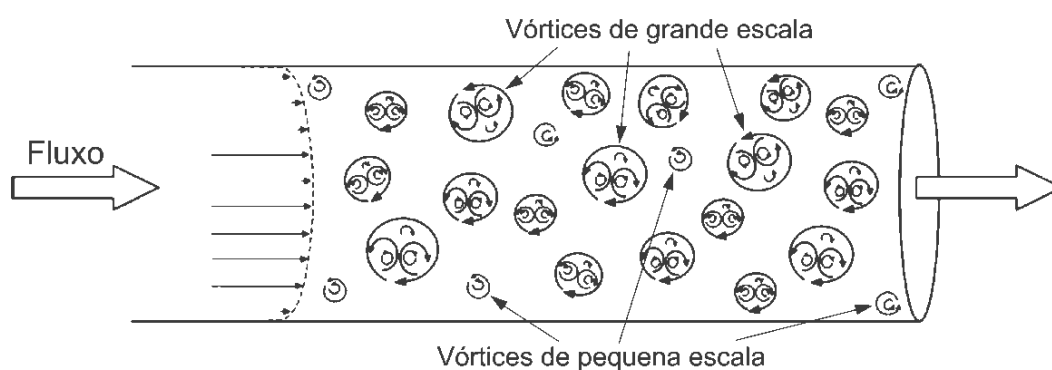
2.5.2 Modelos de Turbulência

Esta seção apresenta uma visão geral da natureza física da turbulência e da estrutura matemática utilizada nas simulações numéricas de fluxos turbulentos.

Segundo Hinze (1959) o movimento turbulento do fluido é uma condição irregular do fluxo, na qual as várias quantidades mostram uma variação aleatória em função das coordenadas do tempo e do espaço, de modo que valores médios estatisticamente distintos podem ser discernidos. George (2013) complementa que a turbulência é o estado de movimento de um fluido que é caracterizado pela aparente aleatoriedade e pelos vórtices caóticos em 3 dimensões. Quando a turbulência está presente num fluido, normalmente, esta domina todos os outros fenômenos do escoamento e resulta em um aumento da eficácia da dissipação de energia, do arrastamento e da transferência de calor. Devido às dimensões desses vórtices serem superiores a escala de comprimento molecular, a turbulência pode ser considerada um fenômeno contínuo (infinitamente divisível e não composto por átomos), governado pelas equações de Navier-Stokes.

Fluxos turbulentos consistem em uma ampla gama de escalas de comprimento, de velocidade e de tempo. Os vórtices de grande escala em fluxos turbulentos podem conter vórtices turbulentos menores, o que significa que diferentes escalas coexistem. As maiores escalas são limitadas pela geometria do fluxo, enquanto as menores pela viscosidade (ANDERSSON et al., 2012). A Figura 2.12 apresenta um escoamento em conduto fechado representando os vórtices de diferentes escalas.

FIGURA 2.12 – VÓRTICES DE DIFERENTES ESCALAS NO ESCOAMENTO EM CONDUTOS FECHADOS

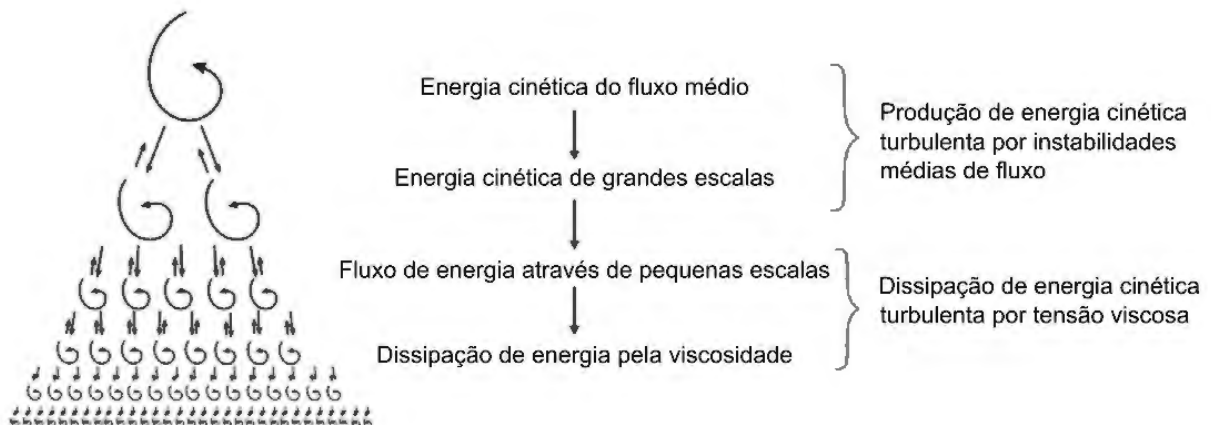


FONTE: Adaptado de Andersson et al. (2012)

Tennekes e Lumley (1972) listaram as características mais importantes da turbulência:

- Difusividade: provavelmente a característica mais importante da turbulência é a difusão. O transporte difusivo turbulento ocorre devido aos movimentos caóticos no fluxo e permite taxas de mistura mais rápidas de espécies, momento e energia do que seria permitido apenas pela difusão molecular;
- Instabilidades em grandes números de Reynolds: na equação de Navier-Stokes o termo convectivo não linear se torna mais importante que o termo viscoso com o aumento do número de Reynolds. A tendência à instabilidades, que é amortecida pela viscosidade, aumenta com o número de Reynolds;
- Dissipação de energia cinética turbulenta: em todos os fluxos turbulentos, há um fluxo de energia das maiores escalas turbulentas para as pequenas escalas. Esse processo de transferência de energia cinética é geralmente conhecida por “cascata de energia”. A Figura 2.13 apresenta uma esquematização do processo de transferência de energia cinética entre vórtices.

FIGURA 2.13 – PROCESSO DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA CINÉTICA

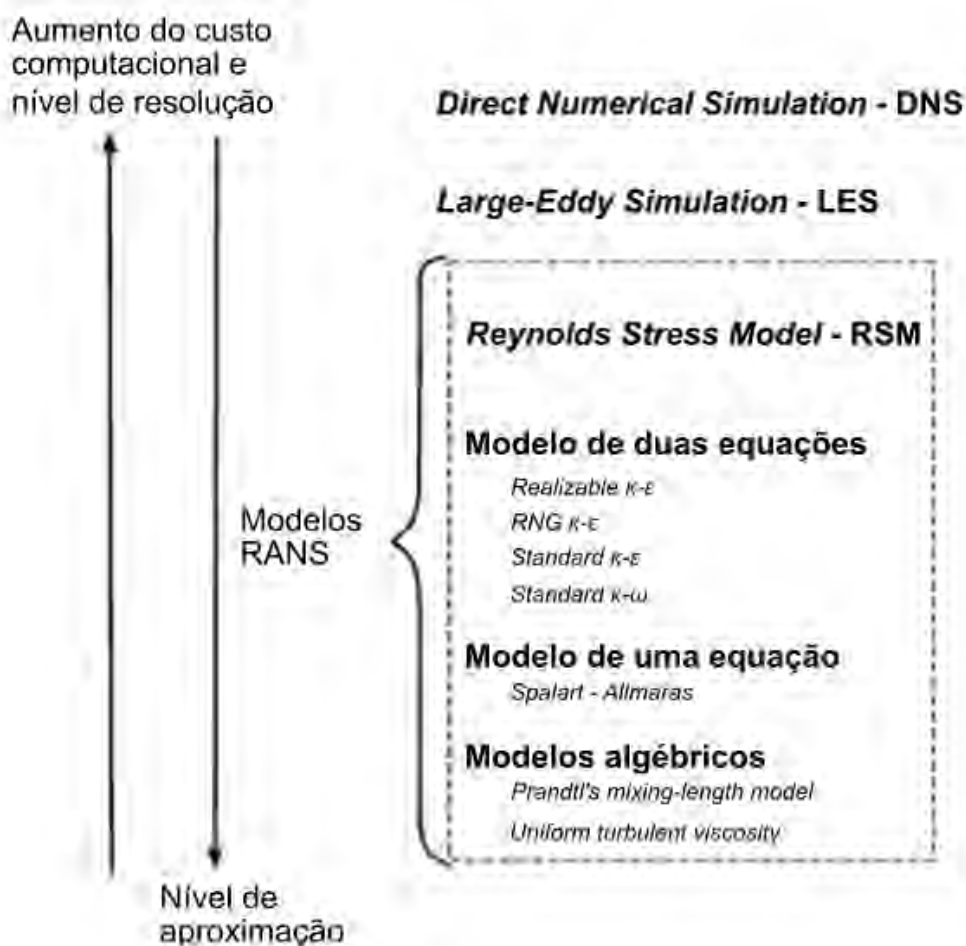


FONTE: Adaptado de Andersson et al. (2012)

A partir dessa visão geral da natureza da turbulência, descrita por Hinze (1959), Tennekes e Lumley (1972), Andersson et al. (2012) e George (2013), nota-se a necessidade do uso de malhas computacionais extremamente refinadas para que todos os processos resultantes do movimento turbulento sejam resolvidos numericamente. Felizmente, ao invés de simular as equações exatas que governam os processos, pode-se manipular essas equações para remover as flutuações de alta frequência em pequena escala, o que resulta em um conjunto modificado de equações computacionalmente mais fáceis de se resolver. Como consequência, as equações modificadas contêm variáveis adicionais desconhecidas. Portanto, conforme apresentado por Andersson et

al. (2012), essas variáveis são determinadas por meio de modelos de turbulência. A Figura 2.14 apresenta os principais modelos de simulação, relacionando-os com seu esforço computacional, nível de resolução e nível de aproximação. Observa-se que o nível de resolução (precisão) está diretamente relacionado ao custo computacional.

FIGURA 2.14 – CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO



FONTE: Adaptado de Andersson et al. (2012)

A simulação numérica direta (do inglês *Direct Numerical Solution* – DNS) fundamenta-se na modelagem numérica de escoamentos por meio das equações de Navier-Stokes, não sendo necessários os modelos de turbulência. Nessa simulação, toda a extensão das escalas turbulentas, temporais e espaciais são resolvidas (FARIA, 2014). Devido ao alto grau de discretização temporal e espacial requerido, a DNS é comumente aplicada somente em escoamentos laminares, para baixos valores de Reynolds e domínios geometricamente simples (FERZIGER; PERIC, 2002). Segundo Ferziger e Peric (2002), os resultados obtidos em simulações DNS são equivalentes a dados experimentais. Porém, seu uso em projetos de engenharia é impraticável, devido à grande infraestrutura computacional demandada (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), (ANDERSSON et al., 2012) e (CASTRO; LI; CARRICA, 2016).

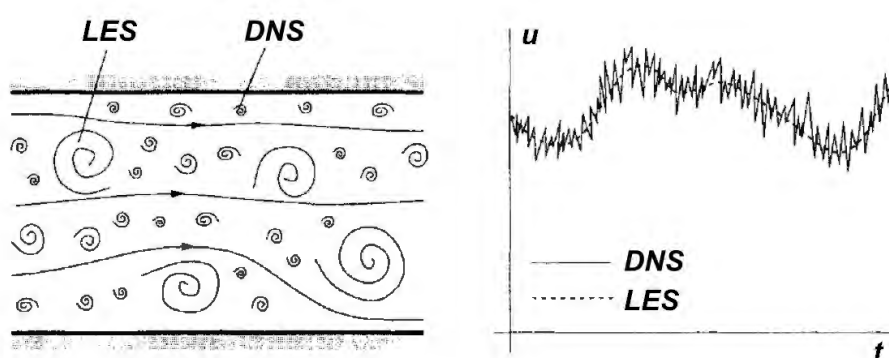
A simulação para grandes escalas (do inglês *Large Eddy Simulation* – LES),

pertencente ao grupo SRS (sigla do inglês para *Scale Resolving Simulation*), calcula numericamente apenas as escalas maiores de turbulência que são criadas devido à geometria ou às condições específicas do fluxo. O modelo LES parte do princípio que os movimentos de pequena escala apresentam um comportamento isotrópico e, portanto, são menos afetados pelas condições de contorno. Por essa razão esses movimentos podem ser negligenciados se forem aproximadamente proporcionais ao tamanho da malha, o que facilitará os cálculos da simulação (CELIK, 1999). Andersson et al. (2012) complementam que o LES precisa ser tridimensional e transitório. E Ferziger e Peric (2002) comentam que a simulação por LES é possível para altos números de Reynolds ou geometrias complexas.

O modelo LES utiliza uma filtragem espacial para separar os vórtices de pequena dimensão dos de grande dimensão. Durante esta filtragem, a informação relativa aos movimentos de pequena dimensão são desconsiderados, o que permite ao modelo resolver numericamente o comportamento do escoamento utilizando as equações de Navier-Stokes nos movimentos de grandes dimensões (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Como observado na Figura 2.14, o modelo de simulação LES exige um custo computacional considerável, porém, apresenta um menor nível de resolução (precisão) quando comparado com a simulação numérica direta (DNS). Posto isto, a Figura 2.15 mostra um esquema comparativo dos vórtices calculados por LES e DNS (à esquerda) e o tratamento da flutuação de velocidade ao longo do tempo em cada modelo (à direita).

FIGURA 2.15 – COMPARAÇÃO ENTRE DNS E LES



FONTE: Adaptado de Ferziger e Peric (2002)

Segundo Andersson et al. (2012), apesar da esperada popularização do uso de LES com o desenvolvimento da tecnologia nos próximos anos, muitos casos para aplicações industriais e no ambiente acadêmico ainda requerem modelos mais simplificados. Nas aplicações de engenharia, os modelos de simulação RANS (do inglês *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) são os mais utilizados. Entre os modelos de simula-

ção LES e RANS, existem ainda modelos híbridos como o DES (do inglês *Detached Eddy Simulation*), unindo características de ambas simulações, com uma discretização espacial e temporal variável de acordo com a região do domínio.

Assim sendo, os próximos sub-itens apresentam uma revisão dos aspectos essenciais dos modelos de simulação que serão utilizados por esta pesquisa.

2.5.2.1 Reynolds-Averaged Navier-Stokes – RANS

Os modelos de simulação fundamentados na decomposição de Reynolds são conhecidos como modelos RANS, modelos de fechamento em um ponto (do inglês *single-point closures*) ou modelos de fechamento local (do inglês *local closure*). A denominação RANS se deve ao fato das variáveis das equações de Navier-Stokes serem decompostas em uma parte média e outra flutuante. As demais nomenclaturas são devidas à variável turbulenta ser parametrizada a partir do gradiente do valor médio da variável no mesmo ponto ou local analisado (SOUZA et al., 2011).

As equações RANS são semelhantes as equações de Navier-Stokes, o que difere é o aparecimento de novos termos que representam a influência das flutuações turbulentas no escoamento. Esses novos termos são resolvidos por meio de modelos de turbulência (RAMALHO, 2016).

Como apresentado por Ferziger e Peric (2002), as equações médias de continuidade e momento podem ser descritas, para fluidos incompressíveis com propriedades constantes, em notação tensorial e coordenadas cartesianas como (considerando fluidos incompressíveis com propriedades constantes):

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho\bar{u}_i\bar{u}_j + \overline{\rho u'_i u'_j} \right) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial\bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.30)$$

onde $\bar{\tau}_{ij}$ são os componentes viscosos do tensor de tensão:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.31)$$

Para conservação das propriedades escalares médias, nos modelos RANS, a equação geral de transporte apresenta a seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho\bar{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho\bar{u}_j\bar{\phi} + \overline{\rho u'_j\phi'} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial\bar{\phi}}{\partial x_j} \right) \quad (2.32)$$

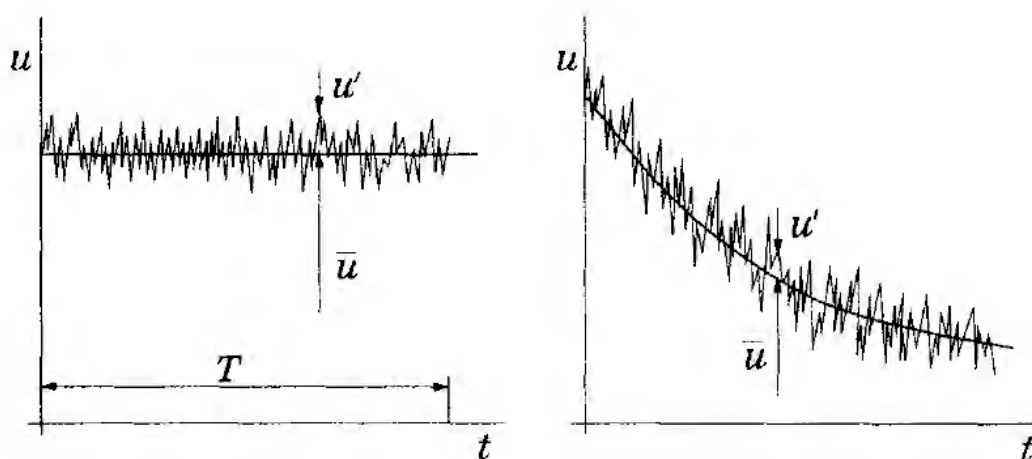
onde:

$\bar{\phi}$: parcela da variável (propriedade) média;

ϕ' : parcela da variável instantânea.

A Figura 2.16 apresenta a condição de uma propriedade (no caso da velocidade do escoamento) ao longo do tempo para escoamentos permanentes (à esquerda) e não-permanentes (à direita).

FIGURA 2.16 – VARIAÇÃO DA VELOCIDADE AO LONGO DO TEMPO PARA AS PARCELAS MÉDIAS \bar{u} E INSTANTÂNEAS u' EM MODELOS RANS PARA ESCOAMENTOS PERMANENTE E NÃO PERMANENTE



FONTE: Ferziger e Peric (2002)

Os termos da parcela $\overline{\rho u'_i u'_j}$ da Equação 2.30 são conhecidos como tensores de Reynolds (nove termos cisalhantes ao todo para escoamentos tridimensionais). De acordo com Andersson et al. (2012), esses termos são muito importantes, pois introduzem um acoplamento entre as partes média e flutuante do campo de velocidade. Os termos semelhantes (se $i = j$) são considerados não-nulas por serem o quadrado das flutuações de velocidade em um mesmo eixo. Para termos distintos ($i \neq j$) em escoamentos turbulentos, chamados segundos momentos, a correlação entre pares de diferentes componentes de velocidade devido aos vórtices também garantem que as tensões de cisalhamento sejam diferentes de zero – detalhes em Versteeg e Malalasekera (2007).

A presença das tensões de Reynolds e do fluxo escalar turbulento nas equações de conservação significa que estas não estão fechadas, ou seja, elas contêm mais variáveis do que equações. O fechamento requer o uso de algumas aproximações, que geralmente assumem a forma de prescrever o tensor de tensão de Reynolds e os fluxos escalares turbulentos em termos das quantidades médias (FERZIGER; PERIC, 2002).

Uma maneira de modelar as tensões de Reynolds é relacioná-las às variáveis dependentes que elas devem transportar. Uma aproximação simples é expressar o tensor de tensão de Reynolds em termos da velocidade média em si. Esse fechamento tem um caráter aproximado, o que significa que a solução das equações RANS é sempre uma aproximação. Os principais fechamentos podem ou não ser baseados em uma propriedade chamada de viscosidade turbulenta. A aproximação de Boussi-

nesq baseia-se no pressuposto de que os componentes da tensão de Reynolds são proporcionais aos gradientes médios de velocidade. A relação Boussinesq propõe que o transporte do momento por turbulência é um processo difusivo e que as tensões de Reynolds podem ser modeladas usando uma viscosidade turbulenta, que é análoga à viscosidade molecular (ANDERSSON et al., 2012). A aproximação de Boussinesq é:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.33)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u_i u_i}) \quad (2.34)$$

$$\mu_t = C \rho \vartheta l \quad (2.35)$$

onde:

- μ_t : viscosidade dinâmica turbulenta;
- δ : delta de Kronecker (para $i = j$, $\delta = 1$, caso contrário, 0);
- k : energia cinética turbulenta por unidade de massa;
- C : constante de proporcionalidade;
- ϑ : escala de velocidade do escoamento;
- l : comprimento de escala turbulenta.

O transporte turbulento de calor, massa e outras propriedades escalares pode ser modelado de maneira semelhante. Por analogia, o transporte turbulento de um escalar é considerado proporcional ao gradiente do valor médio da quantidade transportada (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

$$-\rho \overline{u'_i \phi'} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i} \quad (2.36)$$

onde:

- Γ_t : difusividade turbulenta.

Para calcular a viscosidade turbulenta no espaço e no tempo, existem diversos modelos propostos na literatura que se encaixam em três categorias: modelos algébricos ou de zero equação, modelos de uma e de duas equações diferenciais. Os modelos que produzem melhores resultados e são mais utilizados são aqueles que resolvem duas equações, uma para avaliar a escala característica de comprimento e uma para a escala característica de velocidade do movimento turbulento. A partir do cálculo dessas duas escalas é possível determinar a viscosidade turbulenta. A seguir, são apresentados os aspectos essenciais dos modelos de duas equações que são conhecidos por obter resultados eficientes.

Modelo *Standard* $k - \varepsilon$

O modelo *Standard* $k - \varepsilon$ descreve a turbulência por meio de duas variáveis, a energia cinética turbulenta k e a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta ε . As equações de transporte adicionadas para o fechamento do sistema relacionam essas variáveis com a viscosidade turbulenta μ_t pela seguinte expressão:

$$\mu_t = C \rho \nu l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.37)$$

onde:

C_μ : constante adimensional.

O modelo *Standard* $k - \varepsilon$ assume que o escoamento é totalmente turbulento e os efeitos da viscosidade molecular são desprezíveis. Para a resolução das duas equações de transporte das variáveis k e ε , este modelo baseia-se nas seguintes equações (FARIA, 2014):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.39)$$

onde:

ν_t : viscosidade cinemática turbulenta;

ν : viscosidade cinemática;

$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$: constantes adimensionais.

O modelo *Standard* $k - \varepsilon$ emprega os seguintes valores para as constantes adimensionais das Equações 2.38 e 2.39:

TABELA 2.2 – COEFICIENTES DO MODELO *STANDARD* $k - \varepsilon$

Constante	Valor
C_μ	0,09
$C_{\varepsilon 1}$	1,44
$C_{\varepsilon 2}$	1,92
σ_k	1,00
σ_ε	1,30

Fonte: Adaptado de Andersson et al. (2012)

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), o modelo *Standard* $k - \varepsilon$ é o modelo de duas equações mais simples, no qual apenas as condições iniciais e de contorno precisam ser fornecidas. Além disso, apresenta boa performance para escoamentos industriais e possui grande aceitação acadêmica devido à várias validações. Em contrapartida apresenta uma baixa performance para escoamentos não confinados, rotativos ou em fluxos no qual a anisotropia da turbulência é relevante para a simulação.

Modelo $k - \omega$ SST

o modelo de turbulência $k - \omega$, também com duas equações de transporte adicionais, utiliza k e a dissipação específica ω para o cálculo da turbulência. A variável ω deve ser interpretada como o inverso da escala de tempo na qual o processo de dissipação ocorre (ANDERSSON et al., 2012).

Existem diversas variações do modelo $k - \omega$. Neste trabalho, apresenta-se o modelo $k - \omega$ SST (sigla do inglês para *Shear Stress Transport*) desenvolvido por Menter (1993). Esse modelo é a combinação de dois modelos: o modelo *standard* $k - \varepsilon$ e o modelo *standard* $k - \omega$. Segundo Faria (2014), o modelo $k - \omega$ SST comporta-se como o modelo *standard* $k - \omega$ nas regiões próximas a parede e como o comportamento típico do modelo *standard* $k - \varepsilon$ nas regiões externas do escoamento.

Nesse modelo, encontra-se a inclusão dos efeitos de transporte no cálculo da viscosidade turbulenta:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega S F_2)} \quad \text{com} \quad a_1 = 0,31 \quad (2.40)$$

onde:

$$S = \sqrt{2 \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)} \quad (2.41)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (2.42)$$

E as equações de transporte das variáveis k e ω são, respectivamente:

$$\frac{D\rho k}{Dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.43)$$

$$\frac{D\rho \omega}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.44)$$

onde:

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right); \frac{4\rho\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right]^4 \right\} \quad (2.45)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (2.46)$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\beta^*} - \frac{\sigma_\omega \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (2.47)$$

onde β^* , β , σ_ω , $\sigma_{\omega 2}$, κ e σ_k são constantes apresentadas na Tabela 2.3.

Andersson et al. (2012) compararam os modelos padrões (*standard*) $k - \varepsilon$ e $k - \omega$ nas regiões próximas a contornos sólidos. Nessas regiões, notou-se um melhor desempenho do modelo $k - \omega$ padrão em comparação com o modelo $k - \varepsilon$ padrão. Contudo, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), os valores de turbulência ($k - \omega$) na entrada do domínio influenciam consideravelmente a representação de escoamentos livres no modelo $k - \omega$ padrão. Por isso, sugere-se o uso do modelo $k - \omega$ SST, o qual se baseia nos dois modelos padrões, aplicando o modelo $k - \omega$ padrão nas regiões próximas aos contornos, e $k - \varepsilon$ padrão no restante do escoamento, sendo pouco influenciável pelos valores de entrada aplicados na simulação.

TABELA 2.3 – COEFICIENTES DO MODELO $k - \omega$ SST

Constante	Valor
β^*	0,09
β	0,0750
σ_ω	0,5
$\sigma_{\omega 2}$	0,856
κ	0,41
σ_k	0,85

Fonte: Adaptado de Menter (1993)

Reynolds Stress Model – RSM

Os modelos RSM (*Reynolds Stress Models*) não são baseados no conceito de viscosidade turbulenta. Esses modelos são fundamentados em equações deduzidas para o transporte das componentes do tensor de Reynolds, os quais tendem a produzir melhores resultados para escoamentos turbulentos heterogêneos com forte anisotropia. Isto acontece porque a difusão turbulenta não é mais baseada em uma única propriedade escalar, como acontece nos modelos de viscosidade turbulenta, mas tratada separadamente nas equações de transporte das componentes do tensor de Reynolds. A desvantagem dessa abordagem é a complexidade das equações resultantes, as quais acabam necessitando de sub-modelos para possibilitar o fechamento do sistema.

Os primeiros estudos foram realizados por Launder, Reece e Rodi (1975), considerando a anisotropia das tensões de Reynolds no escoamento nas três direções do espaço. Adota-se $R_{ij} = -\tau_{ij} / \rho = \overline{u'_i u'_j}$ como as tensões de Reynolds, conforme Versteeg e Malalasekera (2007). A taxa de dissipação da energia cinética ε (Equação 2.39) faz parte da equação geral de transporte das tensões de Reynolds R_{ij} , apresentada

abaixo:

$$\underbrace{\frac{\partial R_{ij}}{\partial t}}_{\text{Var. de } R_{ij}} + \underbrace{C_{ij}}_{\text{Term. convectivo}} = \underbrace{P_{ij}}_{\text{Term. produtivo}} + \underbrace{D_{ij}}_{\text{Term. difusivo}} - \underbrace{\varepsilon_{ij}}_{\text{Tax. dissipativa}} + \underbrace{\Pi_{ij}}_{\text{Pressão turb.}} + \underbrace{\Omega_{ij}}_{\text{Term. rotativo}} \quad (2.48)$$

Comparadas com as equações de transporte de modelos de turbulência de duas equações, como $k - \varepsilon$, as equações de transporte das tensões de Reynolds (Equação 2.48) consideram duas parcelas adicionais: o termo Π_{ij} , representando a parcela do transporte gerada pelas pressões turbulentas e o termo Ω_{ij} , representando a parcela transportada devido à rotação gerada pelos efeitos direcionais das tensões de Reynolds.

Os termos da Equação 2.48 estão individualmente apresentados nas Equações 2.49 a 2.54. Detalhes dessas formulações e simplificações adotadas são apresentadas nos trabalhos de Andersson et al. (2012) e Launder, Reece e Rodi (1975).

$$C_{ij} = \frac{\partial(\rho \overline{u'_k u'_i u'_j})}{\partial x_k} \quad (2.49)$$

$$P_{ij} = - \left(R_{im} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_m} + R_{jm} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_m} \right) \quad (2.50)$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m} \right) \quad (2.51)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{4}{3} \nu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} \delta_{ij} \quad (2.52)$$

$$\Pi_{ij} = -C_1 \frac{2\nu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}}}{k} (R_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij}) - C_2 (P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij}) \quad (2.53)$$

$$\Omega_{ij} = -2\omega_k (\overline{u'_j u'_m} e_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} e_{jkm}) \quad (2.54)$$

onde:

ω_k : vetor rotativo;

e_{ijk} : símbolo alternado, semelhante ao delta de Kronecker. Valor positivo unitário (+1), se $i \neq j \neq k$ e em ordem cíclica; valor negativo unitário (-1), se $i \neq j \neq k$ e em ordem anti-cíclica; valor nulo (0) se dois ou mais índices forem iguais;

s'_{ij} : taxa de deformação flutuante;

$C_\mu, \sigma_k, C_1, C_2$: constantes de fechamento apresentadas na Tabela 2.4.

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), o modelo RSM representa a modelagem mais detalhada dos modelos de turbulência em RANS, com cálculos mais precisos das propriedades analisadas por meio das tensões de Reynolds resolvidas. Contudo,

requer o maior esforço computacional comparado aos demais modelos que utilizam da decomposição de Reynolds e não possui amplas validações como o modelo $k - \varepsilon$.

TABELA 2.4 – COEFICIENTES DO MODELO RSM

Constante	Valor
C_μ	0,09
C_1	1,80
C_2	0,60
σ_k	1,00

FONTE: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (2007)

Andersson et al. (2012) resumiram as principais vantagens e desvantagens de alguns modelos de turbulência, conforme visualizado na Tabela 2.7.

2.5.2.2 *Detached-Eddy Simulation* – DES

A metodologia de simulação DES, inicialmente proposta por Spalart et al. (2006), envolve uma aplicação híbrida das metodologias LES e RANS. Segundo Shur et al. (1999), o DES é uma solução numérica tridimensional transiente utilizando um modelo de turbulência, que funciona como um modelo submalha (SGS) em regiões suficientemente detalhadas da malha para realizar o LES e, nas demais regiões, como um modelo RANS. A união dos dois modelos tem como objetivo reduzir o esforço computacional nas regiões próximas às paredes geradas pelo detalhamento necessário na malha do LES, mantendo a representação física de escoamentos com valores elevados de Re das aplicações industriais (WILCOX, 2006).

O modelo DES utiliza um comprimento de escala variável L_{DES} , que pode depender de um parâmetro indireto do tamanho da malha computacional $C_{DES}\Delta$ e do comprimento de escala de turbulência L_{RANS} :

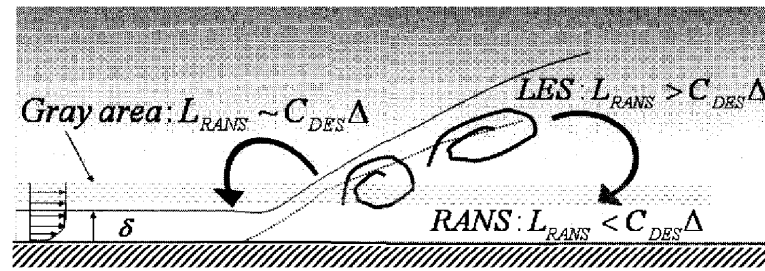
$$\begin{aligned} L_{DES} &= \min(L_{RANS}, C_{DES}\Delta) \\ \Delta &= \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z) \end{aligned} \quad (2.55)$$

onde:

- L_{DES} : comprimento de escala LES;
- L_{RANS} : comprimento de escala RANS;
- C_{DES} : constante relacionada as condições de contorno do modelo DES;
- $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$: comprimento nas dimensões celulares aos respectivos eixos;
- Δ ou (L_{LES}) : maior comprimento em uma das direções da célula.

A separação do domínio para o uso das diferentes metodologias de simulação (LES/RANS) no escoamento está ilustrado na Figura 2.17, com a espessura da camada limite representada pela letra δ .

FIGURA 2.17 – CONFIGURAÇÃO DA SOLUÇÃO DE ESCOAMENTO CONSIDERANDO A SIMULAÇÃO DES



FONTE: Adaptado Sagaut, Deck e Terracol (2006)

Nota-se que, na Figura 2.17, a região inferior da camada limite ($\delta < C_{DES}\Delta$) é modelada utilizando RANS devido ao elevado grau de anisotropia da malha computacional, comum nesta região, e flutuabilidade do campo de pressões naquele domínio. Nas regiões mais distantes do fundo do canal ($L_{RANS} > C_{DES}\Delta$), utiliza-se o modelo LES. A região intermediária entre o uso das duas soluções é chamada de zona cinza (*gray area*), onde $L_{RANS} \approx C_{DES}\Delta$. Estudos sobre as zonas cinzas são mais complexos, envolvendo os dois modelos de simulação mutuamente. Para mais detalhes, sugere-se a leitura dos itens 7.4.4 a 7.4.6 do trabalho de Sagaut, Deck e Terracol (2006).

Os valores de L_{RANS} e C_{DES} dependem do modelo de turbulência RANS escolhido. As formulações utilizadas em DES possuem variáveis e termos semelhantes a seus respectivos modelos de turbulência originais, como o de Spalart-Allmaras (RANS de 1 equação) e $k - \omega$. Na Tabela 2.5 estão apresentados alguns dos valores e termos mais utilizados na modelagem DES.

TABELA 2.5 – CONSTANTES E TERMOS DE FECHAMENTO NA SIMULAÇÃO DES

Constante/Termo	Valor/Equação
C_{DES}^{SA}	0,65
$C_{DES}^{k-\omega}$	0,78
$C_{DES}^{k-\varepsilon}$	0,61
$L_{RANS}^{k-\omega}$	$\frac{k^{1/2}}{C_{\mu}\omega}$

FONTE: Adaptado Sagaut, Deck e Terracol (2006)

Modelo Spalart-Allmaras DDES

O modelo Spalart-Allmaras *Delayed Detached Eddy Simulation* (DDES) baseia-se no modelo de uma equação Spalart-Allmaras DES onde considera uma viscosidade turbulenta modificada $\tilde{\nu}$.

A equação de transporte de $\tilde{\nu}$ é dada por:

$$\frac{D}{Dt}(\rho\tilde{\nu}) = \nabla \cdot (\rho D_{\tilde{\nu}}\tilde{\nu}) + \frac{C_{b2}}{\sigma_{\tilde{\nu}}}\rho|\nabla\tilde{\nu}|^2 + C_{b1}\rho\tilde{S}\tilde{\nu}(1-f_{t2}) - \left(C_{w1}f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2}f_{t2}\right)\rho\frac{\tilde{\nu}^2}{d^2} + S_{\tilde{\nu}} \quad (2.56)$$

Diferentemente do modelo Spalart-Allmaras DES, o comprimento da escala \tilde{d} é definido por:

$$\tilde{d} = \max [L_{RANS} - f_d, \max(L_{RANS} - L_{LES}, 0)] \quad (2.57)$$

onde:

$$\begin{aligned} L_{RANS} &= y \\ L_{LES} &= \Psi C_{DES} \Delta \end{aligned} \quad (2.58)$$

E, a função “*delay*” é dada por:

$$f_d = 1 - \tanh \left[(C_{d1} r_d)^{C_{d2}} \right] \quad (2.59)$$

Quando $f_d = 0$ é implementado o modelo de turbulência RANS e, quando $f_d = 1$ é aplicado o modelo DES. O parâmetro r_d é dado por:

$$r_d = \min \left(\frac{\nu_{eff}}{|\nabla \mathbf{u}| \kappa^2 y^2}, 10 \right) \quad (2.60)$$

Na Tabela 2.6 estão apresentados os valores e termos da modelagem DDES.

TABELA 2.6 – CONSTANTES E TERMOS DE FECHAMENTO NA SIMULAÇÃO DDES

Constante/Termo	Valor/Equação
σ_{ν_t}	2/3
C_{b1}	0,1355
C_{b2}	0,622
C_{w1}	$\frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1+C_{b2}}{\sigma_{\nu_t}}$

FONTE: Adaptado Spalart et al. (2006)

Outras informações referente ao modelo de fechamento Spalart-Allmaras DDES podem ser visualizadas em Spalart et al. (2006).

TABELA 2.7 – RESUMO DOS MODELOS DE TURBULÊNCIA

Modelo de Turbulência	Vantagens	Limitações
Modelos de 2 equações, <i>Standard</i> $k - \varepsilon$, <i>Realizable</i> $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST	Modelos completos no sentido de que as escalas de velocidade e comprimento de turbulência são previstas com equações de transporte. Bons resultados para muitas aplicações de engenharia, especialmente para a análise de tendências. Robusto, econômico e fácil de aplicar.	Limitado a uma suposição de viscosidade turbulenta. A viscosidade turbulenta é assumida como isotrópica. A convecção e difusão das tensões de cisalhamento são negligenciadas.
<i>Standard</i> $k - \varepsilon$	O modelo mais utilizado e validado.	Não é bom para jatos circulares e fluxos que envolvem uma curvatura significativa, vórtices, aceleração abrupta, separação e regiões com baixo número de Reynolds.
<i>Realizable</i> $k - \varepsilon$	A modificação do modelo <i>Standard</i> $k - \varepsilon$ fornece simulações aprimoradas para fluxos turbulentos e regiões de separação. Também pode lidar com jatos circulares.	Não é tão estável quanto o modelo <i>Standard</i> $k - \varepsilon$.
$k - \omega$	Funciona bem com baixo número de Reynolds. Não precisa de funções na parede. Funciona bem com gradientes de pressão adversa e fluxo de separação.	Precisa de uma malha fina perto da parede, primeiro ponto da grade em $y^+ < 5$. ¹
$k - \omega$ SST	Usa o modelo $k - \varepsilon$ no fluxo livre e o modelo $k - \omega$ na região delimitada por paredes. Funciona bem com gradientes de pressão adversa e fluxo de separação. Muitos autores recomendam que o modelo SST substitui o modelo $k - \varepsilon$ como a primeira opção.	Precisa de malha fina perto da parede. Prevê turbulência em regiões com grande deformação normal (regiões de estagnação e regiões com forte aceleração) e é melhor que o modelo $k - \varepsilon$.
<i>Reynolds Stress Model</i>	Aplicável ao fluxo complexo em que os modelos de viscosidade turbulenta falham. Bons resultados para escoamentos turbulentos heterogêneos com forte anisotropia.	Computacionalmente caro, com 11 equações de transporte. Vários termos nas equações de transporte devem ser fechados. Baixo desempenho para alguns fluxos devido aos fechamentos introduzidos no modelo.

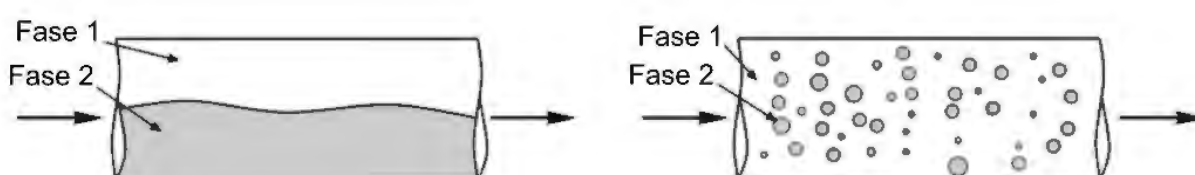
Fonte: Adaptado de Andersson et al. (2012)

¹ $y^+ \equiv \frac{u_*}{\mu} y$ onde y^+ é a distância adimensional da parede.

2.5.3 Simulação Computacional de Escoamentos Multifásicos

Escoamentos multifásicos existem quando mais de uma fase escoar simultaneamente. Por fase entende-se uma região do espaço delimitada por uma interface de espessura infinitesimal que encerra em seu interior um material com composição química heterogênea, propriedades de transporte e de estado definíveis e que seja separável por processos mecânicos. Os escoamentos multifásicos são classificados principalmente em dois grupos: escoamentos separados (estratificados) e escoamentos dispersos (Figura 2.18).

FIGURA 2.18 – ESCOAMENTO MULTIFÁSICO: À ESQUERDA ESCOAMENTO SEPARADO E À DIREITA ESCOAMENTO DISPERSO



FONTE: Adaptado de Andersson et al. (2012)

Andersson et al. (2012) classificam o escoamento disperso em dois tipos: densos ou diluídos, conforme o grau de separação das partículas da fase dispersa. Em escoamentos diluídos, o comportamento dominante é a fase contínua. Em escoamentos densos, as interações entre as partículas são dominantes. Além dos dois grupos principais (escoamentos separados e dispersos), o autor considera mais uma fase intermediária chamada de mista ou de transição.

2.5.3.1 Tipos de Modelos Computacionais Multifásicos

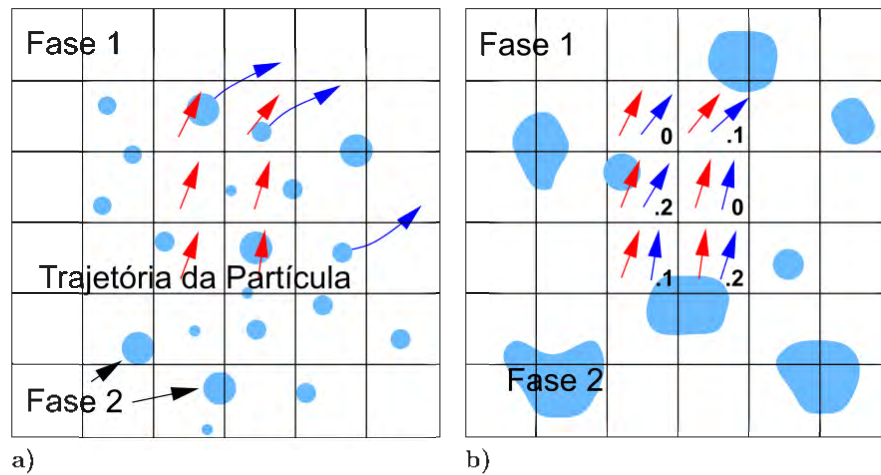
As duas principais abordagens para o cálculo de escoamentos multifásicos são os modelos Euleriano-Lagrangiano e Euleriano-Euleriano, ilustrados na Figura 2.19. No modelo Euleriano-Lagrangiano a fase fluida é modelada com uma abordagem contínua resolvendo-se as equações de Navier-Stokes e a fase dispersa é modelada como várias partículas individuais. O segundo modelo, Euleriano-Euleriano, aborda as fases como fluidos, por isso também é chamado de modelo de dois fluidos. (ANDERSSON et al., 2012).

Neste trabalho será adotado o modelo Euleriano-Euleriano, visto que trará simplificações que reduzirão o esforço computacional.

O modelo Euleriano-Euleriano é derivado da média do conjunto ou da média do volume. Uma importante propriedade que aparece na equação por causa da média é a fração de volume α_k — fração de volume de uma fase k qualquer (ANDERSSON et al., 2012). A fração de volume é a base da distribuição das fases e do tamanho do volume computacional. As equações locais são tomadas com médias dos volumes

considerando a densidade aparente de cada fase. As equações de dois fluidos para cada fase são dadas pelas Equações 2.61 a 2.63.

FIGURA 2.19 – ABORDAGENS DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO: MODELOS a) EULER-LAGRANGE E b) EULER-EULER



FONTE: Adaptado de Rusche (2002)

$$\sum_k \alpha_k = 1 \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k U_{i,k}}{\partial x_i} = - \sum_{l=1}^p (\dot{m}_{kl} - \dot{m}_{lk}) \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial \alpha_k \rho_k U_{i,k}}{\partial t} + \frac{\partial \alpha_k \rho_k U_{i,k} U_{j,k}}{\partial x_j} = -\alpha_k \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \alpha_k \tau_{ij,k}}{\partial x_k} + \alpha_k \rho_k g_i + F_{i,k} \quad (2.63)$$

onde:

- k : representa uma fase qualquer;
- p : número de fases;
- \dot{m}_{kl} : transporte de massa da fase k para l ;
- $F_{i,k}$: força de interação com outras fases.

Essas equações são difíceis de serem resolvidas pois são várias equações acopladas dividindo a mesma equação de pressão. Para a solução de τ e F_k são necessários modelos de fechamento adicionais. O termo τ representa a reologia da fase e, se o fluido for não newtoniano, são necessários modelos de alta complexidade. As forças presentes no termo F_k são descritas na Equação 2.64 (ANDERSSON et al., 2012).

$$m_d \frac{\partial U_{i,d}}{\partial t} = F_{i,Drag} + F_{i,Press} + F_{i,Virt} + F_{i,History} + F_{i,Bouy} + F_{i,Lift} + F_{i,Therm} + F_{i,Turb} + F_{i,Brown} \quad (2.64)$$

onde:

- $U_{i,d}$: velocidade linear da partícula;
- m_d : massa da partícula;
- $F_{i,Drag}$: força de arraste;
- $F_{i,Press}$: força de pressão;
- $F_{i,Virt}$: força de massa virtual devido à aceleração do fluido ao redor;
- $F_{i,History}$: força de história ou de Basset relacionada às mudanças nas condições de contorno;
- $F_{i,Bouy}$: força devido à gravidade;
- $F_{i,Lift}$: força de sustentação de Saffman e Magnus;
- $F_{i,Therm}$: força termoforese (*thermophoretic*);
- $F_{i,Turb}$: força devido às flutuações turbulentas;
- $F_{i,Brown}$: força Browniana devido às colisões moleculares.

Todos os valores no modelo Euleriano-Euleriano são tratados como médios, diferentes dos valores calculados nos pontos. Assim, Andersson et al. (2012) salientam que, mesmo realizando-se um refinamento preciso da malha, as abordagens RANS e LES não se tornariam iguais a DNS. Todos os fenômenos são modelados por modelos de fechamento com exceção das quantidades derivadas da equação de quantidade de movimento.

Na abordagem Euleriana-Euleriana, tem-se dois métodos para o tratamento da superfície livre, o de mistura (escorregamento algébrico) e o *Volume of Fluid* (VoF), sendo o modelo VoF o utilizado para o presente estudo.

Modelo *Volume of Fluid* – VoF

A modelagem *Volume of Fluid* (VoF) é realizada para escoamentos multifásicos estratificados. Segundo Andersson et al. (2012), um dos principais objetivos da simulação de escoamentos estratificados é a correta caracterização da interface entre fluidos. O método VoF é baseado em um método de rastreamento de volume (*volume tracking*), cujo os diferentes fluidos são marcados por uma função indicadora associada à fração de volume.

Este método assume a condição de não deslizamento (*no slip*) na interface entre fluidos e, com isso, devem ser resolvidos os vórtices na escala de comprimento de Kolmogorov.

O método VoF utiliza uma equação de transporte para representar a fração de volume ocupada por um fluido ao longo do domínio computacional (Equação 2.65).

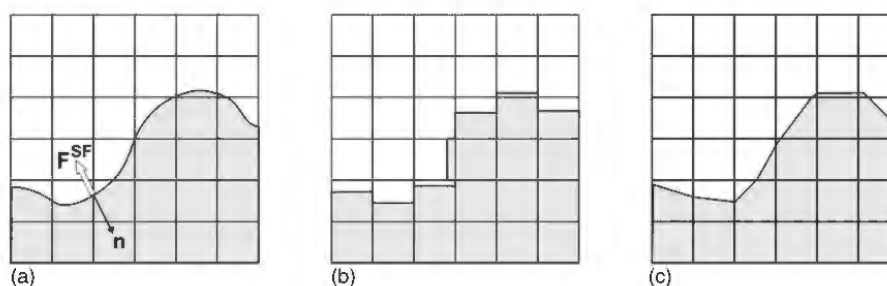
$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\alpha) = 0 \quad (2.65)$$

Ao considerar os fluidos água-ar, o método consiste em uma função α , que varia entre 0 e 1, sendo 1 quando a célula está totalmente ocupada por água e, zero quando

está ocupada apenas por ar. Em sendo assim, as células que apresentam valores intermediários devem conter a superfície livre do escoamento, como mencionado por Hirt e Nichols (1981).

A fração de volume também é utilizada para descrever a posição da interface entre fluidos (ver Figura 2.20). A direção normal da superfície coincide com a direção na qual o gradiente de α é mais elevado. Sabendo-se a direção normal e o valor de α nas células onde a superfície está, é possível definir uma “linha” dentro das células que se aproximam da interface água-ar. Segundo Andersson et al. (2012), por esse método ser considerado de precisão de primeira ordem, uma malha refinada é necessária para garantir a precisão dos resultados.

FIGURA 2.20 – MODELO *VOLUME OF FLUID* a) INTERFACE REAL ENTRE FLUIDOS, b) FRAÇÃO DE VOLUME CALCULADA PELO VoF E c) INTERPOLAÇÃO LINEAR DA SUPERFÍCIE



FONTE: Andersson et al. (2012)

Nesse método de rastreamento de volume que utiliza a fração de volume como função indicadora, é preciso limitar os efeitos de dispersão, difusão e enrugamento da superfície durante sua convecção. Portanto, deve-se adotar esquemas de discretização que garantam a limitação da fração de volume entre 0 e 1 (*bounded schemes*). Para evitar isso, o método VoF utiliza esquemas de convecção com reconstrução e compressão da superfície livre pela fração de volume antes do cálculo da advecção (RUSCHE, 2002).

2.5.4 OpenFOAM

O OpenFOAM (do inglês *Open Field Operation and Manipulation*) é um *software* com licença gratuita desenvolvido pelo CFD Direct e OpenCFD Ltda a partir do ano de 2004. Em linguagem C++ é um programa de operações e manipulações utilizado para solucionar problemas nas diversas áreas da mecânica do contínuo, e que possibilita a edição e adição de novas soluções sem depender de atualizações fechadas pela empresa criadora. Sistema operacional é o Linux ou subsistemas Linux – Windows 10 e VirtualBox.

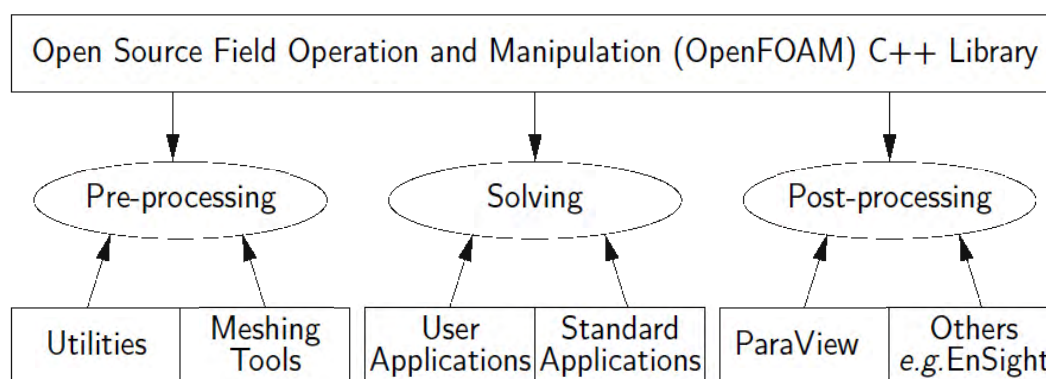
A mencionada plataforma possibilita resolver diversos tipos de problemas como escoamentos multifásicos, transferências de calor, simula domínios bidimensionais e tridimensionais ao utilizar do método dos volumes finitos. Sendo o seu uso neste trabalho específico para os processos de aeração de escoamentos de altas velocidades, em particular na calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia.

Para tanto, de acordo com o manual do usuário (GREENSHIELDS, 2019), o *software* trabalha no sentido de criar arquivos executáveis chamados *applications* (aplicações ou aplicativos).

Esses arquivos, por sua vez, são subdivididos em *solvers* e *utilities*. Os denominados *solvers* são arquivos criados para a solução de um problema específico de mecânica do contínuo. Enquanto os *utilities* são arquivos criados para realizar tarefas que envolvam a manipulação de dados.

Em sendo assim o *software* é estruturado da seguinte forma:

FIGURA 2.21 – VISÃO GERAL DA ESTRUTURA DO OpenFOAM



FONTE: Greenshields (2019)

Conforme a Figura 2.21 e Faria (2014), os processos de CFD se dividem em três etapas principais:

- pré-processamento (*pre-processing*): as informações das propriedades físicas, assim como as do escoamento a ser simulado são inseridas, para tanto se faz necessário definir o domínio de estudo, assim como a geometria do caso, que se dá através de malhas computacionais. Nessa etapa também é importante definir as propriedades do fluido, assim como as condições de contorno a serem adotadas;
- processamento (*solving*): é a etapa onde os dados são processados e resolvidos, e o tempo de processamento dependerá dos métodos de resolução e discretização adotados;

- pós-processamento (*post-processing*): consiste na análise dos resultados obtidos pela simulação.

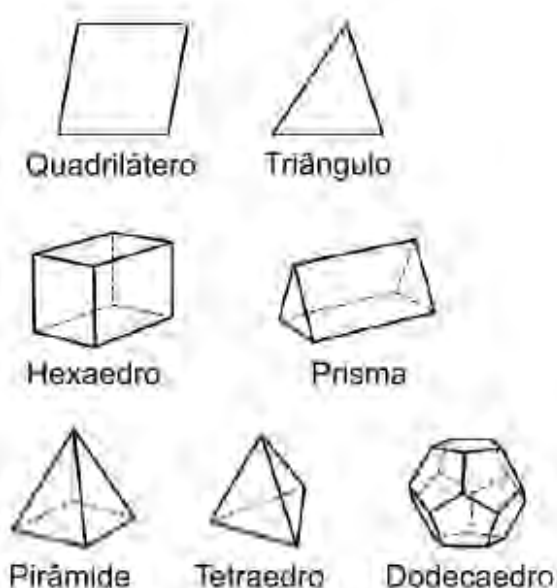
Na sequência são detalhados aspectos importantes de cada etapa.

2.5.4.1 Pré-Processamento

Na etapa de pré-processamento, o processo de criação de malha é de fundamental importância. De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), mais de 50% do tempo gasto em um projeto CFD é dedicado à definição da geometria do domínio e na geração da malha. De modo geral, quanto maior o número de células no domínio, mais preciso será o resultado. Tanto a acurácia quanto o custo computacional são dependentes do refinamento e da qualidade da malha. Uma malha de boa qualidade tem refinamento maior em locais de grandes gradientes das propriedades (velocidade, pressão, turbulência). O OpenFOAM possibilita o uso de malhas dinâmicas, método que identifica as regiões com variações rápidas nas propriedades e refina as malhas nesses locais ao longo da simulação.

As malhas são classificadas em duas categorias: estruturadas e não estruturadas. As malhas estruturadas são constituídas por elementos quadriláteros, não necessariamente retângulos, em malhas bidimensionais, e elementos com seis faces em malhas tridimensionais. Já as malhas não estruturadas são formadas por elementos quadriláteros e triangulares (bidimensional); tetraédricos, hexaédricos, piramidais, prismáticos e dodecaédricos em malhas tridimensionais (Figura 2.22).

FIGURA 2.22 – ELEMENTOS DE MALHAS ESTRUTURADAS E NÃO ESTRUTURADAS, 2D E 3D



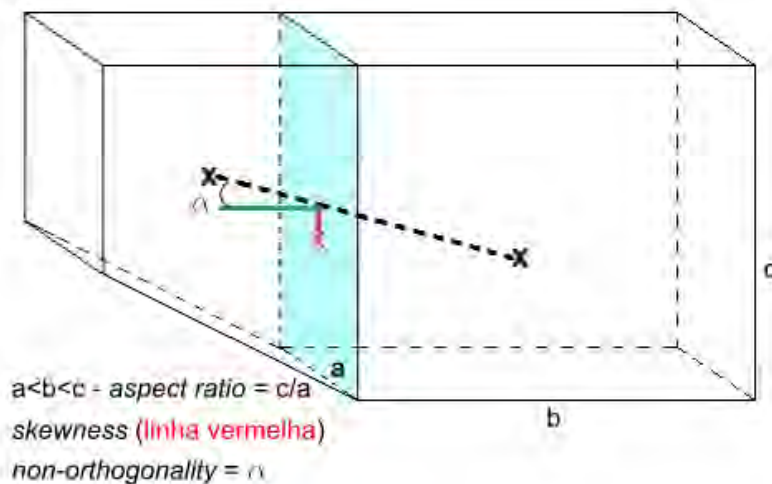
FONTE: Adaptado de Andersson et al. (2012)

Malhas estruturadas normalmente conduzem a simulações mais rápidas e exigem menos memória comparadas as malhas não estruturadas, além de apresentar propriedades numéricas melhores; entretanto são inadequadas para reproduzir geometrias complexas (BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015).

Existem diversos parâmetros importantes a serem considerados durante a geração da malha de modo que se respeitem os critérios de convergência de malha. O OpenFOAM disponibiliza uma ferramenta chamada `checkMesh` que verifica esses parâmetros, como forma de garantir que não aconteçam erros nas simulações provenientes de uma “malha ruim” (HOLZINGER, 2017). A Figura 2.23 exemplifica cada uma dessas condições. Os itens que são avaliados por essa ferramenta são (ANDERSSON et al., 2012):

- *Aspect Ratio*: representa a razão entre a maior e menor dimensão de uma mesma célula. Não há um limite, entretanto a literatura sugere que se mantenha o *aspect ratio* inferior a 5,0;
- *Openness*: apresenta se há “buracos” na geometria/malha nos contornos. Seu valor deve ser o mais próximo de zero;
- *Non-orthogonality*: mede o ângulo formado entre uma linha imaginária que conecta o centroide de duas células adjacentes e o vetor normal à face comum às duas células. Seu valor deve ser o mais próximo de zero;
- *Skewness*: mede a distância entre a linha imaginária que conecta o centroide de duas células adjacentes e o centro da face comum às duas células. Seu valor deve ser o mais próximo de zero.

FIGURA 2.23 – ESQUEMA DAS CONDIÇÕES AVALIADAS COM O `checkMesh`



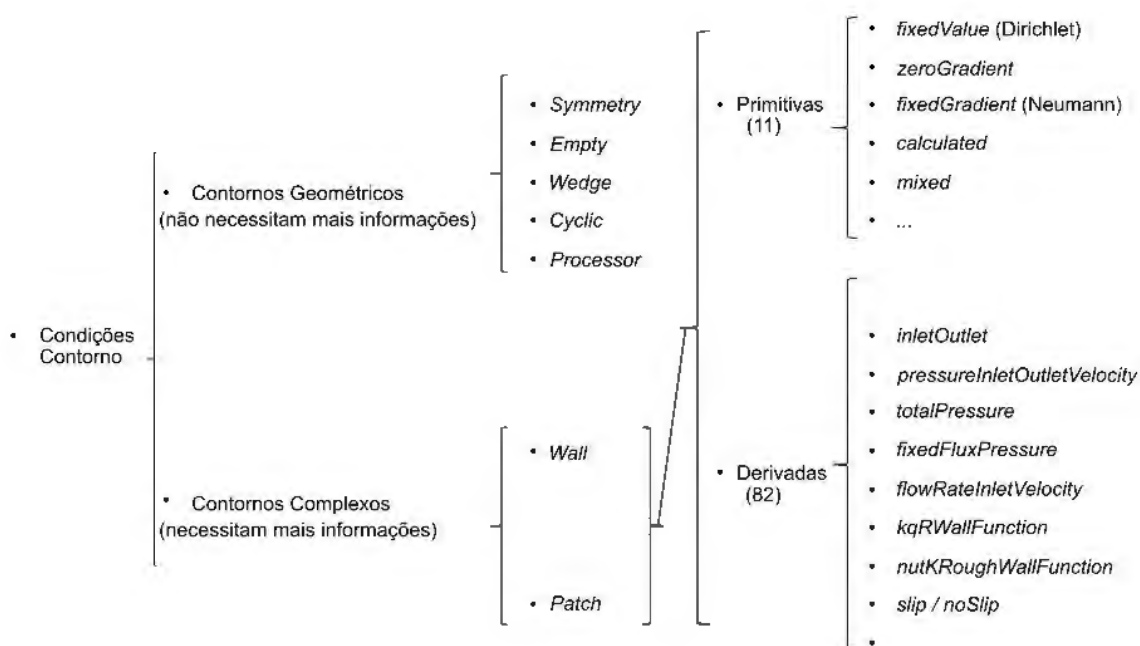
FONTE: O Autor (2021)

A geração de malhas no OpenFOAM pode ser realizada dentro do próprio programa com o uso dos geradores de malhas `blockMesh` e `snappyHexMesh` ou pode ser importada de outros *softwares*.

Ainda há um fator de fundamental importância na etapa de pré-processamento, as condições de contorno adotadas, as quais influenciam diretamente nos resultados obtidos. Tais condições, e algumas vezes também as condições iniciais, ditam a solução particular a ser obtida a partir das equações governantes. Esse tópico tem especial significado em CFD, pois qualquer solução numérica das equações governantes do regime de escoamento devem ser feitas de modo a exibir uma representação numérica forte e bem relacionada às próprias condições de contorno (ANDERSON, 1995). De acordo com Andersson et al. (2012), a definição apropriada das condições de contorno é tão importante quanto as equações diferenciais a serem resolvidas.

O OpenFOAM oferece diversos tipos de condições de contorno, alguns das quais estão categorizados na Figura 2.24.

FIGURA 2.24 – CONDIÇÕES DE CONTORNO NO OpenFOAM



FONTE: O Autor (2021)

As condições de contorno podem ser divididas em geométricas (*geometric boundaries*) e complexas (*complex boundaries*). Ao contrário das complexas, as geométricas não necessitam de informações adicionais. Elas são utilizadas para definir eixos de simetria (*simmetry plane*), contornos cíclicos (*cyclic*), geometrias axissimétricas (*wedge*), contornos dos subdomínios no caso de decomposição da simulação (*processor*), e contornos “vazios” (*empty*). A última é utilizada em simulações 2D, pois não existem equações a serem resolvidas no sentido transversal do fluxo.

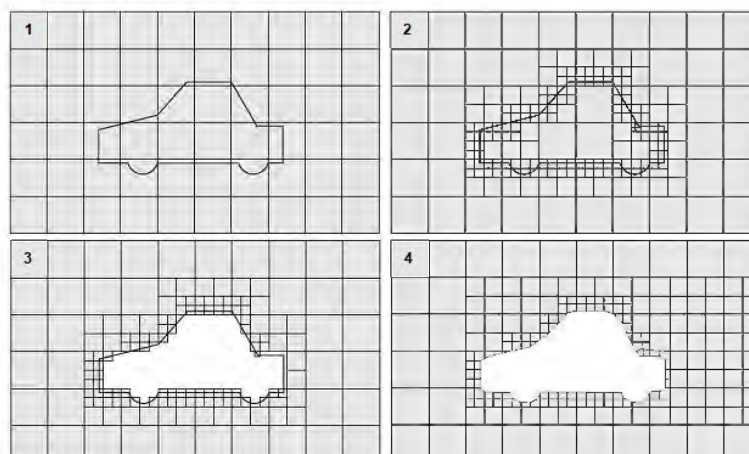
As condições complexas são subdivididas nos tipos *wall* e *patch*. A primeira é usada em contornos sólidos e a outra é mais genérica e se aplica onde as outras citadas não se aplicam. Ambas precisam de informações adicionais, que podem ser condições primitivas ou derivadas. São 11 condições primitivas e 82 condições derivadas delas. Por exemplo, estas condições podem ser utilizadas para definir um valor uniforme para uma variável (*fixedValue*) — condição de Dirichlet, um gradiente para uma variável (*fixedGradient* ou *zeroGradient*) — condição de Neumann, ou combinações de uma ou mais condições no mesmo contorno (HOLZINGER, 2017).

Gerador de Malha - snappyHexMesh

O `snappyHexMesh` é um gerador de malha não estruturado de elementos majoritariamente hexaédricos com contornos suavizados e aderidos aos limites do domínio. O `snappyHexMesh` corta e ajusta uma malha já existente para conformá-la a uma geometria definida em um arquivo `.stl` (*stereolithography*). O programa opera em três etapas:

- A primeira, denominada *castellating*, elimina todas as células fora do domínio de interesse demarcado pelo arquivo `.stl`, formando assim uma malha de aparência serrilhada ou “castelada”. É possível que, antes da eliminação das células, seja feito um refinamento junto aos contornos definidos no arquivo `.stl`;
- A segunda é o *snapping*, que ajusta a malha ao contorno, eliminando o efeito de serrilhamento;
- Por último, existe a opção *layer addition*, que adiciona camadas de células paralelas aos contornos para melhor simular o escoamento ao longo de contornos (capturar a formação de camada limite).

A Figura 2.25 apresenta um exemplo de utilização do `snappyHexMesh` para a geração da malha no entorno de um veículo. O `snappyHexMesh` é um programa relativamente complexo, com muitos parâmetros de ajuste e com uma curva de aprendizado íngreme. Quando adequadamente usado, suas malhas apresentam características desejáveis como baixas não-ortogonalidade e assimetria (*skewness*). As etapas e parâmetros envolvidos na utilização do `snappyHexMesh` estão descritos em Greenshields (2019).

FIGURA 2.25 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO `snappyHexMesh`

FONTE: Greenshields (2019)

2.5.4.2 Processamento

Referente a etapa de processamento (*solving*), a resolução de problemas por meio do OpenFOAM é baseada no método dos volumes finitos (MVF).

No MVF, o domínio é dividido em volumes de controle, também chamados células, onde as equações de conservação são aplicadas e as variáveis são calculadas nos centroides de cada volume de controle. O método utiliza o Teorema de Gauss ou da Divergência para transformar integrais de volume em integrais de superfície. A seguir, utiliza funções de interpolação para estimar as variáveis nas faces de cada volume de controle a partir dos valores nos centroides. Isso conduz a um sistema de equações algébricas para cada volume de controle (FERZIGER; PERIC, 2002).

O método dos volumes finitos é ideal para geometrias complexas pois pode acomodar qualquer tipo de malha. Este método é conservativo por natureza, pois o fluxo (convectivo e difusivo) através da face de um volume de controle é idêntico ao fluxo na mesma face do volume de controle vizinho.

A popularidade e flexibilidade da utilização do método dos volumes finitos está na possibilidade da discretização diretamente com valores físicos, não sendo necessária a transformação de coordenadas físicas para coordenadas computacionais (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016).

Vários algoritmos foram desenvolvidos no intuito de encontrar resultados numéricos aproximados para as equações de Navier-Stokes nas últimas décadas. Entretanto, nenhum deles constitui uma solução perfeita, visto que sua performance varia para cada caso simulado. É importante ressaltar que a performance dos algoritmos é avaliada, de maneira geral, em termos dos requisitos computacionais necessários e de estabilidade e, ocasionalmente, todos os algoritmos acabam por convergir para soluções similares

(BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015).

O algoritmo padrão em programas de CFD é o SIMPLE (*Semi Implicit Method of Pressure Linked Equations*). Esse algoritmo foi descrito pela primeira vez por Patankar e Spalding (1972), o qual trata de um processo iterativo de correções dos gradientes de pressão. O método é utilizado para simulações em regime permanente, ou seja, não considera o termo transiente e as derivadas no tempo. Além disso, o algoritmo é considerado não consistente por perder um termo e necessitar de um coeficiente de sub-relação para ser estável. Sem isso, o *solver* pode não convergir e indicar uma mensagem de divisão por zero quando utilizado no OpenFOAM. A explicação detalhada do método pode ser observada em Anderson (1995), Versteeg e Malalasekera (2007), Andersson et al. (2012), Holzmann (2017) (sugestão de leitura complementar).

Posteriormente, foi desenvolvido o algoritmo PISO (*Pressure implicit Split Operator*) que é utilizado para regime não permanente. Diferentemente do SIMPLE, o PISO inclui o termo perdido e é consistente no acoplamento pressão-velocidade, não precisando de coeficientes de sub-relaxação. Como critério de estabilidade, o número de Courant da simulação deve ser menor que um. Isso garante que a informação de uma célula chegue no máximo até a célula vizinha em um passo de tempo. Esse critério deve ser seguido por todas as células, ou seja, uma única célula que não atender o critério pode comprometer a solução completa (HOLZMANN, 2017). Conforme comentado por Brennan (2001), o método apresenta dificuldades quando utilizado em problemas de escoamentos multifásicos.

Para solucionar esse problema, foi desenvolvido o algoritmo PIMPLE que combina os algoritmos SIMPLE e PISO, sendo recomendado para casos transientes. Sua vantagem principal é aceitar números de Courant maiores que um, o que acelera a simulação (HOLZMANN, 2017). O conceito principal do algoritmo é: dentro de um passo de tempo, procura-se a solução de regime permanente aplicando-se coeficientes de sub-relaxação. Encontrada a solução, avança-se no tempo. Para tanto, são necessários *loops* externos de correção (*outer correction loops*) para garantia de convergência das partes explícitas das equações. Atingindo o critério de convergência no cálculo da solução em regime permanente, abandona-se o *outer correction loops* e avança-se no tempo – mais detalhes sobre o algoritmo pode ser observado em Holzmann (2017).

***Solver* interFoam - Escoamentos Multifásicos**

Neste estudo foram previstas simulações de escoamentos multifásicos, turbulentos e sobre estruturas hidráulicas, para a avaliação do processo de aeração. Logo, o OpenFoam dispõe de alguns *solvers* capazes de simular escoamentos desse tipo. Um deles é o *interFoam*, que resolve o escoamento de dois fluidos incompressíveis, imiscíveis e isotérmicos, e que utiliza o método VoF (*Volume of Fluid*) para a definição da superfície livre.

Outro *solver* que pode ser considerado neste estudo é o `multiphaseInterFoam`, similar ao primeiro, pois resolve escoamento de fluidos incompressíveis e permite a utilização de malha dinâmica, entretanto, não há limite do número de fluidos. Outra diferença é que este captura as interfaces dos fluidos e inclui os efeitos de tensão superficial e ângulo de contato para cada uma das fases.

Um terceiro *solver* aplicável é o `twoPhaseEulerFoam`, que resolve um sistema de dois fluidos compressíveis com uma das fases dispersa. Portanto, as simplificações que poderiam ser consideradas no caso de fluido incompressível não permanecem válidas. De acordo com Holzinger (2017), o `twoPhaseEulerFoam` utiliza modelos termo-físicos para solucionar as fases, sendo necessário que o usuário especifique as condições iniciais e de contorno de temperatura para ambas as fases, além das propriedades termo-físicas dos fluidos. Outra diferença importante quando comparado a outros *solvers* é de que os dados gerados de cada fase são salvos separadamente em arquivos com os nomes da propriedade em questão e da fase a que ela se refere. Por exemplo, existem arquivos de velocidade `U.water` e `U.air`.

Nesse estudo é empregado o *solver* `interFoam`, visto que possui maior aplicabilidade na engenharia hidráulica (MANAFPOUR; EBRAHIMNEZHADIAN, 2017). A seguir, apresentam-se algumas informações sobre esse *solver*.

Conforme comentado anteriormente e descrito no Greenshields (2019), o `interFoam` resolve problemas de escoamento para dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis e, que utiliza o modelo VoF na definição da interface entre os fluidos. Esse módulo utiliza o algoritmo PIMPLE e uma forma modificada p_rgh para o termo de pressão:

$$p_rgh = p - \rho(g \cdot h) \quad (2.66)$$

onde h é a distância vertical entre o ponto considerado e a origem do sistema de coordenadas.

Substituindo a Equação 2.66 na equação de conservação de quantidade de movimento e, adotando $p_rgh = p'$, obtém-se uma nova expressão:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p' - g h \nabla \rho \quad (2.67)$$

Como o `interFoam` considera os fluidos incompressíveis, a última parcela da Equação 2.67 é anulada.

O `interFoam` resolve também uma equação de transporte para a fração de volume α , variável de 0 a 1, também chamada “indicador de fase”:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \alpha) + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (2.68)$$

onde:

\mathbf{u}_r : vetor de velocidade relativa, também chamado de velocidade de compressão.

Apenas uma equação de transporte de fração de volume é resolvida. A fração de volume da outra fase é o complemento da primeira, ou seja, $1 - \alpha$.

O terceiro termo do lado esquerdo da Equação 2.68 é chamado termo de compressão da interface entre fases. Sua dedução parte da consideração de equações de transporte distintas para cada fase:

$$\frac{\partial(1 - \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_g(1 - \alpha)) = 0 \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_l\alpha) = 0 \quad (2.70)$$

onde:

\mathbf{u}_l : vetor velocidade da fase líquida;

\mathbf{u}_g : vetor velocidade da fase gasosa.

Assumindo que as contribuições da fase líquida e da fase gasosa para a evolução da superfície livre são proporcionais à fração de cada fase e, definindo a velocidade \mathbf{u} do fluido efetivo no VoF com pesos ponderados, obtém-se:

$$\mathbf{u} = \alpha\mathbf{u}_l + (1 - \alpha)\mathbf{u}_g \quad (2.71)$$

que, substituída na Equação 2.69, origina a Equação 2.68.

O objetivo da nova parcela na Equação 2.68 é “comprimir” a superfície livre, tornando-a mais “fina” (*sharp*). O termo convectivo adicional contribui significativamente na formação de uma interface com melhor resolução, dispensando esquemas especiais para a convecção. É importante destacar que esse termo só aparece na região de fronteira entre as duas fases e, portanto, não afeta o resultado da simulação (DAMINÁN, 2004).

As equações 2.67 e 2.68 são apresentadas por Carvalho, Beg e Lopes (2019) com alguns detalhes e origem do equacionamento do `interFoam`. Os autores sugerem o uso de esquemas menos dispersivos nesse módulo para torná-lo mais eficaz. Foi utilizado o esquema de discretização Van-Leer (ANDERSSON et al., 2012) para a solução do termo convectivo da Equação 2.68. Para a solução da equação do VoF, foi utilizado o MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solutions*) no intuito de obter a superfície livre o mais fina possível. Também utilizou-se o esquema TVD (*Total Variation Diminishing*) (BLAZEK, 2007) com forma limitada de diferenciação central nos termos convectivos na Equação 2.67 (CARVALHO; BEG; LOPES, 2019).

2.5.4.3 Pós-Processamento

Para a etapa de pós-processamento, na qual são realizadas as análises dos resultados encontrados na simulação, o manual do OpenFOAM sugere a utilização

do ParaView[®], programa livre e de código aberto incluso na instalação padrão do OpenFOAM (Figura 2.21). Essa ferramenta permite visualizar o desenvolvimento do escoamento ao longo do tempo, assim como manipulação da visualização (plotagem de contornos, valores, vetores, planos de corte e linhas de fluxo), extrair gráficos e dados em pontos discretizados, possibilitando, por fim, avaliar a qualidade dos resultados da simulação. A ferramenta também pode ser utilizada na etapa de pré-processamento, para visualização da geometria, da malha e das condições de contorno.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para estudar o processo de aeração foi realizada a partir da simulação computacional do escoamento na calha do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia. O modelo computacional foi desenvolvido por meio do *software* OpenFOAM, o qual permite simular as condições do escoamento com base no Método dos Volumes Finitos, conforme já exposto anteriormente no item 2.5.3.1.

As simulações computacionais consistiram em reproduzir o vertedouro parcial (malhas tridimensionais) da usina nas seguintes escalas geométricas: 1:1 e 1:30. Os resultados obtidos nessa etapa foram comparados com dados de protótipo e de modelo físico disponíveis na literatura (PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b; PINTO; NEIDERT; OTA, 1982a). Esses resultados referem-se a valores de vazão de ar (Q_a), comprimento do jato na região do sistema de aeração (L) e velocidade média abaixo do jato de água (U).

Além da análise quantitativa dos resultados, também foi realizada uma análise qualitativa para avaliar se o comportamento geral do escoamento foi reproduzido adequadamente pelo modelo numérico. E, no caso de uma representação insatisfatória, identificar as modificações necessárias a serem implementadas a fim de obter uma simulação confiável.

A seguir, são apresentadas as características gerais da UHE de Foz do Areia com enfoque nas dimensões do projeto da calha do vertedouro e das torres verticais localizadas nos muros e nos degraus da calha (sistema de aeração). Posteriormente, é apresentada a revisão da metodologia da simulação computacional aplicada ao estudo do processo de aeração em escoamentos de altas velocidades.

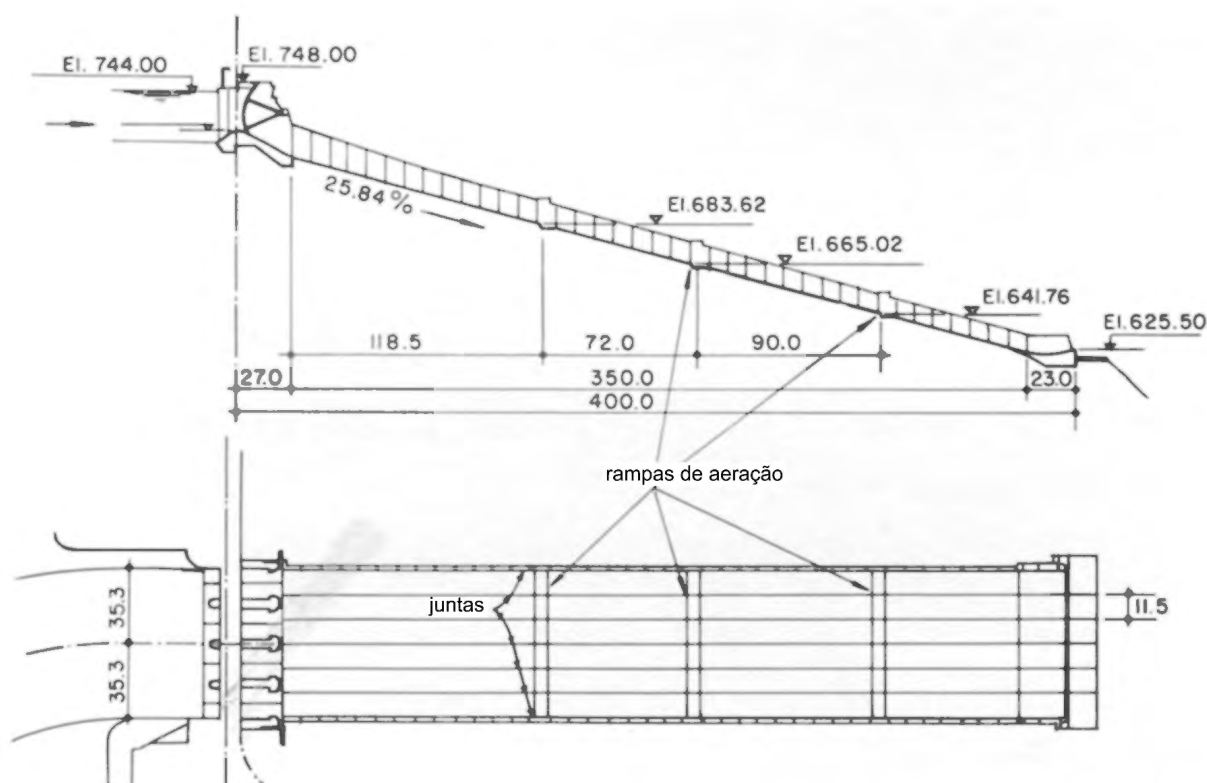
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO VERTEDOIRO DA UHE DE FOZ DO AREIA

A Usina Hidrelétrica de Foz do Areia, localizada no rio Iguaçu no município de Pinhão no estado do Paraná, possui potência instalada de 2.500 MW. O vertedouro projetado para descarregar uma vazão máxima de 11.000 m³/s possui 4 vãos com 14,5 m de largura. Em condições normais, opera com o nível do reservatório na elevação 744,0 m e é controlado por 4 comportas tipo segmento.

A calha do vertedouro possui 350 m de comprimento (medida horizontal) com inclinação de 25,84% e largura de 70,6 m. Ao final da calha, há um defletor com cota na elevação 625,50 m que lança a vazão descarregada por meio de um salto de esqui. As características gerais do vertedouro estão apresentadas na Figura 3.1.

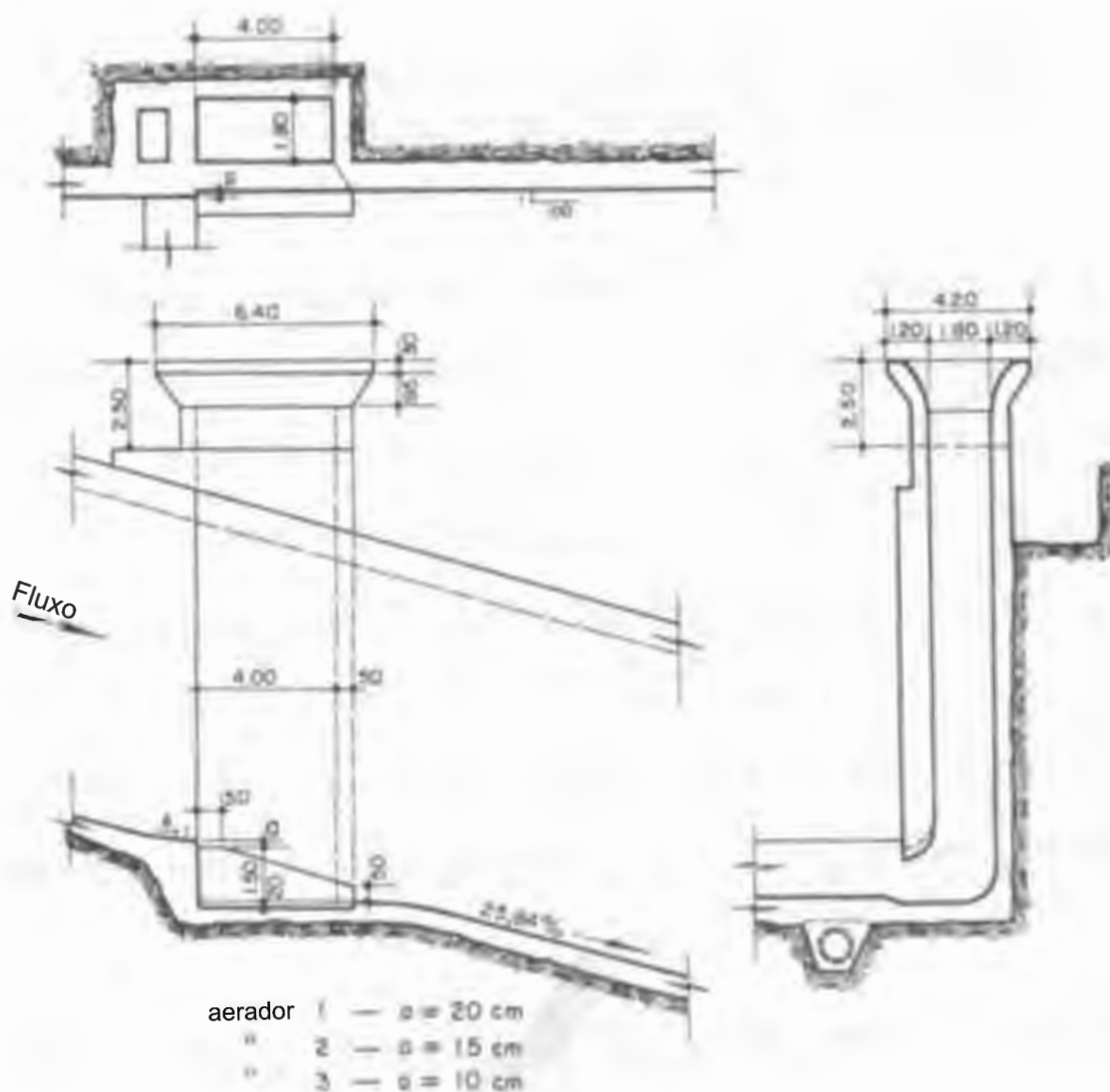
A calha do vertedouro possui 3 sistemas de aeração com torres laterais verticais localizadas nos muros e nos degraus, o que permite a incorporação de ar para dentro do fluxo de água com o objetivo de atenuar o efeito de cavitação. As torres do sistema de aeração possuem 4,00 m de comprimento e 1,80 m de largura. Os degraus de aeração possuem 1,50 m de altura e 4,50 m de comprimento. As rampas de aeração, localizadas imediatamente a montante dos degraus, possuem altura de 20, 15 e 10 cm, nos aeradores 1, 2 e 3, respectivamente. As dimensões gerais do sistema de aeração estão apresentadas na Figura 3.2

FIGURA 3.1 – DIMENSÕES GERAIS DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA (PERFIL E PLANTA)



FONTE: Adaptado de Pinto, Neidert e Ota (1982a)

FIGURA 3.2 – DIMENSÕES GERAIS DAS TORRES VERTICAIS (ENTRADA DE AR NO SISTEMA DE AERAÇÃO) DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA



FONTE: Adaptado de Pinto, Neidert e Ota (1982a)

3.2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

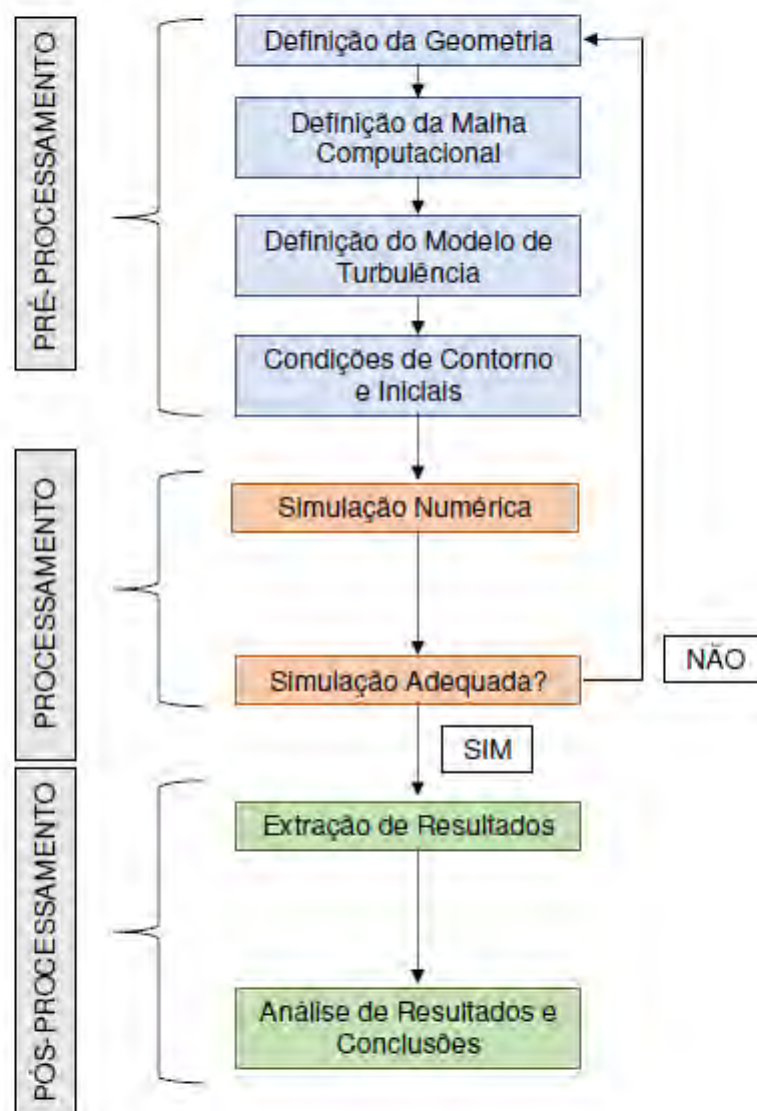
A metodologia adotada para o desenvolvimento do presente trabalho consistiu em simular parcialmente a calha do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia considerando uma condição de operação e utilizando o *software* OpenFOAM. Foi simulado o vertimento de 535 m³/s, condição na qual foi registrada a maior proporção de entrada de ar no sistema de aeração (β), conforme resultados disponíveis em modelo reduzido e protótipo publicados por Pinto, Neidert e Ota (1982a). As simulações numéricas foram realizadas considerando meia largura da calha do vertedouro, portanto, a vazão de imposição foi de 267,5 m³/s.

Todas as simulações numéricas foram realizadas em uma máquina com as

seguintes especificações: processador Intel® Core™ I7, 8700 K (8ª Geração), 6 núcleos físicos e 12 *threads*, 4,2GHz e 64Gb RAM.

O fluxograma apresentado na Figura 3.3 representa simplificada o processo de modelagem numérica aplicado neste estudo, cujas etapas estão descritas na sequência.

FIGURA 3.3 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE UMA SIMULAÇÃO



FONTE: Adaptado de (ARAUJO, 2014)

3.2.1 Definição da Geometria do Problema

A princípio, foi determinada a geometria a ser simulada, bem como o domínio geral do problema. Conforme apresentado por Araujo (2014), a maneira mais eficaz de se definir uma geometria adequada e eficiente é ter em mente o que se espera do modelo numérico.

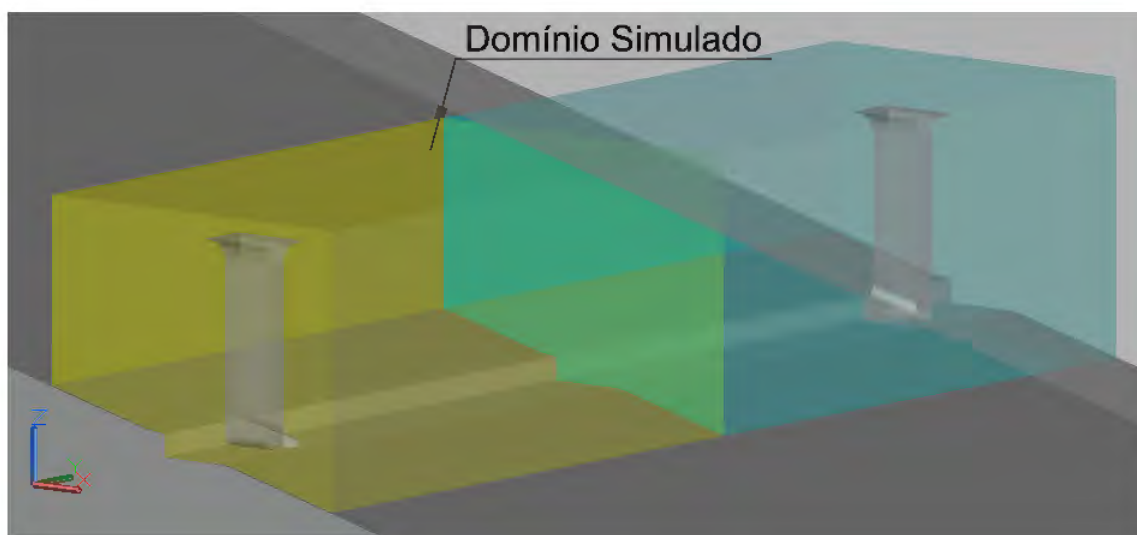
Visto que este trabalho tem por objetivo principal estudar o processo de aeração através de simulações numéricas, considerou-se desnecessário avaliar o escoamento em toda a extensão da calha. Dessa forma, o escoamento foi representado apenas no primeiro sistema de aeração. O domínio da geometria possui 26 m de comprimento - 10,5 m a montante do degrau do sistema de aeração e 15,5 a jusante do mesmo.

Preliminarmente, foram realizadas simulações com representação total (70,6 m) e parcial (35,3 m) da largura da calha (Figura 3.4) e os resultados indicaram resultados similares. Por esse motivo, adotaram-se exclusivamente simulações com meia largura da calha com representação apenas da torre de aeração direita.

Definido o domínio do problema, é importante averiguar o grau necessário de detalhamento e a representação da geometria. O grau de refinamento influencia diretamente no tempo de simulação e a representação inadequada da geometria pode gerar zonas de instabilidade numérica e causar a não convergência da simulação.

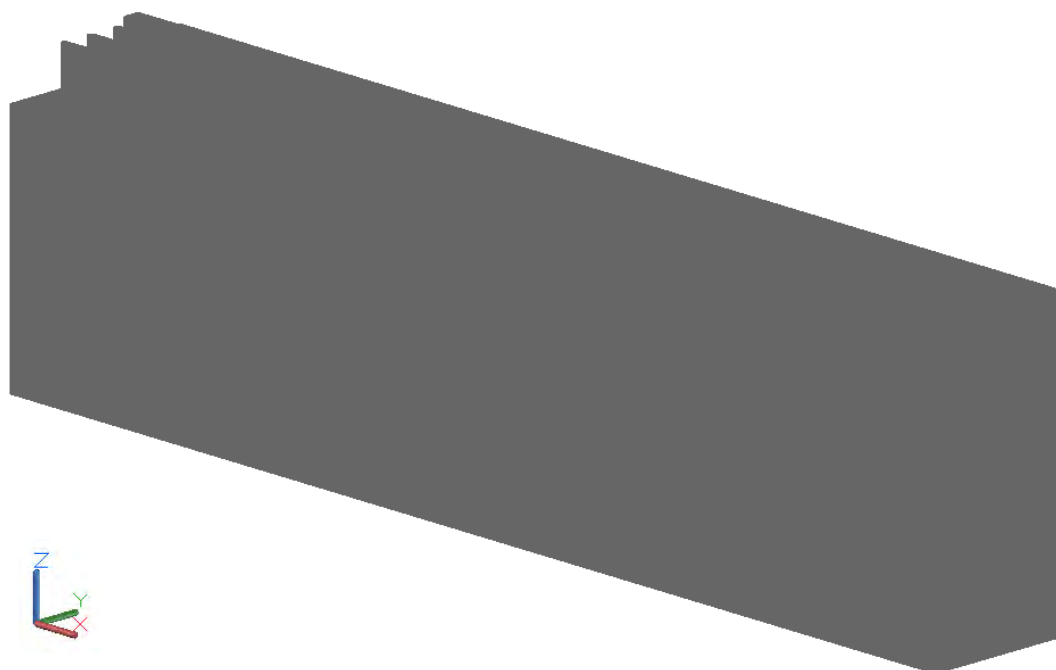
A geometria da calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia, incluindo o sistema de aeração, foi modelada por meio do *software* AutoCAD e exportada como um arquivo do tipo *stereolithography* (extensão .stl), o qual é utilizado no OpenFOAM para geração da malha computacional (Figuras 3.5). O arquivo *stereolithography* descreve a superfície de um objeto tridimensional por meio de uma superfície não estruturada de triângulos.

FIGURA 3.4 – DOMÍNIO ESTUDADO - ARQUIVO .STL



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 3.5 – DESENHO .STL DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA



FONTE: O Autor (2021)

3.2.2 Geração da Malha Computacional

Após a definição da geometria de estudo e a criação do arquivo *stereolithography*, foi determinada a malha computacional, composta por células que discretizam o domínio (Figura 3.6). O desenvolvimento da malha computacional respeitou critérios de convergência, tendo em vista a obtenção de resultados confiáveis e em acordo com as equações governantes do fenômeno simulado. Os parâmetros avaliados foram: *Aspect Ratio*, *Openness*, *Non-orthogonality* e *Skewness*.

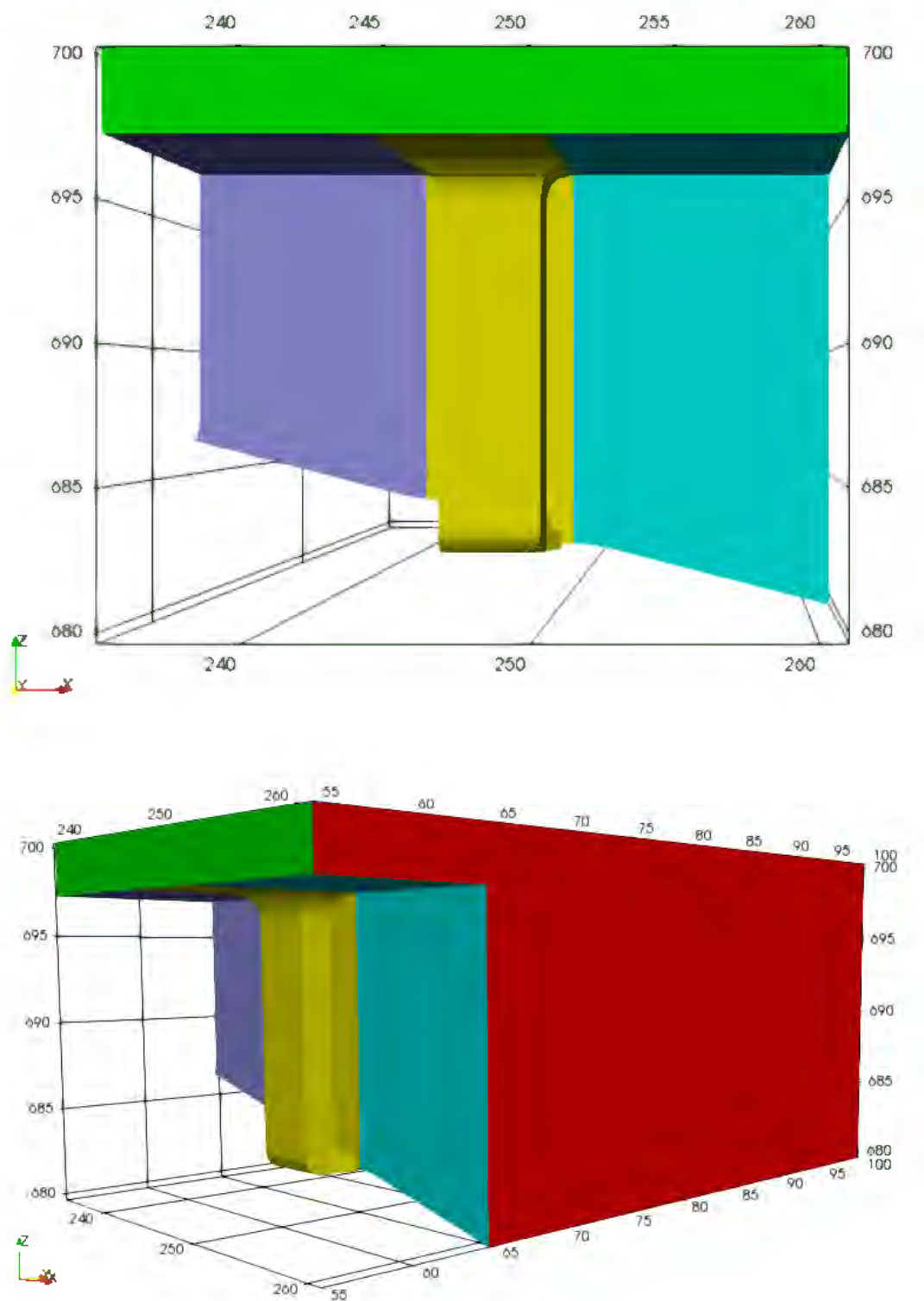
A qualidade da malha também está diretamente relacionada ao grau de detalhamento que deverá ser realizado pelo modelador com base nos seus conhecimentos do fenômeno estudado. Entretanto, é necessário atentar-se com o grau de discretização utilizado, pois o custo computacional cresce demasiadamente com malhas cada vez mais refinadas, ou seja, células com dimensões pequenas elevam o tempo computacional, assim como a quantidade total de células do domínio computacional.

Visto que a demanda computacional está relacionada com o incremento da discretização, foi possível aplicar maiores refinamentos apenas em regiões particularmente interessantes ao estudo. Como a determinação do tamanho da malha pode ser variável no espaço, tornou-se viável uma representação adequada de geometrias mais complexas.

No presente trabalho, as regiões com maior discretização da malha computacional foram o bocal do túnel de aeração, a região inferior da torre, o degrau da calha do

vertedouro, assim como toda a região de escoamento de água, sendo que o escoamento a partir do degrau ganhou um refinamento maior em relação ao escoamento a montante do degrau.

FIGURA 3.6 – DOMÍNIO ESTUDADO - OpenFOAM



FONTE: O Autor (2021)

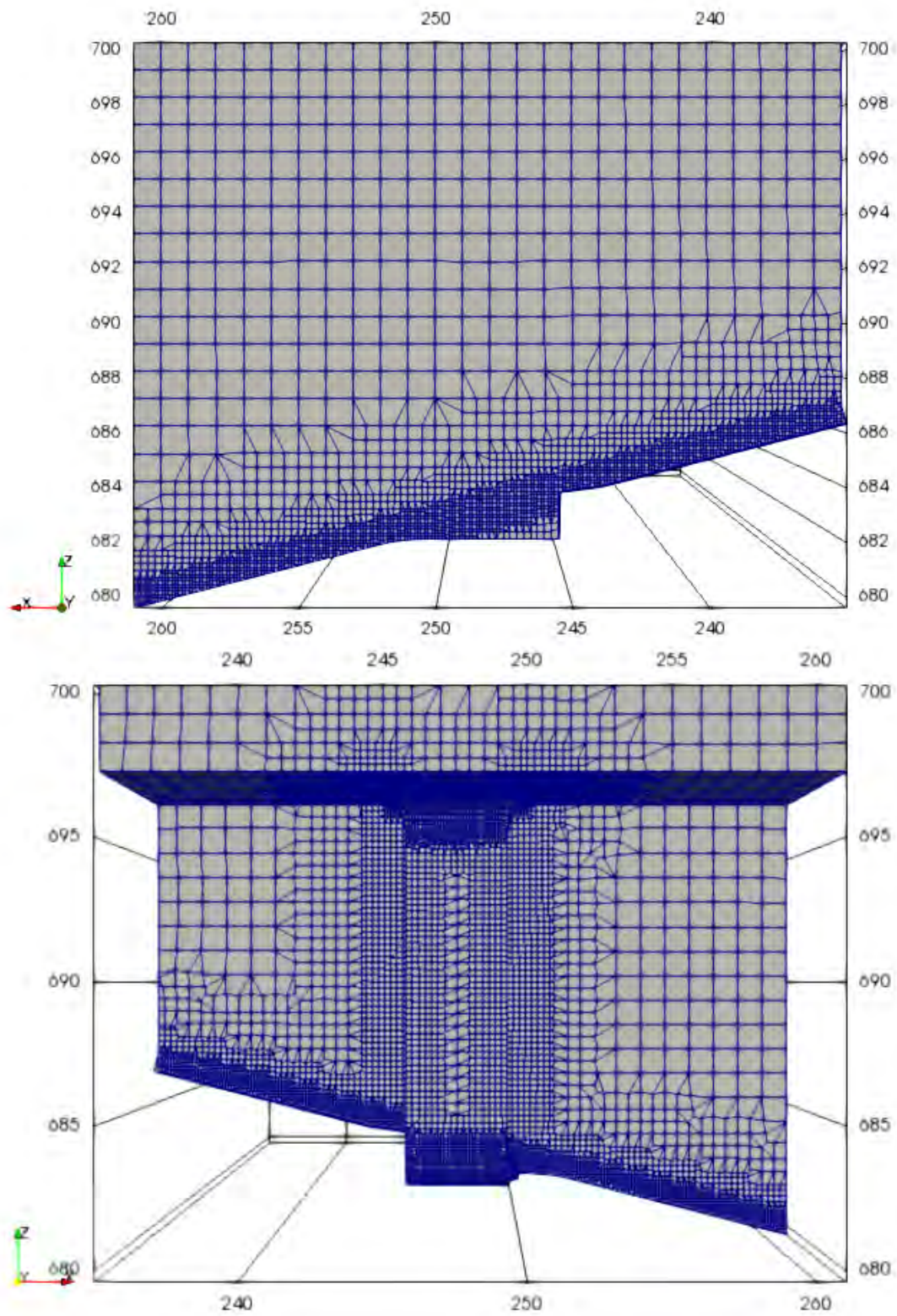
A qualidade da malha também é determinada pela capacidade da mesma em reproduzir, de maneira adequada, o escoamento a que se propõe. Neste trabalho, a malha computacional foi verificada através de análises de sensibilidade e comparação de resultados, avaliando os resultados extraídos do modelo numérico para diferentes graus de refinamento.

A construção da malha computacional foi realizada com o uso dos geradores de malha `blockMesh` e `snappyHexMesh`, recursos do OpenFOAM. Inicialmente foi definida uma malha de elementos cúbicos com 1 m de aresta cada em todo o domínio (valores em protótipo). Na sequência, aplicaram-se refinamentos nas regiões de interesse e foram obtidas duas malhas com elementos cúbicos de 12,5 cm (Figura 3.7) e 6,25 cm (Figura 3.8) de aresta na região do escoamento.

Essas discretizações resultaram em um total de 712.664 células para a malha com refinamento máximo de 12,5 cm e 3.415.452 células para a malha com refinamento máximo de 6,25 cm. Observa-se que a discretização das células de 6,25 cm é quase o quádruplo de células em relação a anterior, o que levou um custo computacional bastante elevado. A Figura 3.9 apresenta com maiores detalhes o refinamento da malha na região inferior do túnel de aeração e do degrau da calha do vertedouro para a malha com refinamento máximo de 6,25 cm.

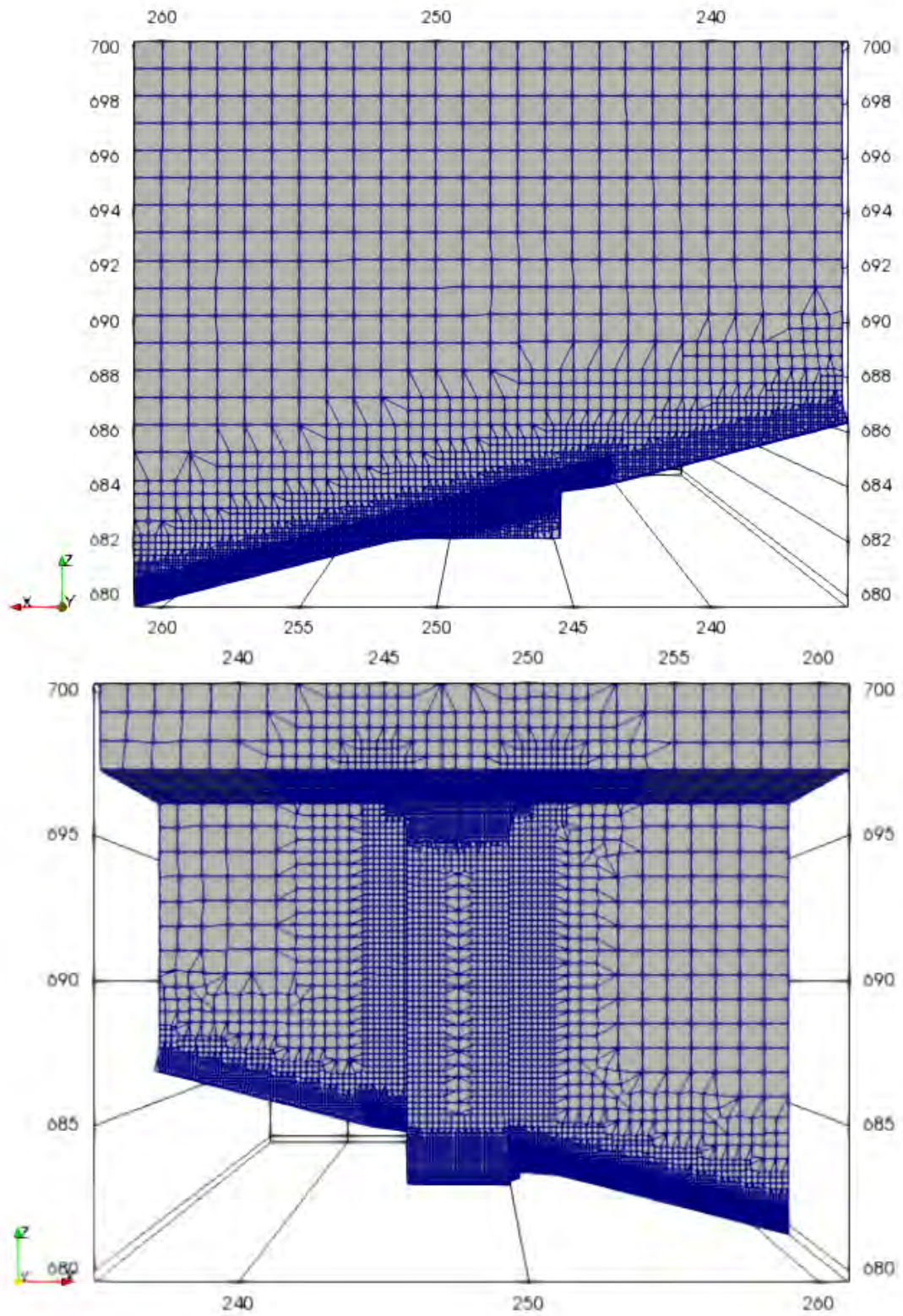
Para as simulações em escala de modelo físico foi aplicada a escala diretamente nas dimensões da malha de protótipo, operação realizada com o auxílio da ferramenta `convertToMeters` presente no `blockMesh`. Essa ferramenta permite alterar a escala da geometria uniformemente nos três eixos. A escala geométrica 1:30 foi construída com base na malha de 12,5 cm (malha da simulação de protótipo) e resultou em uma malha com refinamento máximo de 4,2 mm. O número total de células permaneceu o mesmo (712.664 células).

FIGURA 3.7 – MALHA COMPUTACIONAL - REFINAMENTO MÁXIMO 12.5 cm (ESCALA DE PROTÓTIPO)



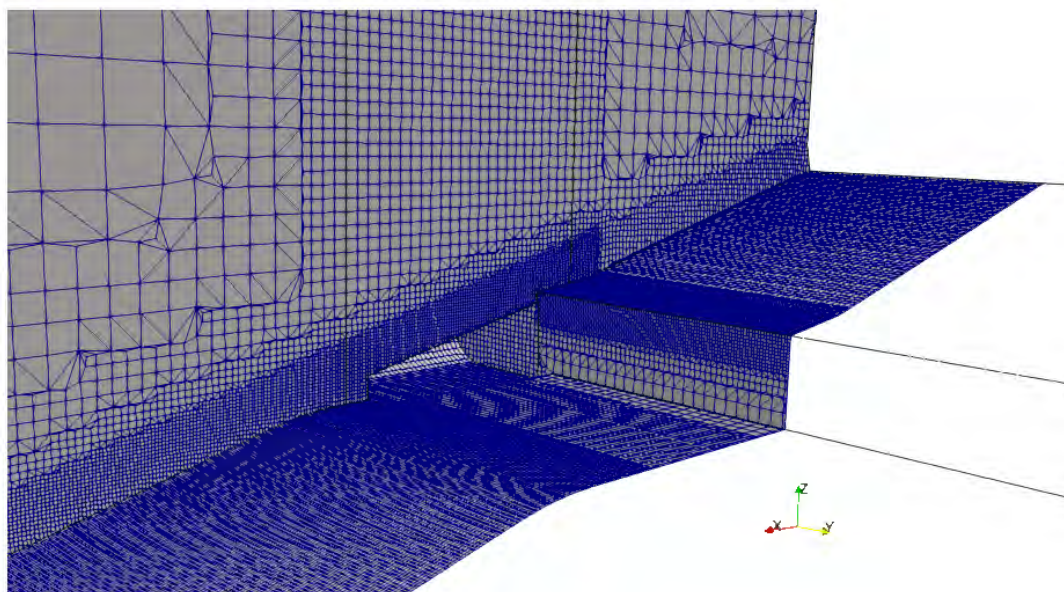
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 3.8 – MALHA COMPUTACIONAL - REFINAMENTO MÁXIMO 6.25 cm (ESCALA DE PROTÓTIPO)



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 3.9 – MALHA COMPUTACIONAL - DETALHES DA REGIÃO INFERIOR DO TÚNEL DE AERAÇÃO E DO DEGRAU DA CALHA DO VERTEDEURO



FONTE: O Autor (2021)

3.2.3 Definição dos Modelos de Simulação e de Turbulência do Escoamento

Os modelos de simulação adotados foram o RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), em conjunto com o modelo de fechamento $k - \omega$ SST (explicitado na seção 2.5.2); e o DES (*Detached-Eddy Simulation*), em conjunto com o modelo de fechamento Spalart-Allmaras DDES. A Figura 3.10 apresenta como é definido tais modelos de simulação e de turbulência no OpenFOAM. Todas as equações já fazem parte do próprio *software*, sendo apenas necessário selecionar qual o modelo a ser utilizado.

A escolha dos modelos de simulação de turbulência se deu a partir de análises preliminares obtidas durante a pesquisa e estudos disponíveis na literatura - (FARIA, 2014; BAYON-BARRACHINA; LOPEZ-JIMENEZ, 2015; CARVALHO; BEG; LOPES, 2019; ALWON et al., 2019).

3.2.4 Definição das Condições de Contorno e Iniciais

A definição apropriada das condições de contorno é tão importante quanto as equações diferenciais a serem resolvidas (ANDERSSON et al., 2012). As condições de contorno variam de modelo a modelo, dependem dos resultados esperados e dos dados iniciais de que se dispõe para a simulação. Neste estudo, as condições de contorno foram definidas nas faces do bloco da malha, ou seja, o modelo possui seis condições de contorno. Conforme apresentado na Figura 3.11, observa-se as seguintes faces com as respectivas condições de contorno: *inlet - patch*, *outlet - patch*, *right - wall*, *left - symmetry*, *atmosphere - patch* e *bottom - wall*.

FIGURA 3.10 – DEFINIÇÃO DO MODELO DE TURBULÊNCIA NO OpenFOAM

```

// *****

Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Operation  Website: https://openfoam.org
And        Version: 7
Manipulation

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       turbulenceProperties;
}
// *****

simulationType LES;

LES
{
  LESModel      SpalartAllmarasDDES;
  delta         cubeRootVol;
  printCoeffs   on;
  turbulence     on;
  cubeRootVolCoeffs
  {
    deltaCoeff  1;
  }
}

```

```

// *****

Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Operation  Website: https://openfoam.org
And        Version: 7
Manipulation

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       turbulenceProperties;
}
// *****

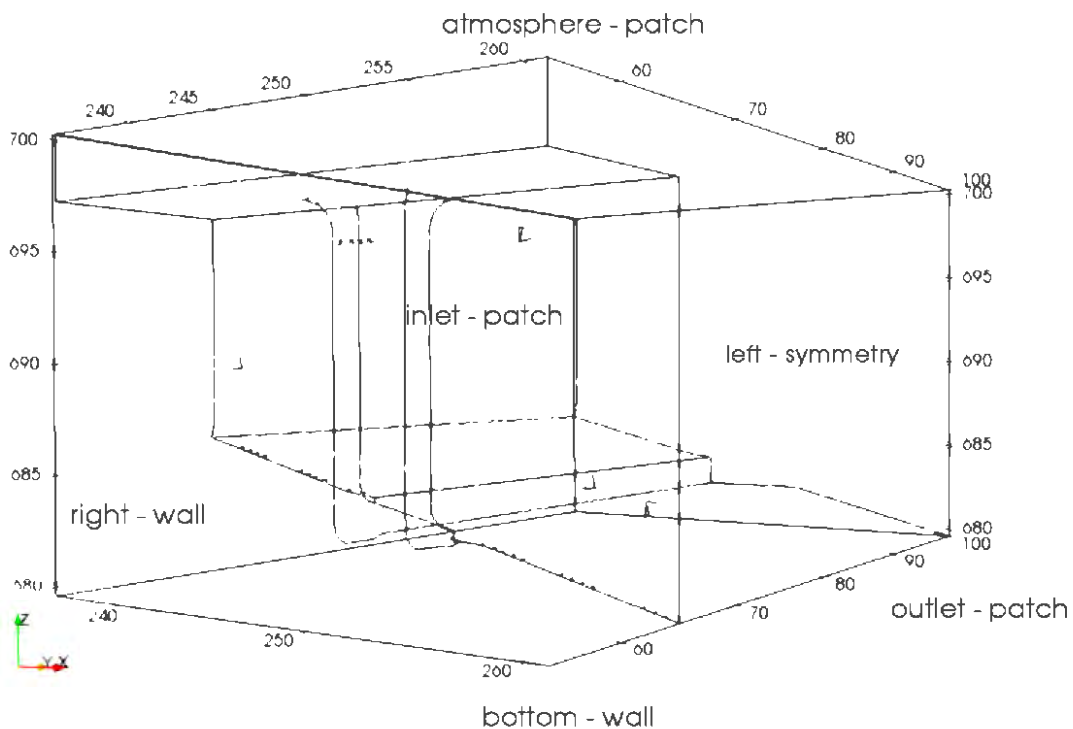
simulationType RAS;

RAS
{
  RASModel      kOmegaSST;
  turbulence     on;
  printCoeffs   on;
}
// *****

```

FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 3.11 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DAS SIMULAÇÕES



FONTE: O Autor (2021)

Conforme apresentado na seção 2.5.4.1, a condição de contorno geométrica *symmetry* não necessita de informações adicionais. Essa condição define um plano de simetria e é utilizada para que se possa ter um domínio de cálculo menor e, conseqüentemente, uma simulação mais rápida. Nessa condição, a face assume uma condição de *free-slip* e não há velocidades normais à fronteira, ou seja, não há escoamento através da fronteira.

As demais condições de contorno apresentadas (*wall* e *patch*) são consideradas complexas e necessitam de informações adicionais. A condição *wall* é mais genérica e é utilizada em contornos sólidos e indica que não há velocidades normais à fronteira. Entretanto, ainda é possível que existam velocidades tangenciais e, conseqüentemente, tensões tangenciais. Já a condição de contorno *patch* necessita de maior atenção, visto que existem 93 condições adicionais (primitivas e derivadas), conforme apresentado na Figura 2.24.

As condições de contorno foram selecionadas segundo o manual do usuário do OpenFOAM (GREENSHIELDS, 2019) com a finalidade de descrever um escoamento de superfície livre. A Tabela 3.1 apresenta as condições de contorno adotadas.

TABELA 3.1 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DO OpenFOAM

Fronteira/Variável	<i>inlet</i>	<i>outlet</i>	<i>right</i>
U	<i>flowRateInletVelocity</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>noSlip</i>
p_rgh	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedFluxPressure</i>
k	<i>fixedValue</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>kqRWallFunction</i>
ω	<i>fixedValue</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>omegaWallFunction</i>
<i>alpha.water</i>	<i>fixedValue</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>zeroGradient</i>
Fronteira/Variável	<i>bottom</i>	<i>atmosphere</i>	<i>left</i>
U	<i>noSlip</i>	<i>pressureInletOutletVelocity</i>	<i>symmetryPlane</i>
p_rgh	<i>fixedFluxPressure</i>	<i>totalPressure</i>	<i>symmetryPlane</i>
k	<i>kqRWallFunction</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>symmetryPlane</i>
ω	<i>omegaWallFunction</i>	<i>inletOutlet</i>	<i>symmetryPlane</i>
<i>alpha.water</i>	<i>zeroGradient</i>	<i>fixedValeu</i>	<i>symmetryPlane</i>

Fonte: O Autor (2021)

Também é necessária a definição das condições iniciais do escoamento no tempo zero da simulação, ou seja, antes do começo da simulação. Destaca-se que as condições iniciais do escoamento devem tentar reproduzir da melhor maneira possível qual é a condição final esperada. Desse modo, atingi-se a condição de escoamento permanente mais rapidamente. As propriedades utilizadas para configurar a condição inicial foram:

- *alpha.water*: define o grau de preenchimento da célula pelo escoamento utilizando valores entre 0 e 1, sendo que 0 representa células vazias e 1 representa a

célula totalmente preenchida pelo fluido. Na face *inlet* foi utilizado o valor 1 que corresponde que as células estão preenchidas com água;

- *nut*: define características das paredes. A rugosidade do modelo numérico foi baseada na rugosidade de protótipo e de modelo físico. A rugosidade de protótipo, nas faces *right* e *bottom*, foi definida com o valor igual a 0,003 m (K_s) e o coeficiente de rugosidade de 0,5 (C_s). A rugosidade de modelo físico representa uma superfície mais lisa devido à utilização de argamassa alisada ou acrílico, o qual possui uma rugosidade consideravelmente menor. Portanto, definiu-se os seguintes valores: $K_s = 0,0003$ m e $C_s = 0,5$;
- *U*: define as velocidades ou vazões. No caso deste trabalho foi definida a vazão de água de 535 m³/s (Q_w) na face *inlet*. Para isso, foi adicionado um *patch* com a altura do escoamento de 0,38 m - valor obtido por meio do *Direct Step Method* apresentado por Pinto, Neidert e Ota (1982a);
- *p_rgh*: define as pressões. Visto que estamos diante de um escoamento de superfície livre, foi considerado o valor 0;
- *k/ω*: define a energia cinética turbulenta e a dissipação de energia turbulenta específica.

3.2.5 Definição do Método de Solução

Com a finalidade de alcançar os objetivos deste estudo, o método de solução (*solver*) foi definido com o objetivo de simular escoamentos multifásicos e turbulentos para representar o processo de aeração no escoamento sob a calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia.

Conforme apresentado na seção 2.5.4.2, foi escolhida a abordagem do modelo multifásico Euleriano-Euleriano, visto que esse modelo possui simplificações que reduzem o esforço computacional. Deste modo, o *solver* utilizado foi o *interFoam* que resolve o escoamento de dois fluidos incompressíveis, imiscíveis e isotérmicos, e que utiliza o método VoF para a definição da superfície livre (explicação do método VoF na seção 2.5.3.1).

3.2.6 Execução do Cálculo Numérico

Nas simulações numéricas é importante definir o tempo de simulação, pois esse fator influencia diretamente no tempo computacional que será demandado. No caso de escoamento por vertedouro, a simulação deve ser executada por tempo suficiente para que se atinga a condição de escoamento permanente. Para a definição do tempo de simulação foi realizada inicialmente uma análise qualitativa do escoamento que

permitiu verificar, de maneira preliminar, a convergência do modelo em um escoamento permanente. Ou seja, essa análise consistiu puramente na visualização do escoamento, que teve por objetivo verificar o instante de tempo em que o escoamento não apresentou mudanças significativas no seu comportamento.

Na sequência, foi realizada uma análise quantitativa para determinar o tempo adequado de simulação. Essa análise consistiu em verificar dois parâmetros: os erros residuais da simulação (atinge-se uma simulação estável quando os erros residuais são inferiores a 10^{-3} - conforme descrito por Bayon-Barrachina e Lopez-Jimenez (2015)) e a vazão de saída (metodologia empregada no trabalho de Politano, Carrica e Weber (2009)). Deste modo, verificou-se que as simulações atingiram a condição estável após os 5 primeiros segundos e foi determinada uma amostra de 10 segundos de simulação, totalizando 15 segundos. Durante essa análise foi definida a frequência de amostragem dos resultados em 25 Hz, considerando que uma frequência muito elevada também influencia na demanda computacional.

Segundo o manual de utilização do OpenFOAM (ver Greenshields (2019)), para alcançar uma precisão temporal e uma estabilidade numérica é necessário que o número de Courant, exposto na Equação 3.1, seja igual ou menor que 1,0 (de acordo com o manual, recomenda-se utilizar um valor entre 0,2 e 0,5). Deste modo, foi utilizado um número de Courant máximo de 0,5.

$$Co = |u| \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1,0 \quad (3.1)$$

3.2.7 Análise dos Resultados

A extração e a análise dos resultados foram realizadas no programa livre e de código aberto ParaView®, sugestão apresentada pelo manual do OpenFOAM (GREENSHIELDS, 2019). Essa ferramenta permitiu visualizar o desenvolvimento do escoamento ao longo do tempo, assim como a manipulação da visualização e a extração dos resultados.

Foram realizadas análises referentes às seguintes variáveis: velocidade do escoamento (U), velocidade do ar na torre de aeração (U_{ar}), velocidades na região sob o jato de água (jato de água formado pelo degrau presente na calha do vertedouro), vazão de água de entrada ($Q_{w.inlet}$) e saída ($Q_{w.outlet}$), vazão de ar no túnel de aeração (Q_a) e comprimento do jato de água na região do sistema de aeração (L).

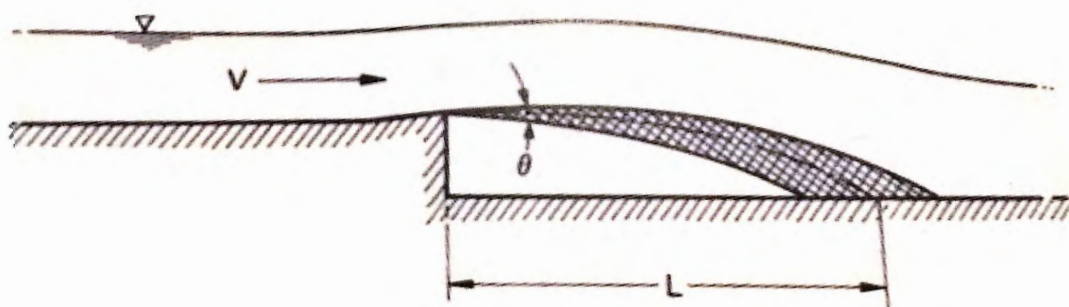
Os resultados obtidos pelas simulações numéricas foram posteriormente comparados com resultados de protótipo e de modelo físico disponíveis na literatura (PINTO; NEIDERT; OTA, 1982a; PINTO; NEIDERT; OTA, 1982b). Os resultados numéricos permitiram analisar se o processo de aeração da calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia foi representado adequadamente. Conforme apresentado na seção 3.2.6, os

dados numéricos analisados referem-se a média dos resultados obtidos nos últimos 10 segundos da simulação.

A primeira análise consistiu em verificar a estabilidade do escoamento, ou seja, avaliar se os resultados obtidos apresentaram a condição de escoamento permanente. Para tal, analisaram-se as vazões de água de entrada e de saída no modelo, metodologia empregada no estudo de Politano, Carrica e Weber (2009). Essa análise foi fundamental para garantir a convergência da simulação a um escoamento permanente.

Para a análise do comprimento do jato de água foi realizada uma abordagem qualitativa, ou seja, o comprimento do jato foi determinado visualmente durante os 10 segundos da simulação. Conforme observado na Figura 3.12, o comprimento do jato de água é definido como uma distância longitudinal a partir do degrau até o impacto da jato na calha do vertedouro.

FIGURA 3.12 – ESQUEMA PARA DETERMINAR O COMPRIMENTO DO JATO DE ÁGUA



FONTE: Adaptado de Pinto, Neidert e Ota (1982a)

Para a determinação da entrada de vazão de ar pelo túnel de aerção foi considerado a média da velocidade de ar no interior do túnel e aplicada na equação da vazão (Equação 3.2). Sendo que a área da seção do aerador é igual a 7,2 m² (4,0 m × 1,80 m).

$$Q_a = \frac{U_{ar}}{A} \quad (3.2)$$

Além disso, também foram verificadas as velocidades sob o jato de água em 3 posições. Dados de pressões de protótipo nessa região foram aplicados na Equação 3.3 - equação de Bernoulli - e a velocidade foi calculada, o que possibilitou a comparação com os resultados das simulações numéricas.

$$\frac{\Delta p}{\gamma_{ar}} = \frac{U_{ar}^2}{2g} \quad (3.3)$$

A análise dos resultados é apresentado no Capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados das simulações numéricas do escoamento sob a calha do vertedouro da UHE de Foz do areia, realizadas no âmbito desta dissertação, tendo como base os modelos descritos no capítulo anterior. Em uma primeira fase são apresentados os resultados das simulações em escala de protótipo. Em uma segunda fase apresentam-se os resultados numéricos obtidos com escala geométrica de 1:30. Por último, os resultados das simulações são confrontados com dados de modelo físico e de protótipo disponíveis em Pinto, Neidert e Ota (1982a), Pinto, Neidert e Ota (1982b).

4.1 ESCALA DE PROTÓTIPO - RANS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações numéricas com base no modelo de simulação *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* - RANS em conjunto com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST.

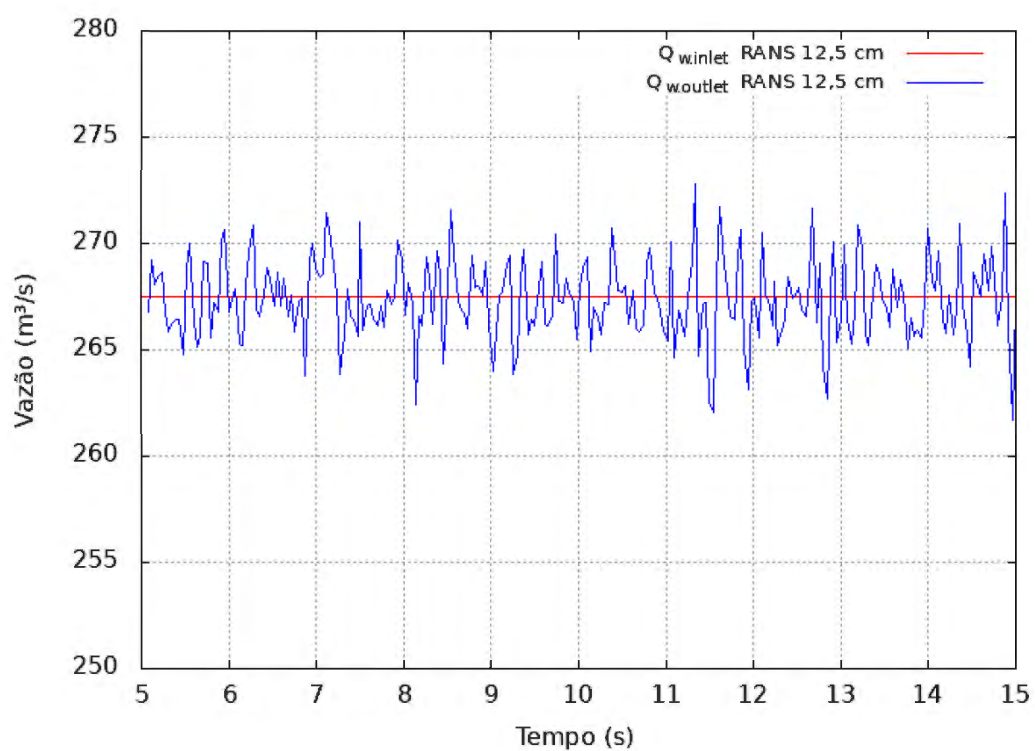
4.1.1 Refinamento Máximo da Malha de 12,5 cm

A primeira simulação foi realizada com um refinamento máximo da malha de 12,5 cm na região do escoamento. Essa discretização resultou em um total de 712.664 células.

Conforme apresentado no capítulo anterior e por Politano, Carrica e Weber (2009), foi analisada a vazão de entrada e saída para avaliar a convergência de um escoamento permanente. A vazão de entrada manteve-se constante durante toda a simulação ($Q_{w.inlet} = 267,5 \text{ m}^3/\text{s}$). A vazão de saída ($Q_{w.outlet}$) oscilou entre $272,8 \text{ m}^3/\text{s}$ e $262,0 \text{ m}^3/\text{s}$ com uma média de $267,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (diferença de 0,04% em relação a vazão de entrada) - Figura 4.1. As Figuras 4.2 a 4.5 apresentam o escoamento na calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia. Observaram-se pequenas perturbações na superfície de água a jusante do sistema de aeração e ondas geradas com o impacto do jato de água na calha do vertedouro. De maneira geral, não foi observado geração de turbulência na superfície de água após o degrau da calha. A média do comprimento do jato de água foi de 8,3 m (L).

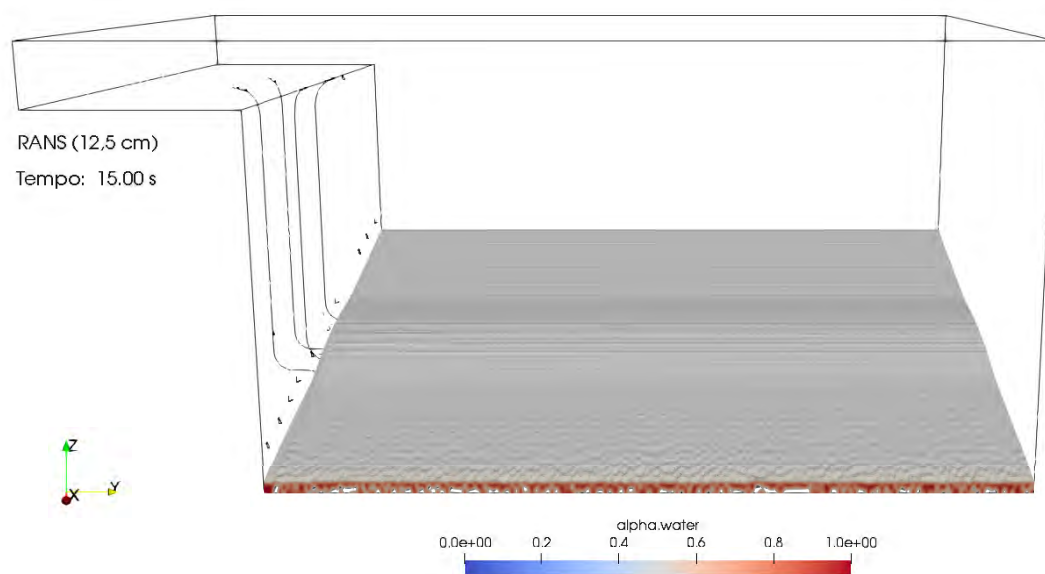
A magnitude e a direção da velocidade do escoamento estão apresentadas nas Figuras 4.6 e 4.7. A 4,5 m a montante do aerador a velocidade máxima do escoamento foi da ordem de 16,2 m/s - $U_{w.max}$ (Figura 4.8).

FIGURA 4.1 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 12,5 cm - RANS



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.2 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.3 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA

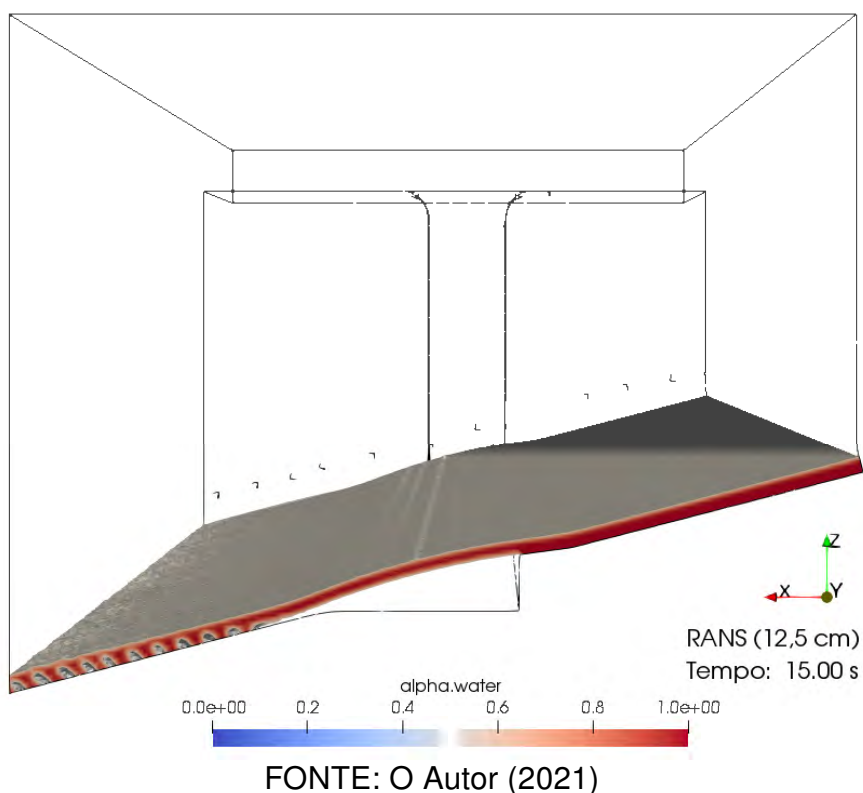


FIGURA 4.4 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA

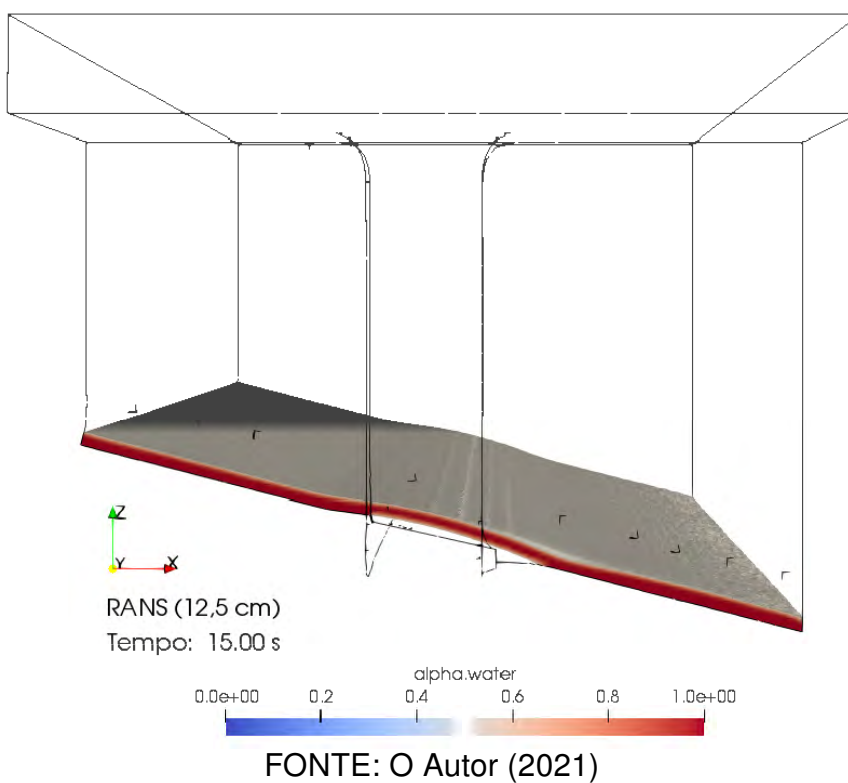


FIGURA 4.5 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE

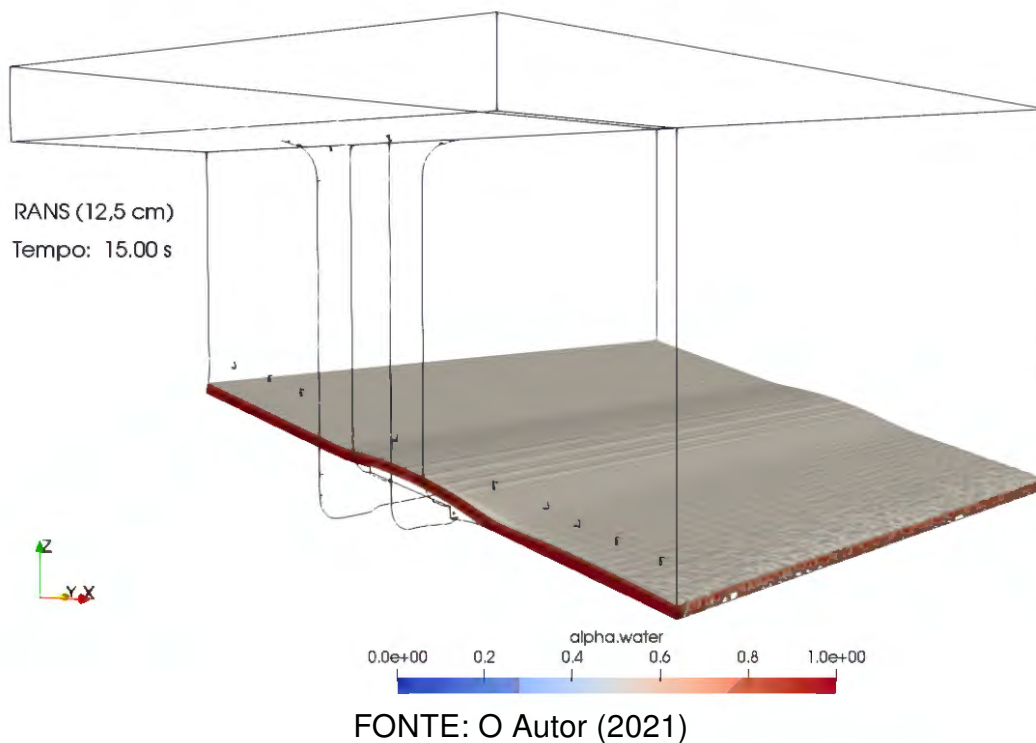


FIGURA 4.6 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE

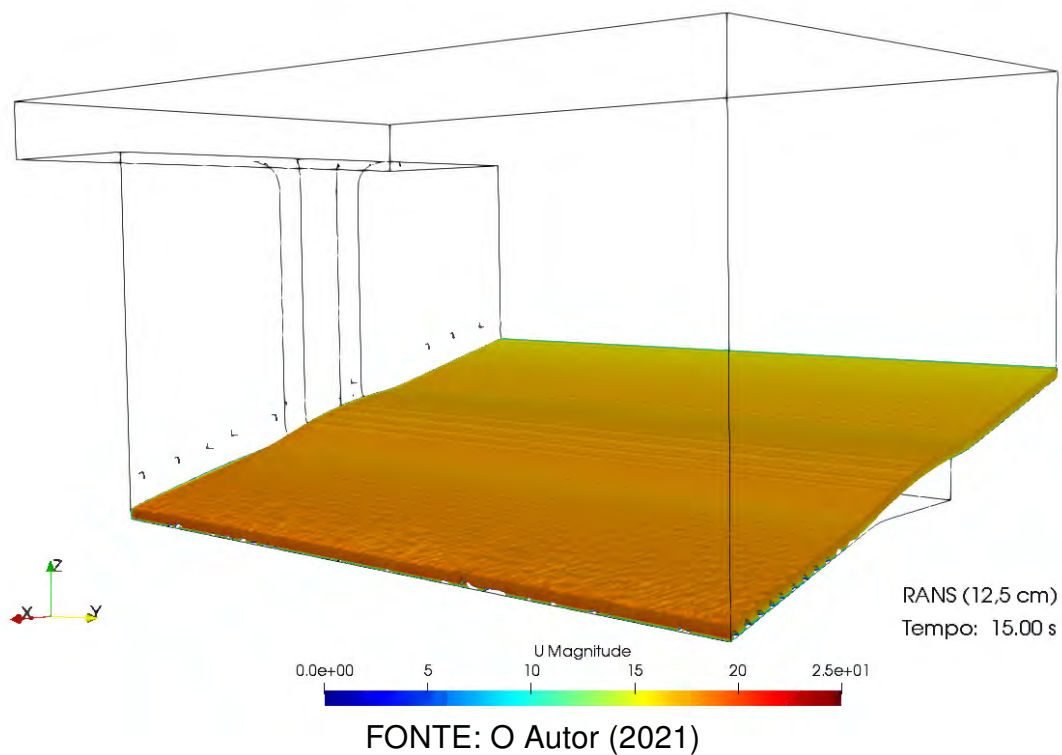


FIGURA 4.7 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL / JUSANTE

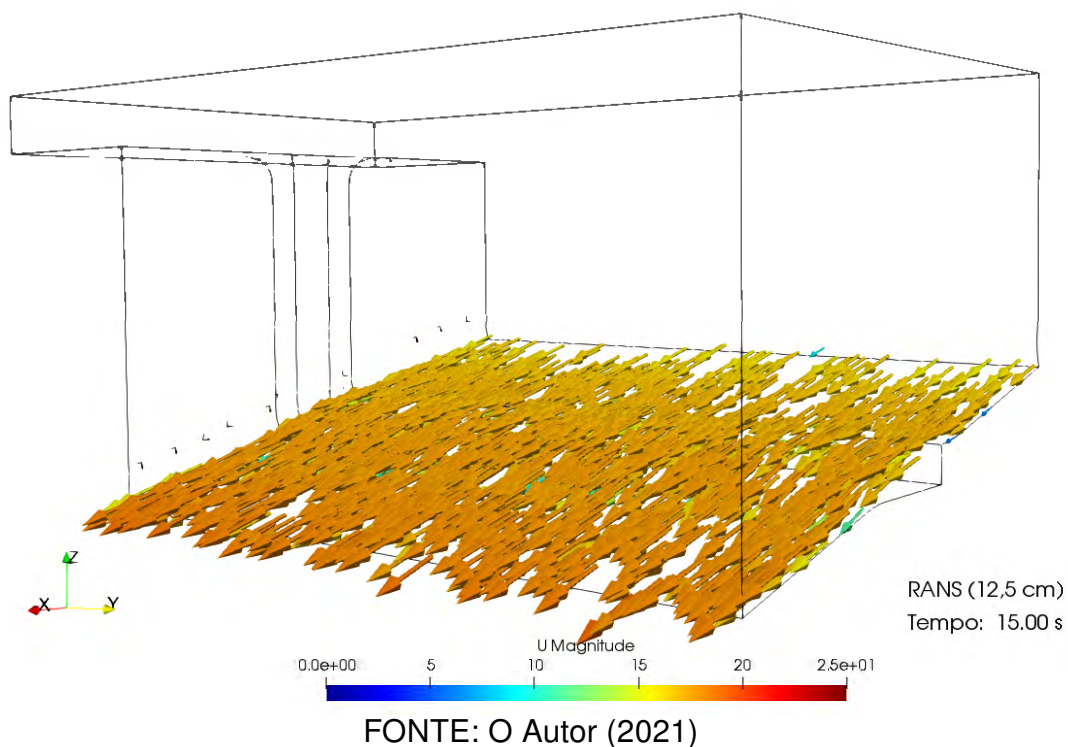
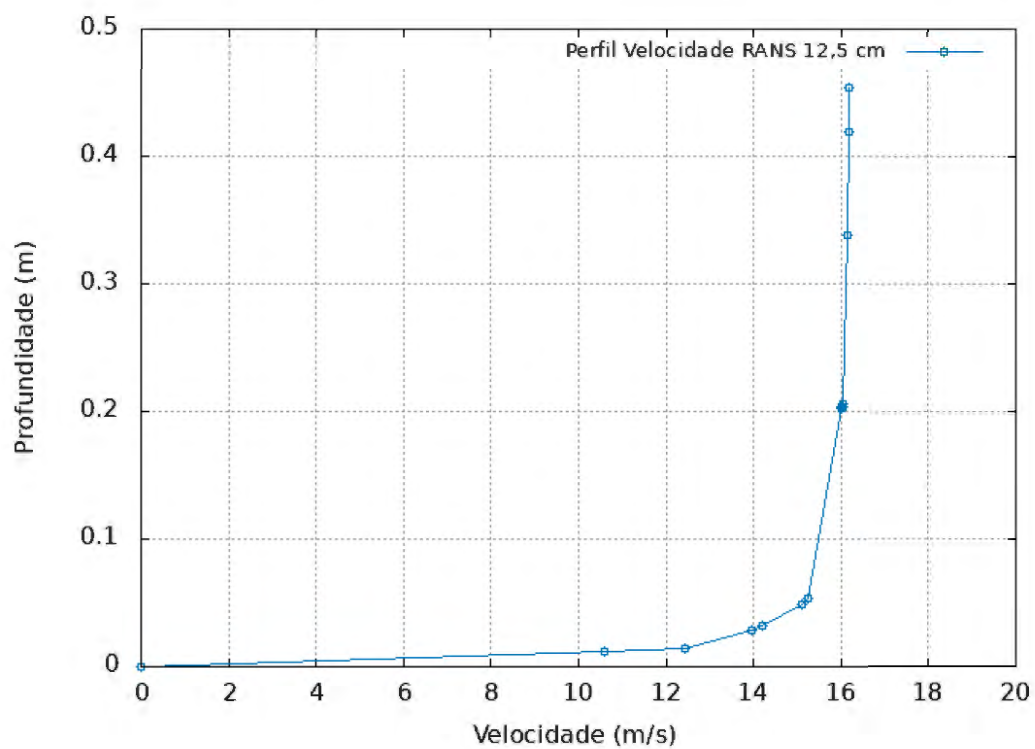


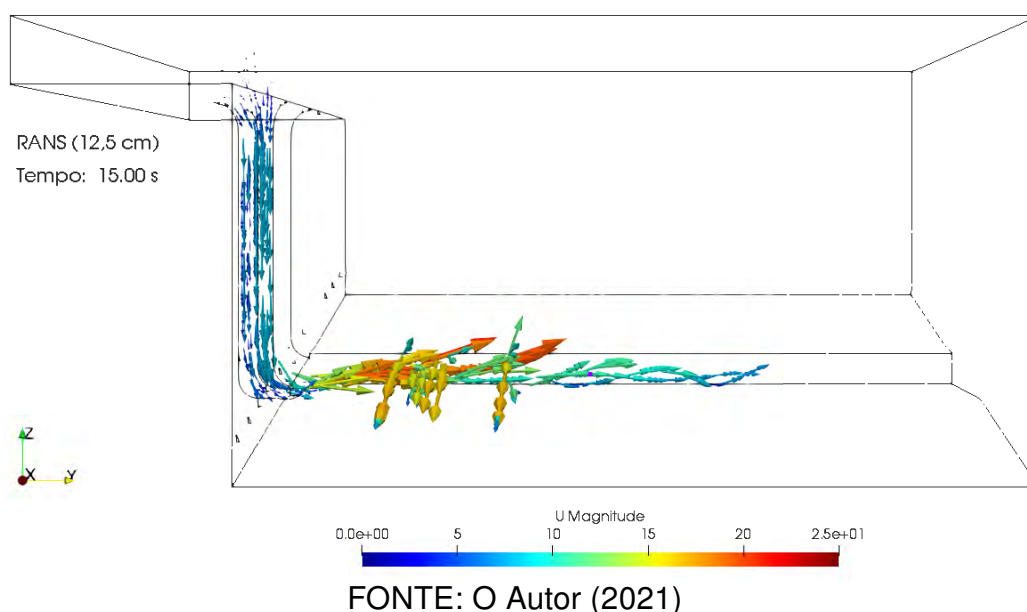
FIGURA 4.8 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - RANS - 12,5 cm



FONTE: O Autor (2021)

Observou-se a entrada de ar na torre de aeração, conforme apresentado na Figura 4.9. Por meio dos vetores da magnitude da velocidade do ar indicados na figura, verificou-se que o ar foi introduzido no escoamento e transportado para jusante. A média da velocidade de ar no interior da torre foi igual a 8,1 m/s (U_a). Sendo a área transversal da torre igual a 7,2 m², a vazão de entrada de ar (Q_a) é igual a 58,3 m³/s.

FIGURA 4.9 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE

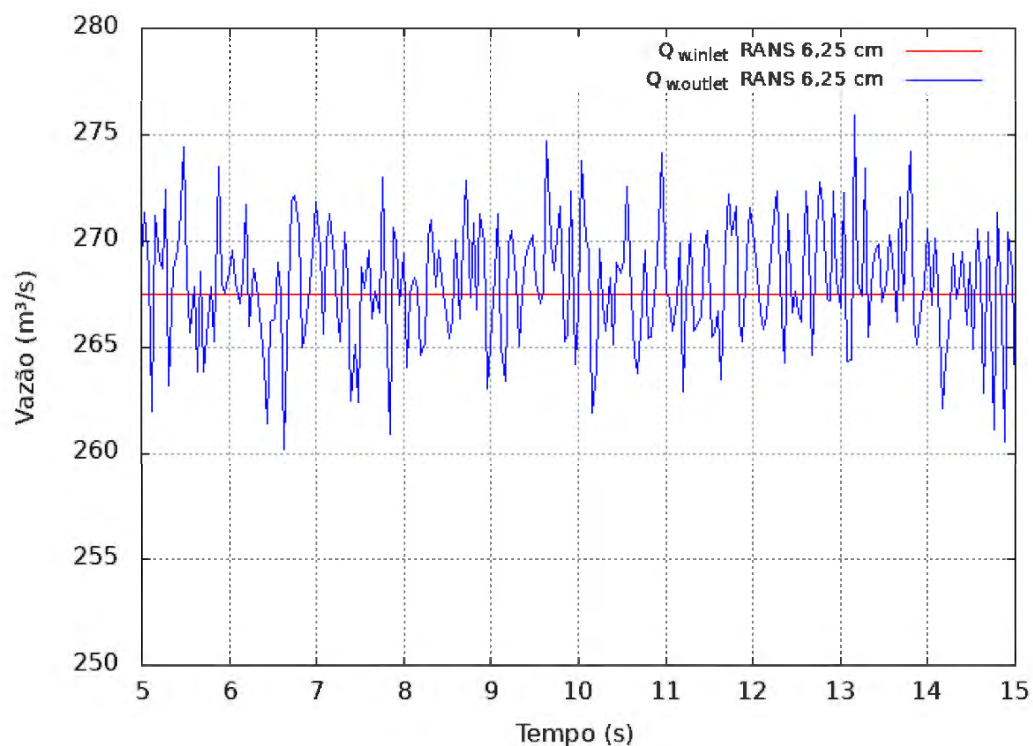


4.1.2 Refinamento Máximo da Malha de 6,25 cm

Com o objetivo de verificar se um refinamento maior da malha tem influência no processo de incorporação de ar no escoamento, foram realizadas simulações com malha de 6,25 cm na região do escoamento de água. Essa discretização resultou em um total de 3.415.452 células, quantidade cinco vezes maior em relação a malha de 12,5 cm. Esse refinamento demandou uma simulação com duração cinco vezes maior. Porém, ressalta-se que, de modo geral, o tempo de simulação não é diretamente proporcional ao tamanho da malha.

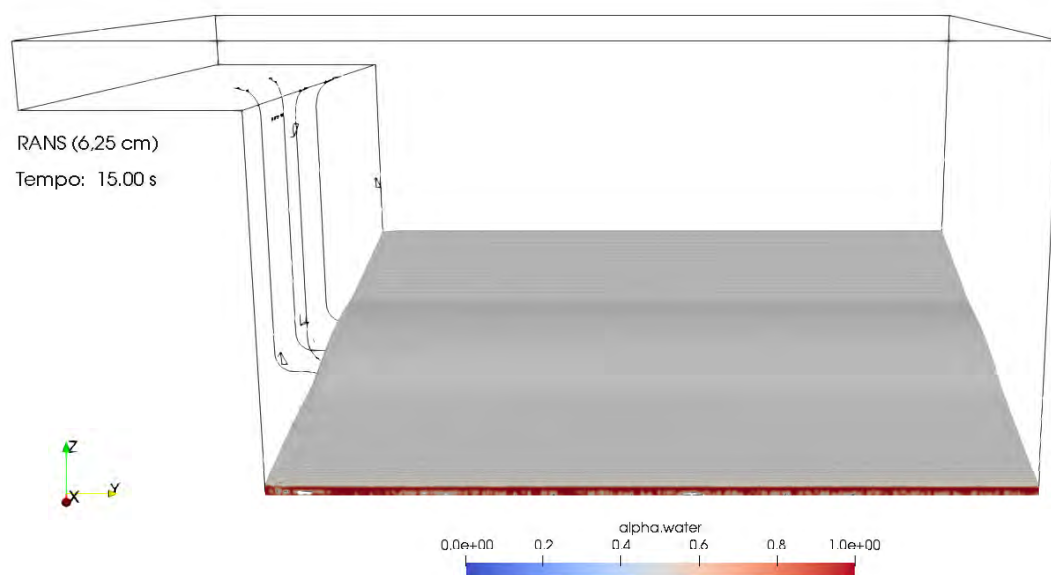
A vazão de saída ($Q_{w.outlet}$) oscilou entre 274,7 m³/s e 260,2 m³/s com uma média de 268,0 m³/s (diferença de 0,19% em relação a vazão de entrada - $Q_{w.inlet}$ - ver Figura 4.10). Com uma malha mais refinada, observou-se um escoamento mais uniforme e sem a presença das perturbações na superfície de água como observado com a malha de 12,5 cm. Do mesmo modo, as ondas geradas pelo impacto do jato de água na calha do vertedouro também foram menores. As Figuras 4.11 a 4.14 apresentam o escoamento na calha do vertedouro no tempo 15 segundos de simulação. A média do comprimento do jato de água foi de 8,2 m (L).

FIGURA 4.10 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 6,25 cm - RANS



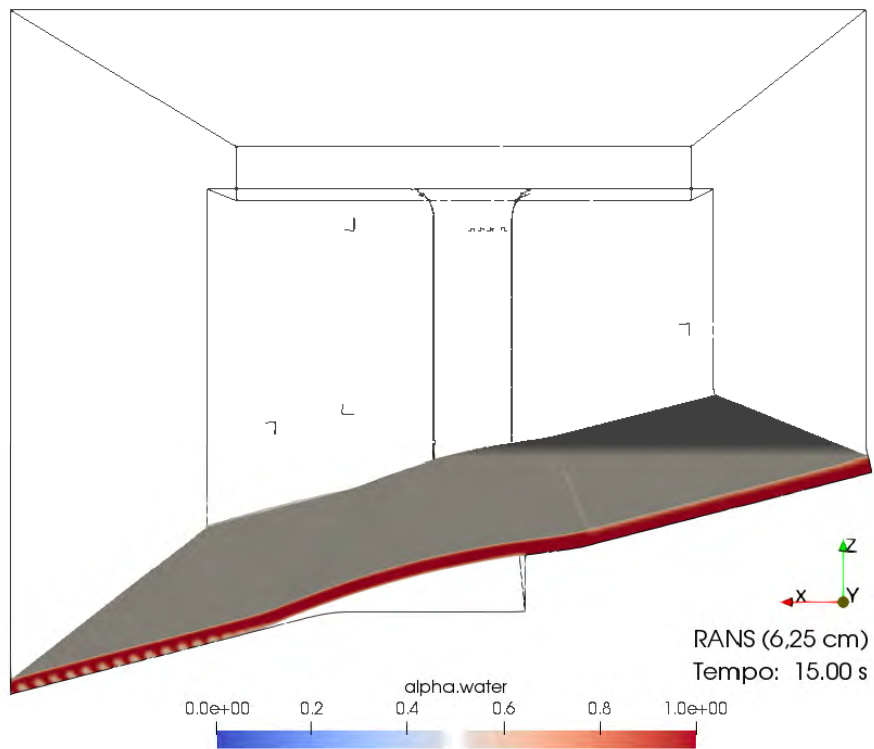
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.11 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE



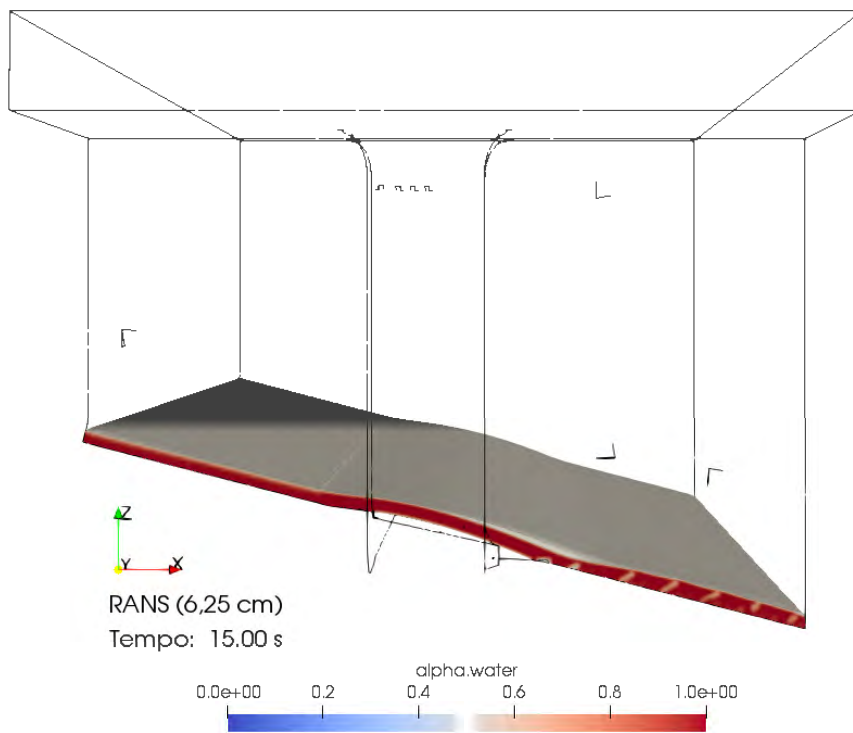
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.12 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA



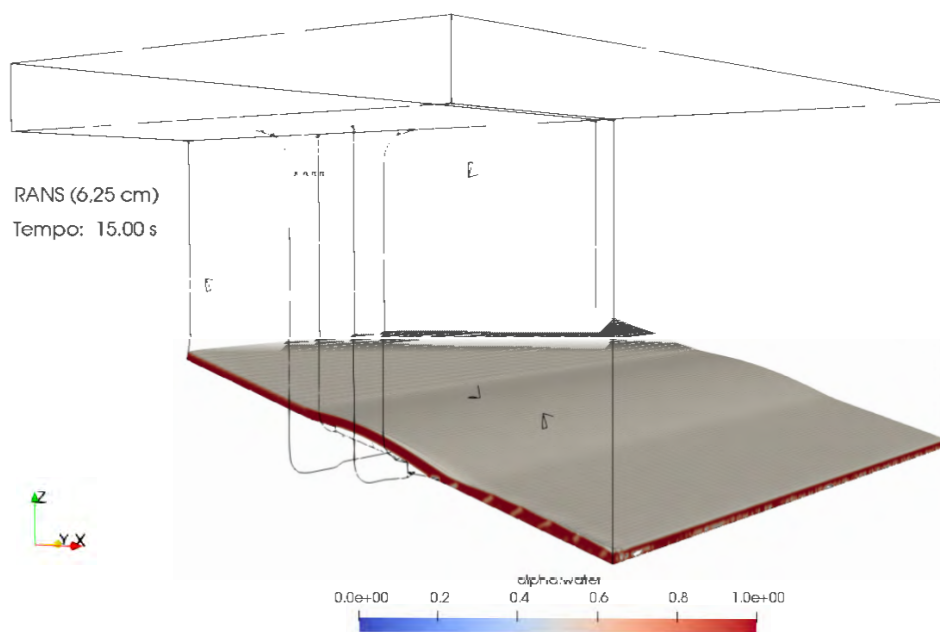
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.13 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA



FONTE: O Autor (2021)

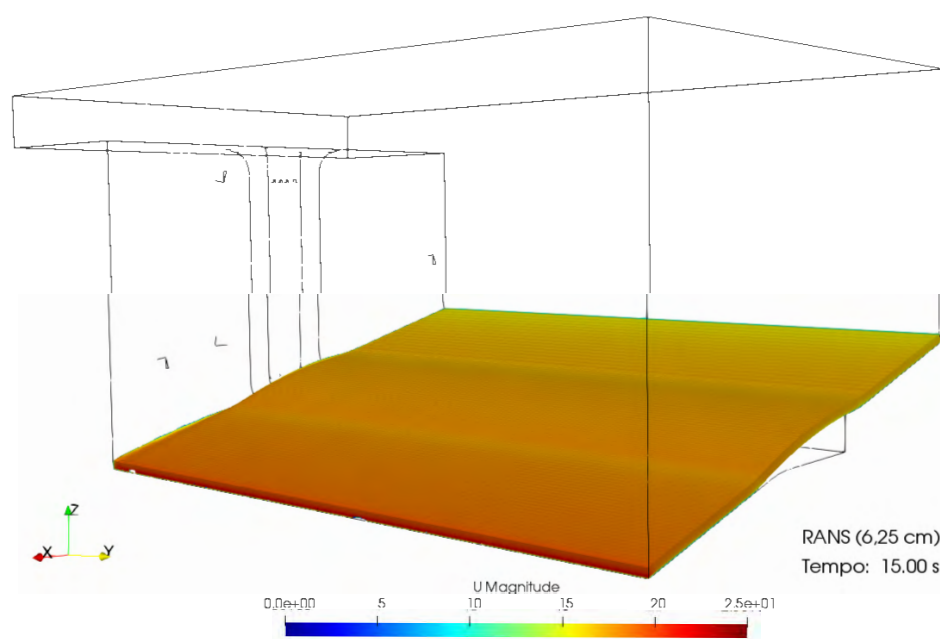
FIGURA 4.14 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

O perfil da velocidade do escoamento a 4,5 m a montante do aerador foi semelhante comparado com a simulação com malha de 12,5 cm. A velocidade máxima do fluxo foi da ordem de 16,2 m/s ($U_w.max$). As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam a magnitude e direção da velocidade do escoamento.

FIGURA 4.15 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.16 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL / JUSANTE

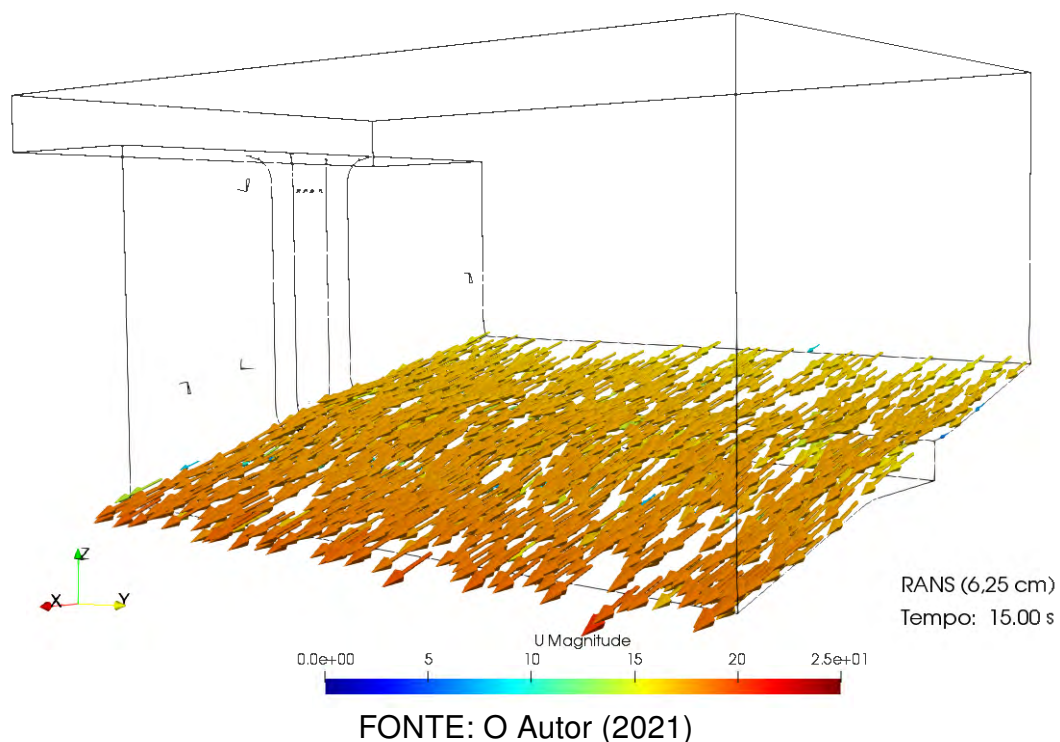
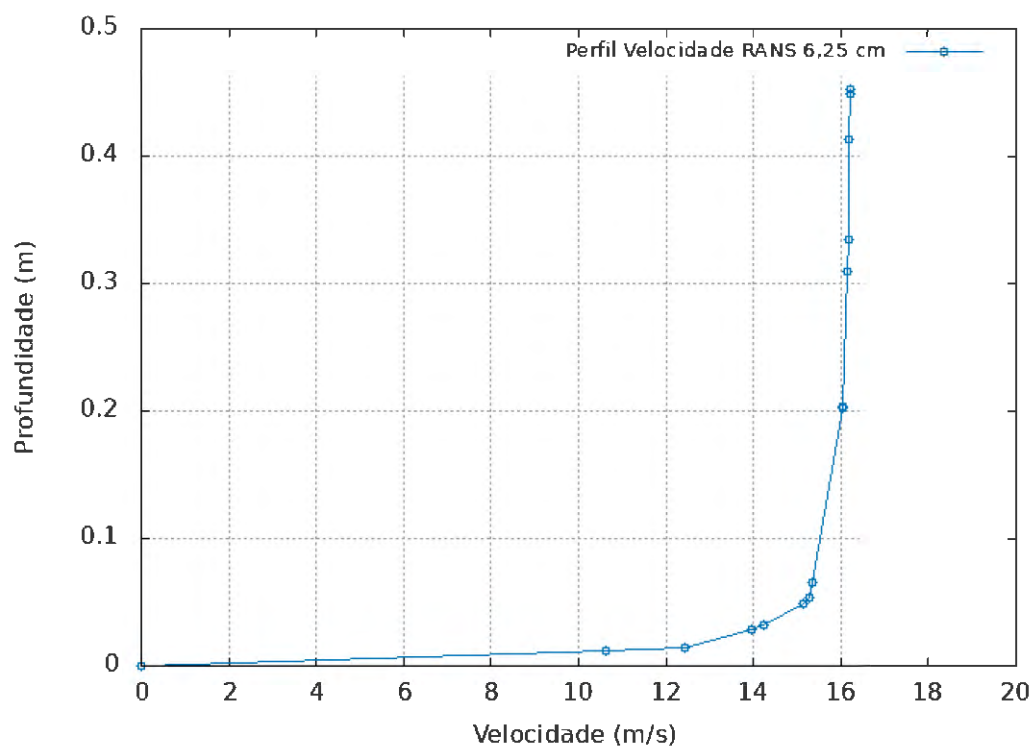
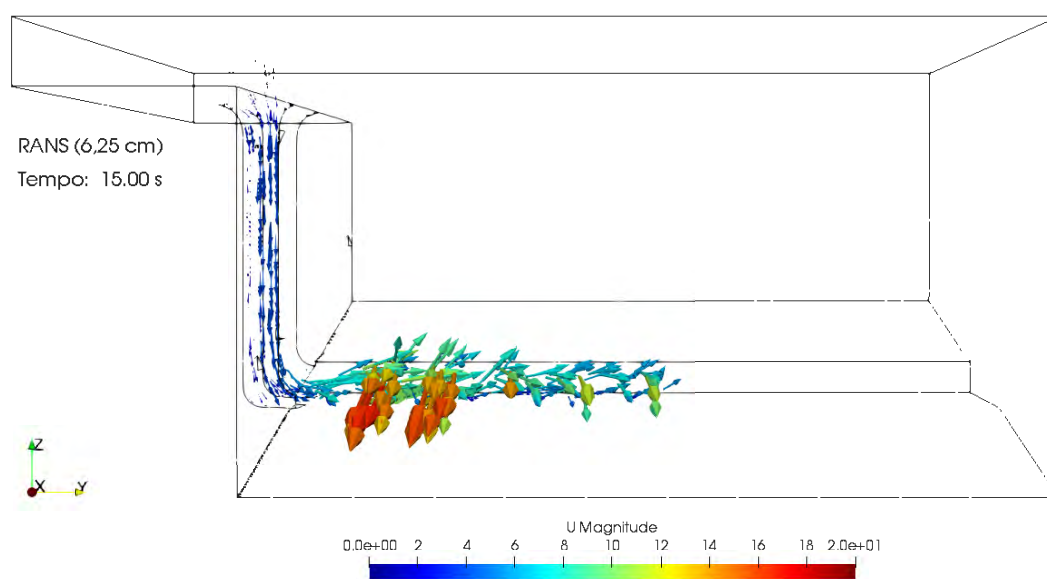


FIGURA 4.17 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - RANS - 6,25 cm



Como observado pela Figura 4.18, houve entrada de ar pela torre de aeração do vertedouro. A média da velocidade do ar no interior da torre foi igual a 4,0 m/s (U_a), o que resulta em uma vazão de ar de 28,8 m³/s (Q_a). Na figura também observa-se que os vetores da magnitude da velocidade são transportados pelo fluxo de água para jusante.

FIGURA 4.18 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

A partir desses resultados (Tabela 4.1), foi observado que as modelagens numéricas baseadas no modelo de simulação *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* não reproduziram adequadamente o escoamento sobre a calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia. Como apresentado na seção 2.1, esperava-se um escoamento com características turbulentas a jusante do degrau. A superfície livre de água deveria apresentar perturbações acentuadas. Também não foi observado uma região de escoamento pulverizado, o qual possui alta eficiência na retenção de ar. Do mesmo modo, a região de impacto do jato de água deveria ser caracterizado por uma região de jato pulverizado o qual faria uma quantidade de ar adicional fosse incorporada ao fluxo. Sendo assim, o processo de aeração não foi reproduzido, como será apresentado na seção 4.4 com a comparação dos resultados das simulações numéricas com as medições realizadas em obra (dados de protótipo).

Desse modo, viu-se a necessidade de averiguar outro modelo de simulação, pois na modelagem RANS, todas as informações espectrais são perdidas e as quantidades estatísticas são médias sobre todas as escalas de turbulência.

TABELA 4.1 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE SIMULAÇÃO RANS

Refinamento Máximo	12,5 cm	6,25 cm
$Q_{w.inlet}$ (m ³ /s)	267,5	267,5
$Q_{w.outlet}$ (m ³ /s)	267,4	268
$U_{w.max}$ (m/s)	16,2	16,2
Q_a (m ³ /s)	58,3	28,8
U_a (m/s)	8,1	4,0
L (m)	8,3	8,2

Fonte: O Autor (2021)

4.2 ESCALA DE PROTÓTIPO - DES

Nesta seção são apresentados os resultados das modelagens numéricas com base no modelo de simulação *Detached-Eddy Simulation* - DES em conjunto com o modelo de turbulência Spalart-Allmaras DDES. Como será observado, as simulações DES representaram o escoamento de forma mais adequada. Portanto, para a simulação com maior refinamento foi realizada uma análise mais aprofundada.

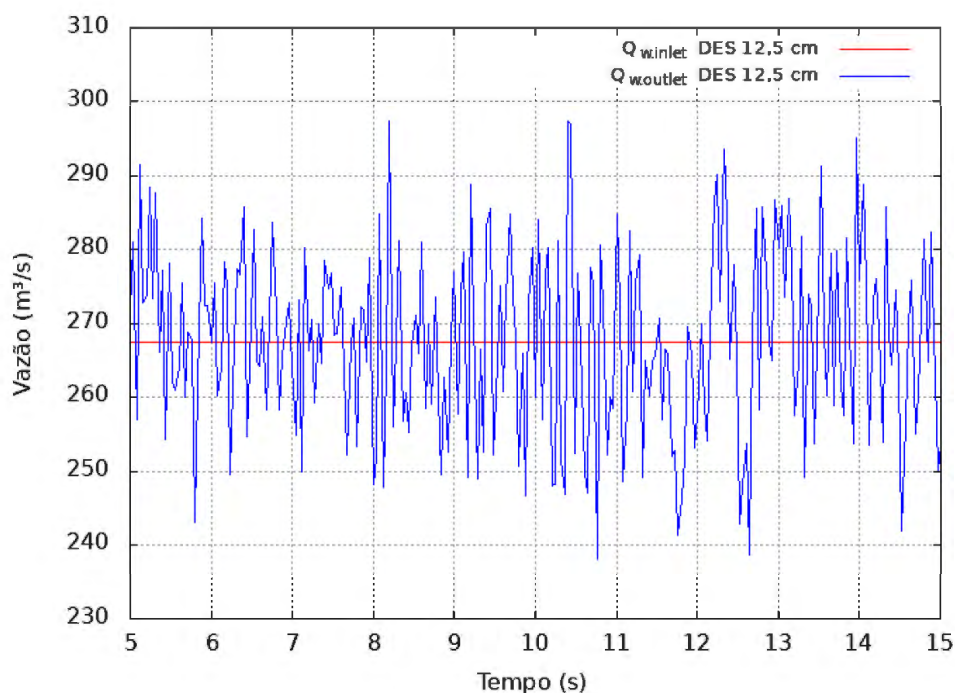
4.2.1 Refinamento Máximo da Malha de 12,5 cm

Da mesma maneira que as modelagens que utilizaram o modelo de simulação RANS, na simulação DES também foi verificada a convergência de um escoamento permanente. A vazão de entrada manteve-se constante durante toda a simulação (condição imposta na modelagem). A vazão de saída ($Q_{w.outlet}$) resultou em maiores oscilações em comparação ao modelo RANS. A máxima vazão de saída foi de 297,5 m³/s e a mínima vazão de saída foi de 283,2 m³/s. A média da vazão foi de 267,6 m³/s, uma diferença de 0,04% em relação a vazão de entrada. Com a utilização do modelo DES, foi observada a geração de turbulência do escoamento após o fluxo saltar pelo degrau do sistema de aeração. Essa perturbação do escoamento foi observada em toda a profundidade do fluxo, principalmente na região do impacto do jato de água na calha do vertedouro. As Figuras 4.20 a 4.23 apresentam o escoamento na calha do vertedouro no tempo 15 segundos de simulação. A média do comprimento do jato de água foi de 8,0 m (L).

As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam a magnitude e a direção da velocidade do escoamento na calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia. Na Figura 4.24, observa-se o perfil de velocidades a 4,5 m a montante do sistema de aeração. Nota-se que a partir da meia altura do escoamento as velocidades diminuíram. A justificativa para esse comportamento pode ser pela solução numérica da região intermediária (zona cinza) do modelo de simulação DES. A velocidade máxima do escoamento foi da ordem de 17,8 m/s ($U_{w.max}$).

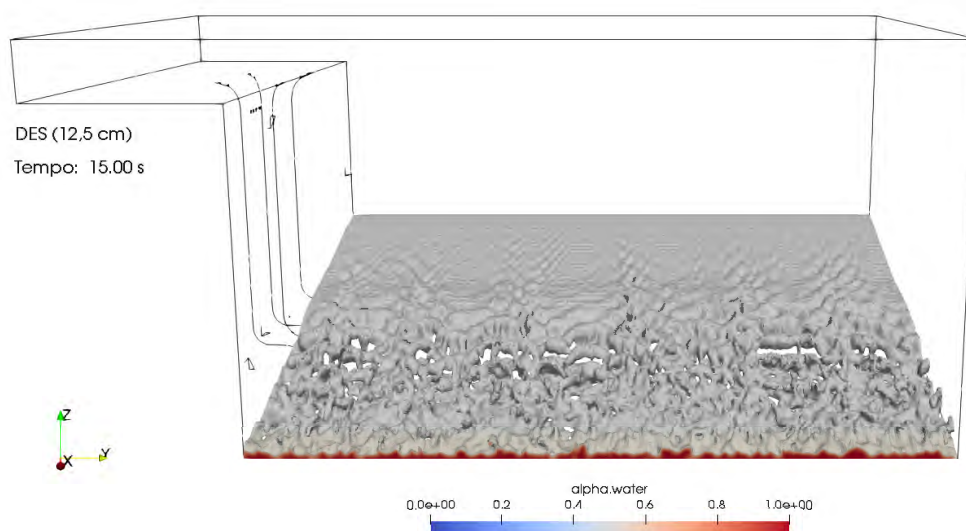
Observou-se a entrada de ar na torre de aeração, conforme indicado na Figura 4.27. Observou-se que o ar foi incorporado no escoamento e transportado para jusante. A média da velocidade do ar no interior da torre foi igual a 16,1 m/s (U_a), que resulta em uma vazão de ar (Q_a) de 115,9 m³/s.

FIGURA 4.19 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 12,5 cm - DES



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.20 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.21 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA

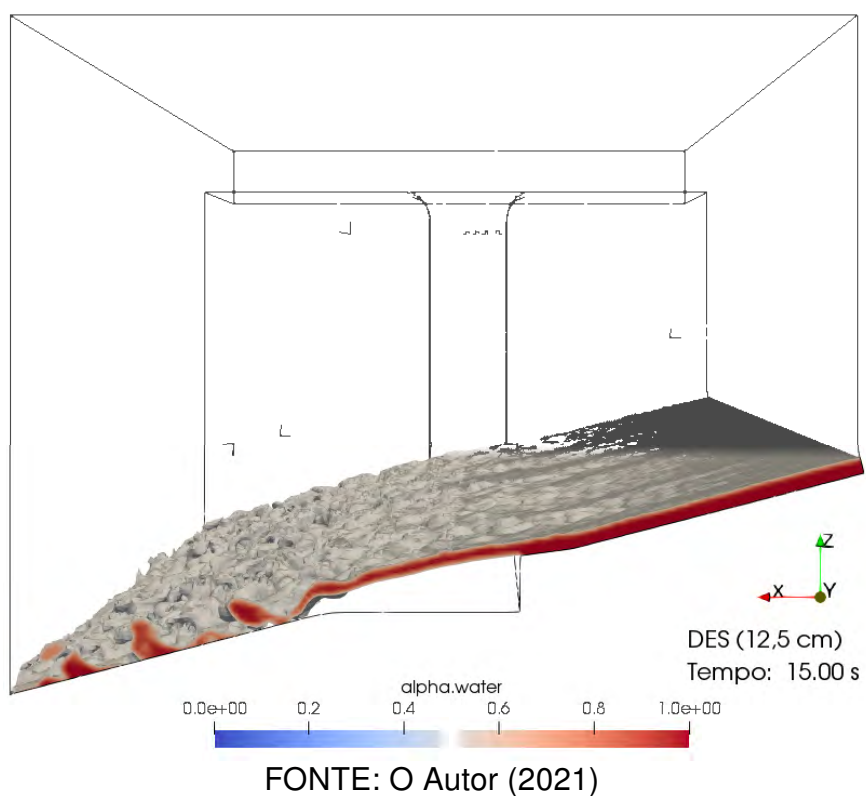


FIGURA 4.22 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA

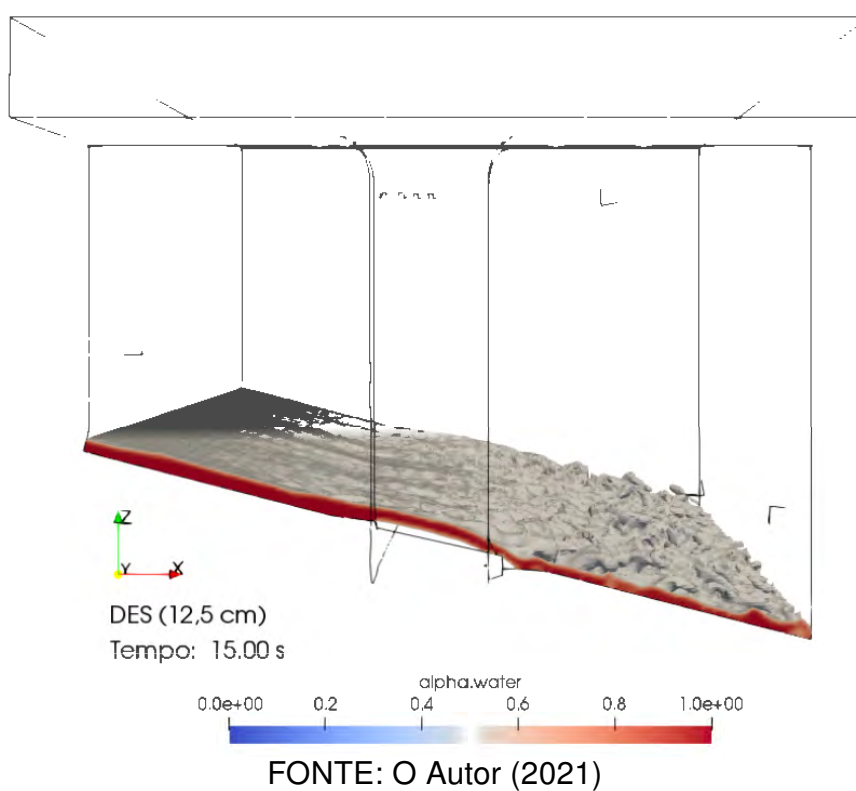
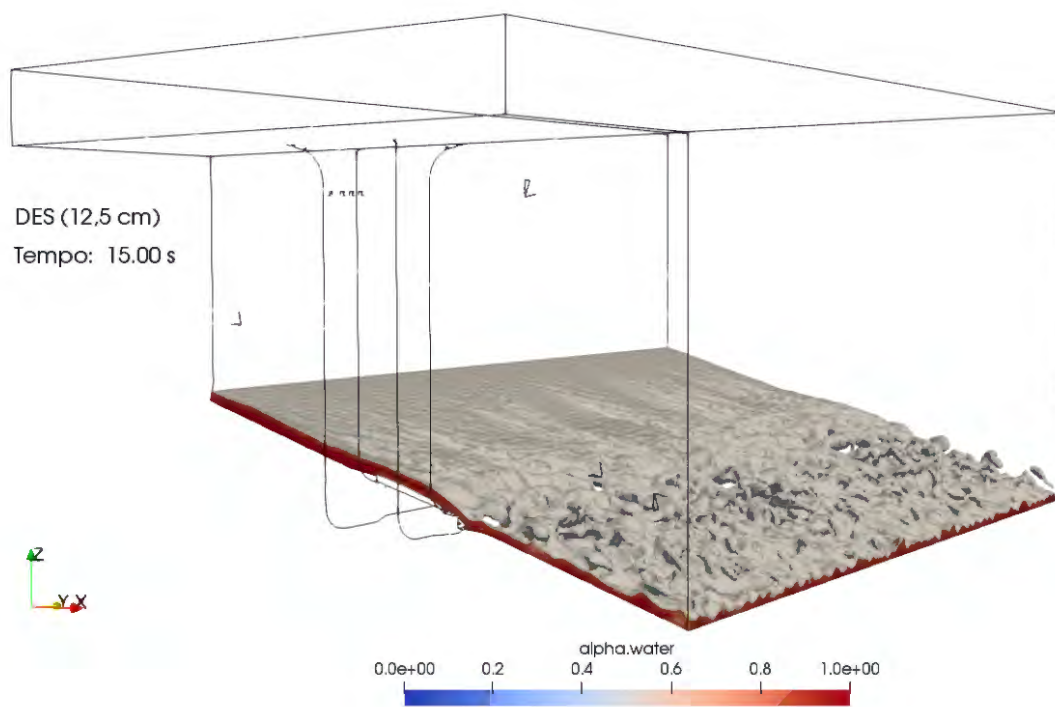
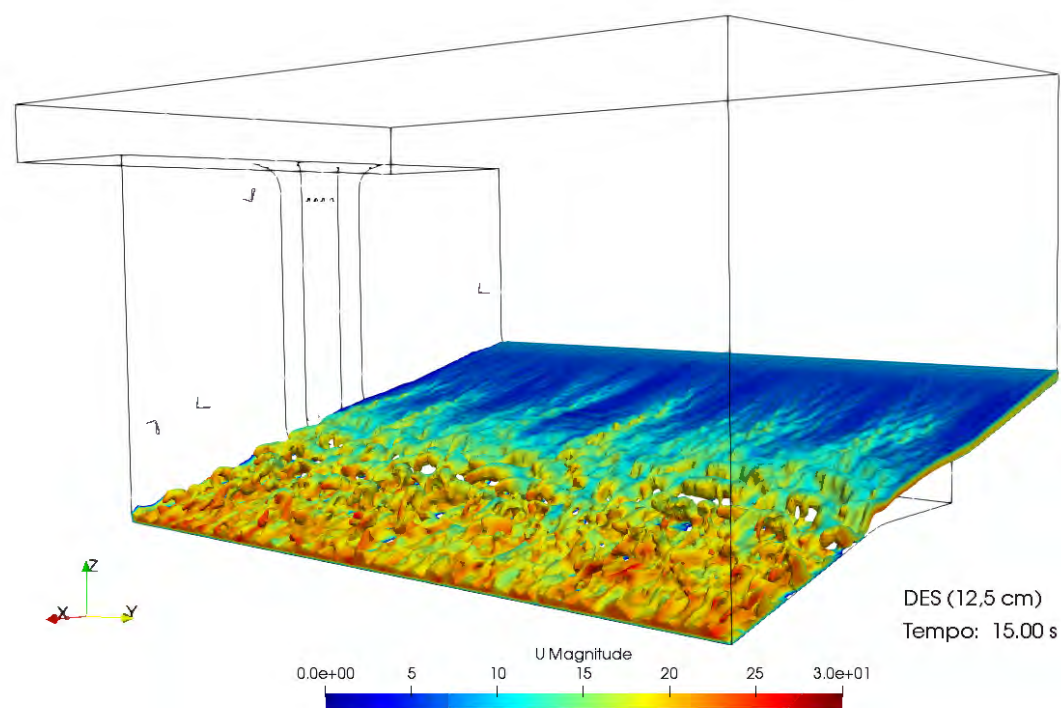


FIGURA 4.23 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.24 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.25 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL / JUSANTE

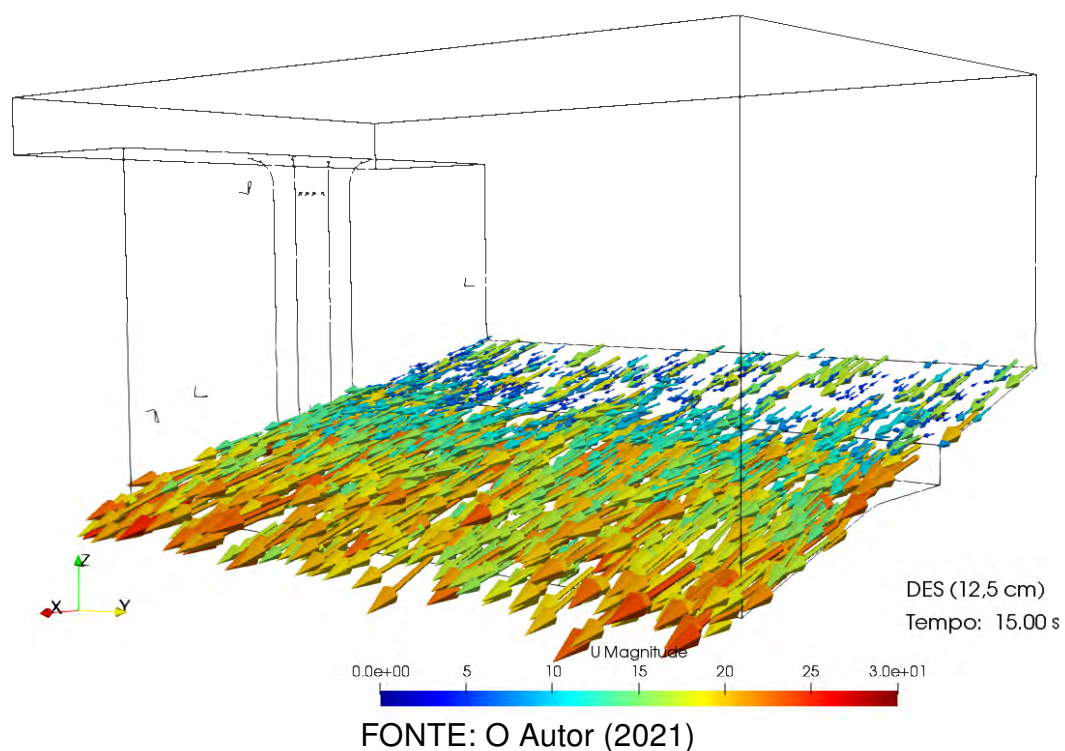
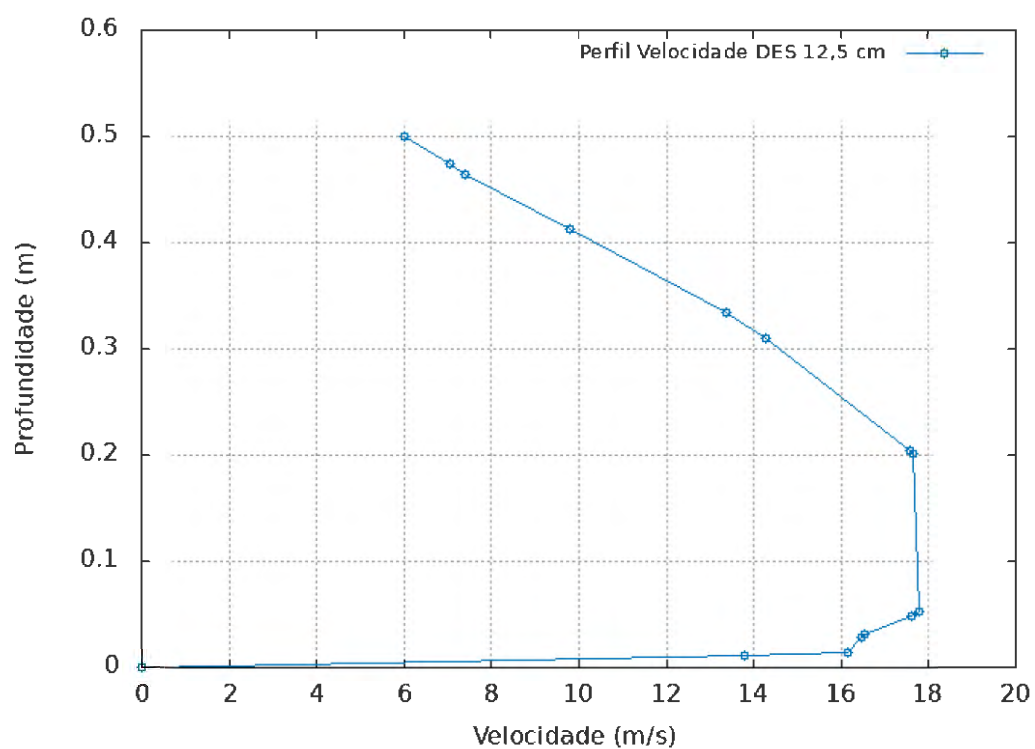
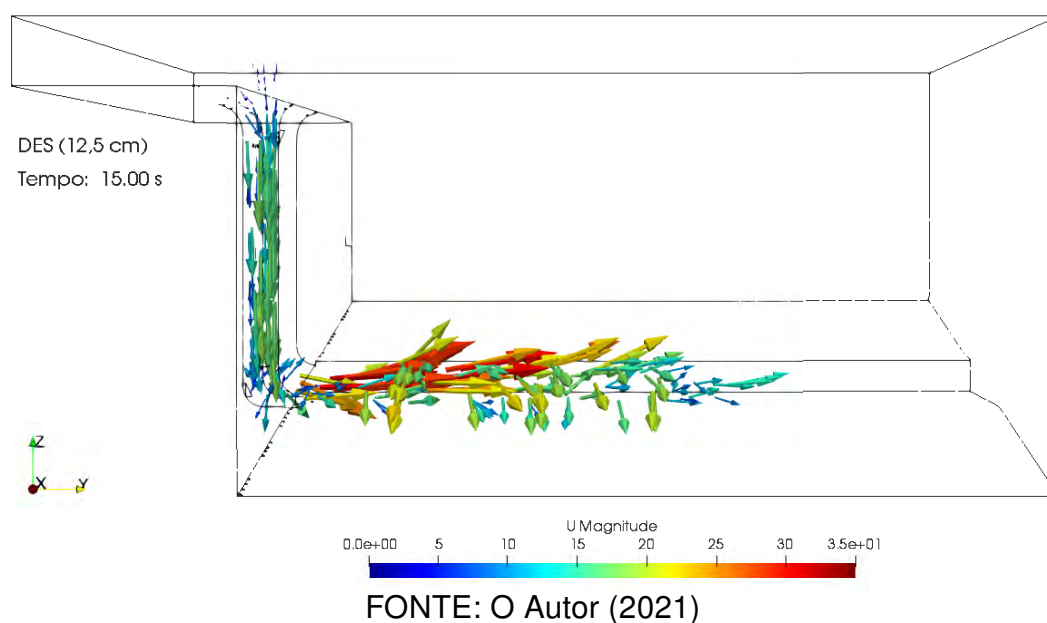


FIGURA 4.26 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 12,5 cm



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.27 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE



4.2.2 Refinamento Máximo da Malha de 6,25 cm

Com o objetivo de verificar se um refinamento maior da malha tem influência no processo de incorporação de ar no escoamento, foram realizadas simulações com malha de 6,25 cm na região do escoamento de água.

A vazão de saída ($Q_{w.outlet}$) oscilou entre 296,1 m³/s e 242,2 m³/s com uma média de 267,8 m³/s, diferença de 0,11% em relação a vazão de entrada - 267,5 m³/s - ver Figura 4.28. Similar à simulação DES com refinamento mais grosseiro (12,5 cm), observou-se turbulência do escoamento após o fluxo saltar pelo degrau do sistema de aeração. A maior discretização da malha resultou em uma melhor visualização da turbulência, ou seja, as perturbações apresentadas, principalmente na superfície da água, foram representadas de forma mais adequada. Também foi observada uma dispersão do jato de água na região de impacto com a calha do vertedouro. As Figuras 4.29 a 4.32 apresentam o escoamento na calha do vertedouro no tempo 15 segundos de simulação. A média do comprimento do jato de água foi de 7,6 m (L).

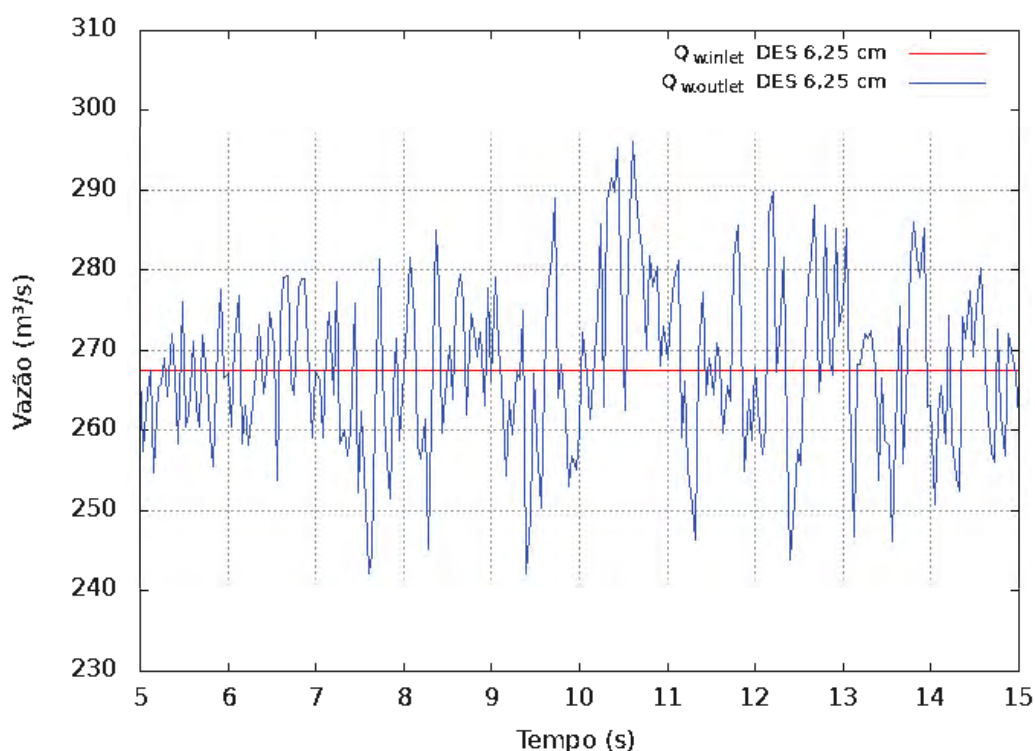
As Figuras 4.33 e 4.34 apresentam a magnitude da velocidade do escoamento na calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia. Na Figura 4.35, observa-se o perfil de velocidades a 4,5 m a montante do sistema de aeração. De maneira similar a simulação DES com malha de 12,5 cm, verifica-se uma diminuição das velocidades próximo dos 30 cm de profundidade. A justificativa para esse comportamento pode ser pela solução numérica da região intermediária (zona cinza) do modelo de simulação DES. A velocidade máxima do escoamento foi da ordem de 18,1 m/s ($U_{w.max}$).

A montante do aerador foi verificada a linha piezométrica (Figura 4.36). Como esperado, observou-se uma pressão maior na região do início do degrau, ocasionada pela mudança da inclinação da calha.

Ocorreu a entrada de ar na torre de aeração, conforme apresentado na Figura 4.37. Observou-se que o ar foi incorporado no escoamento e transportado para jusante. A média da velocidade do ar no interior da torre foi de 15,0 m/s (U_a), que resulta em uma vazão de ar (Q_a) de 108,0 m³/s.

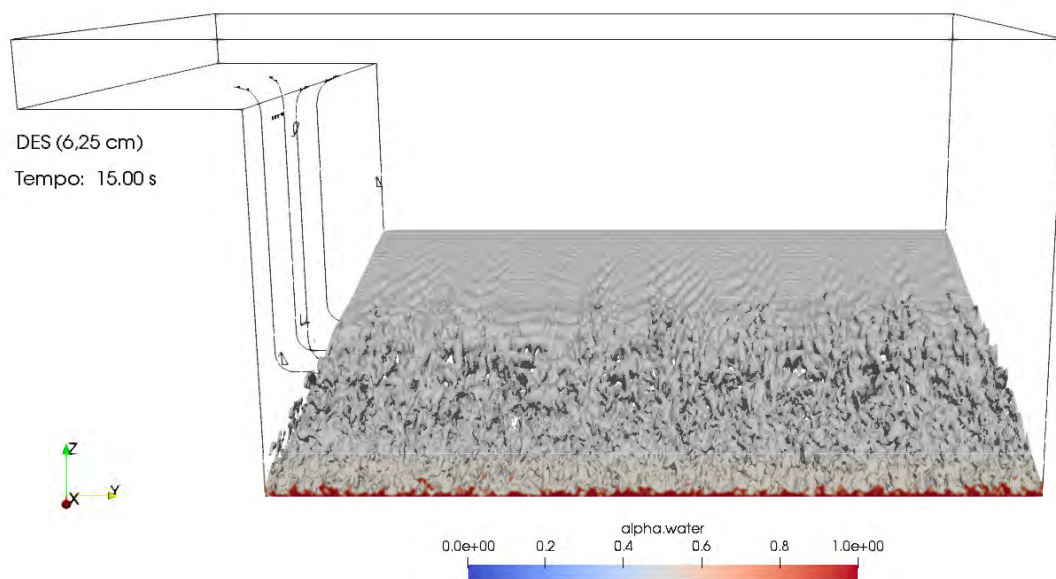
A Figura 4.38 apresenta a magnitude da velocidade do ar na região do sistema de aeração. Observaram-se velocidades maiores na região inferior da torre de aeração devido ao estrangulamento. A figura também apresenta três posições onde foram verificadas a velocidade média durante a simulação. As velocidades médias foram 20,8, 15,8 e 9,1 m/s nas posições 5,3, 17,3 e 29,3 m, respectivamente. Como esperado, ocorreu a diminuição da velocidade ao longo da calha do vertedouro. Esses valores serão comparados na seção 4.4 com dados de protótipo para avaliar o desempenho da simulação numérica.

FIGURA 4.28 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 6.25 cm - DES



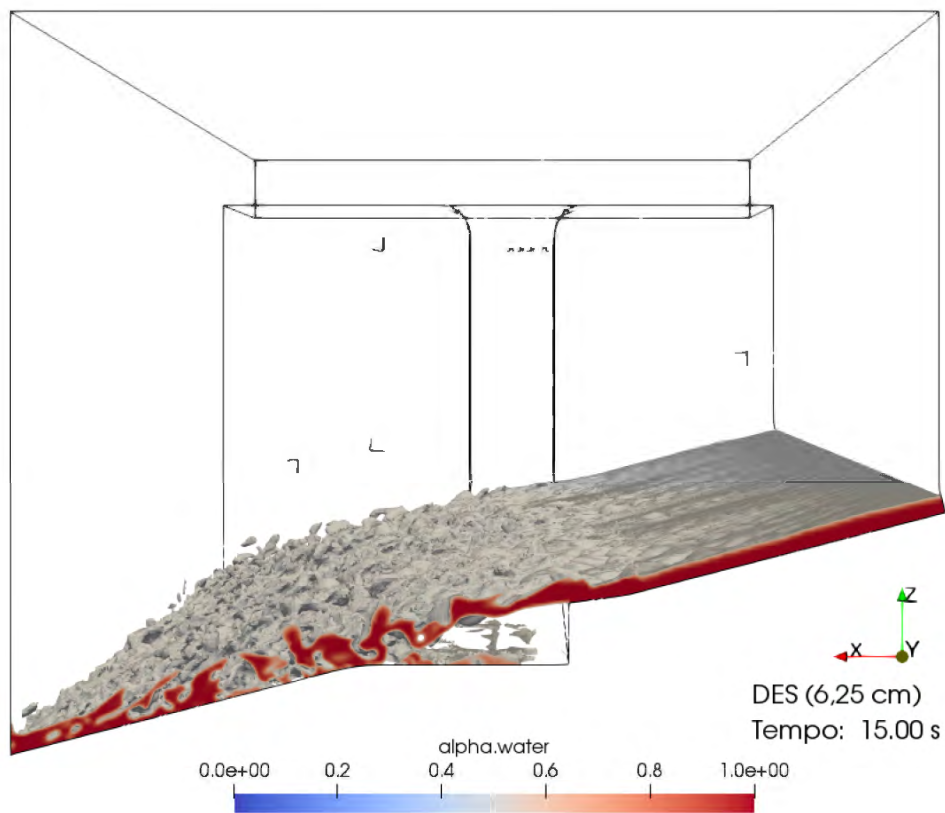
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.29 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE



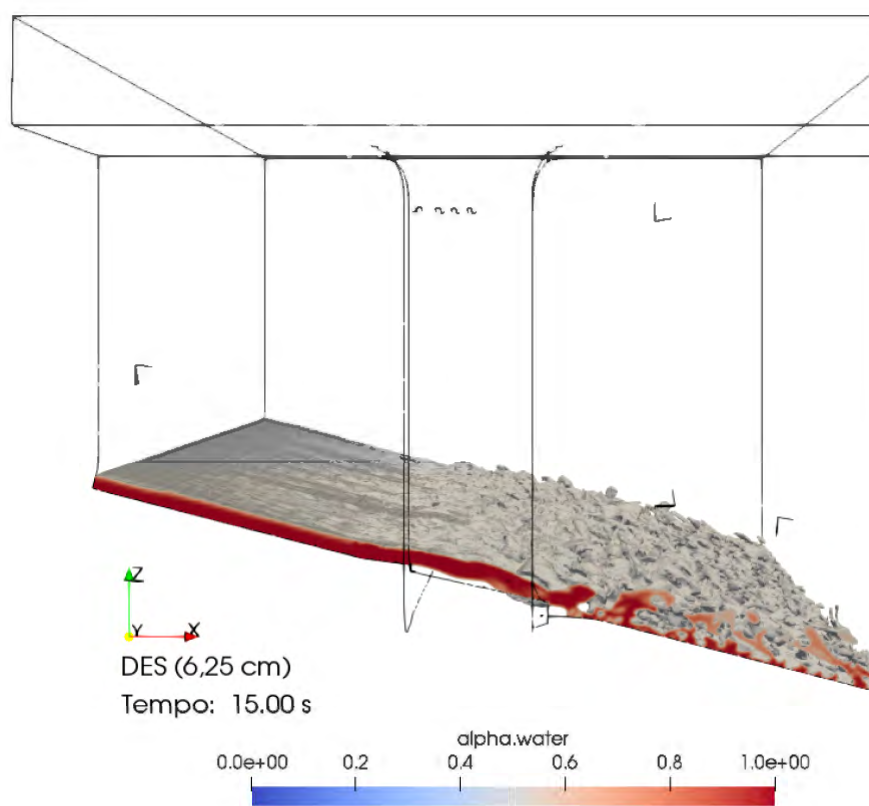
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.30 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA



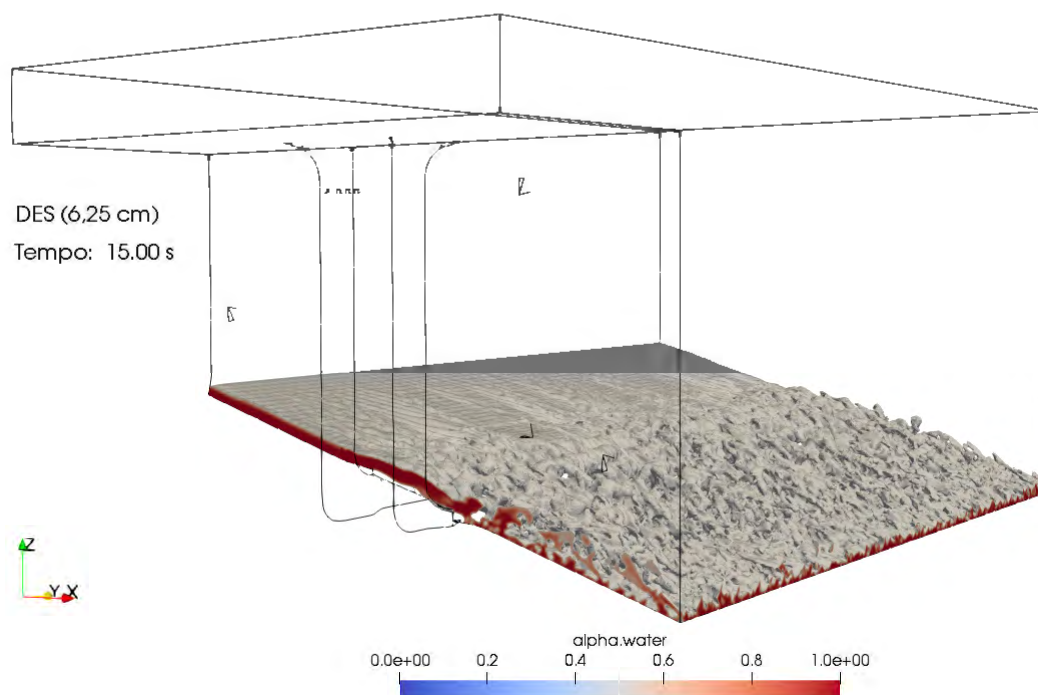
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.31 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA



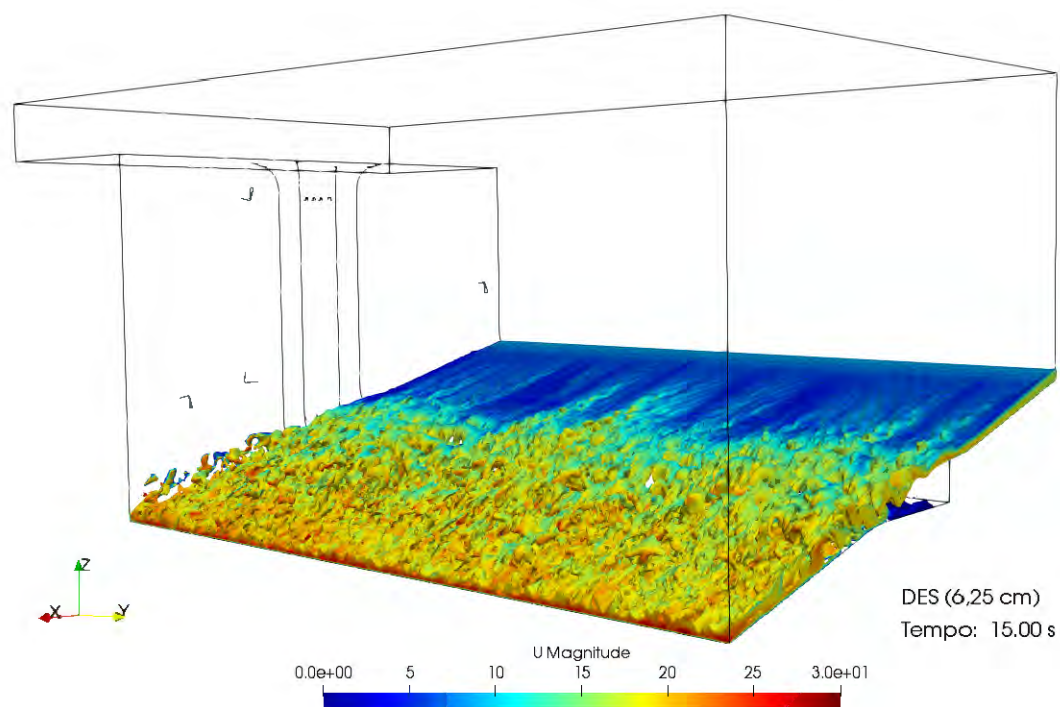
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.32 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOIRO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA/JUSANTE



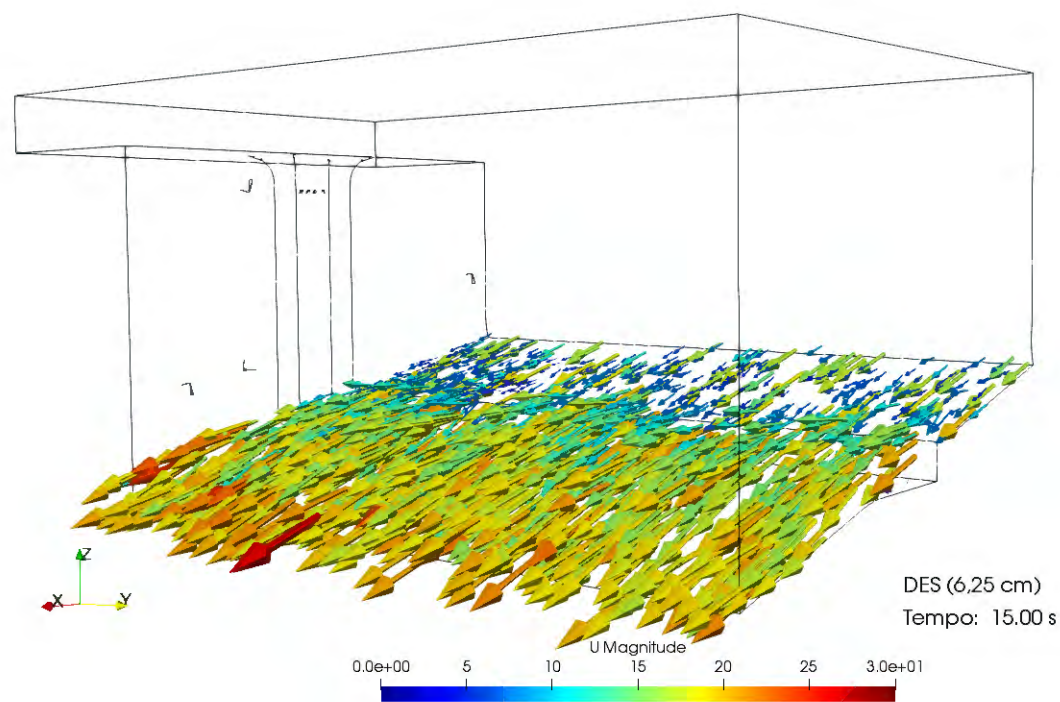
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.33 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE



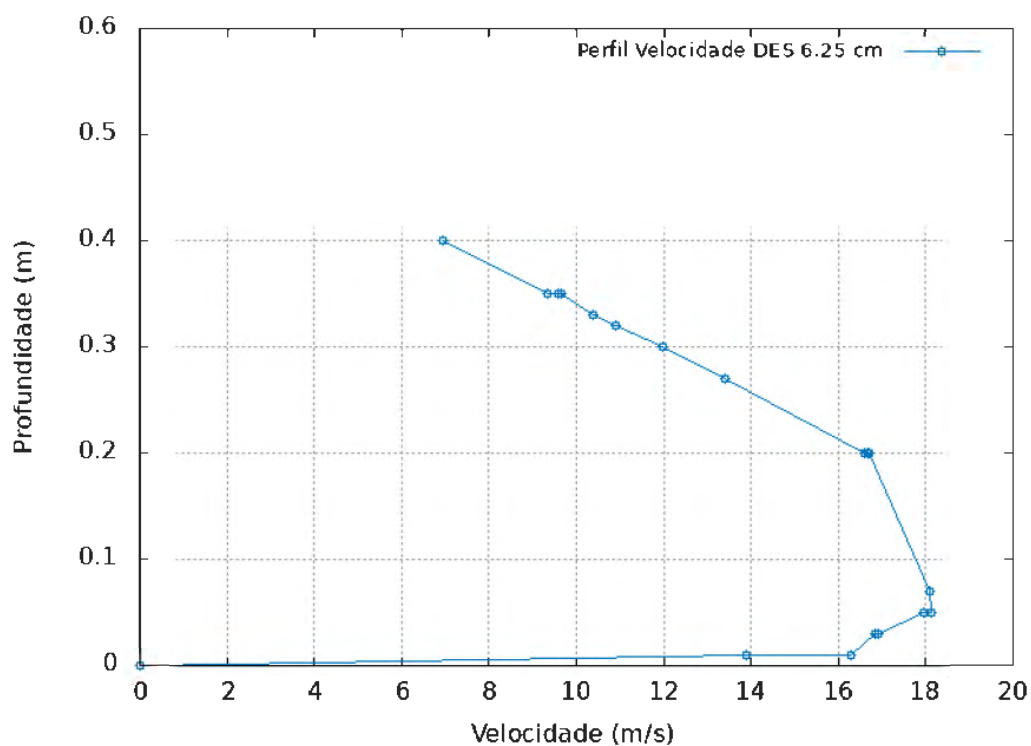
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.34 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE



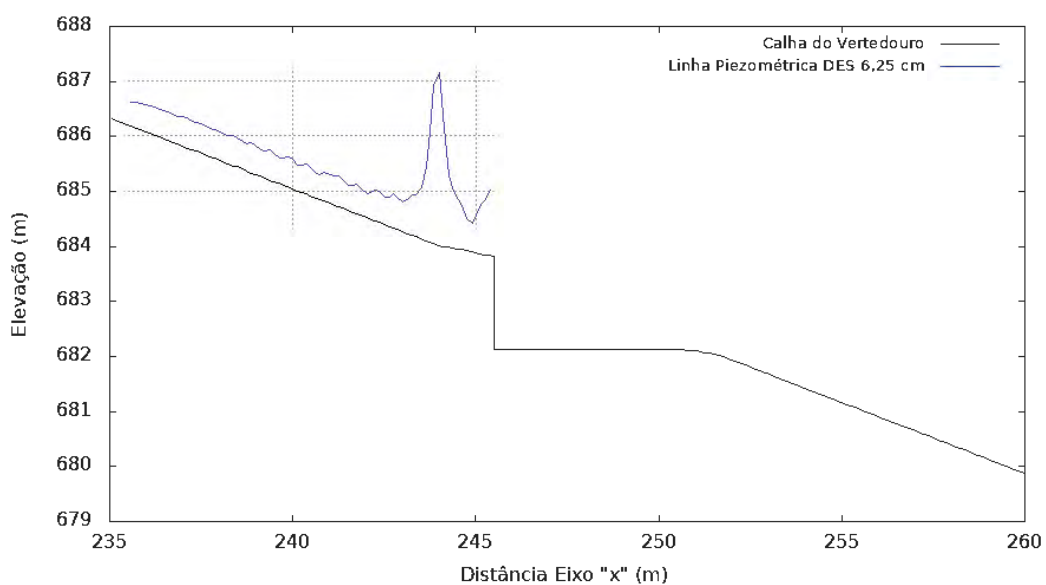
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.35 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 6.25 cm



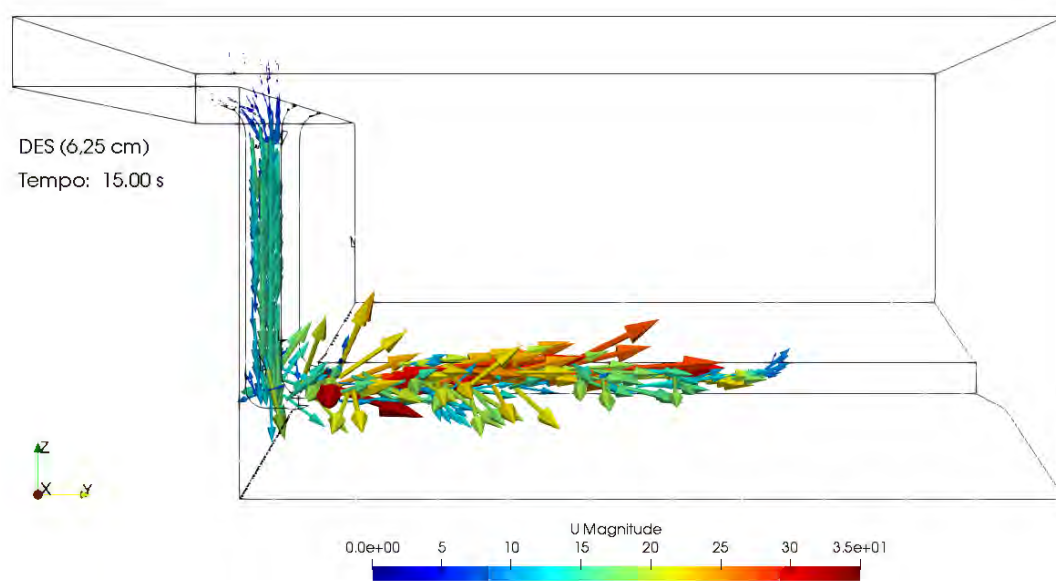
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.36 – LINHA PIEZOMÉTRICA A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 6.25 cm



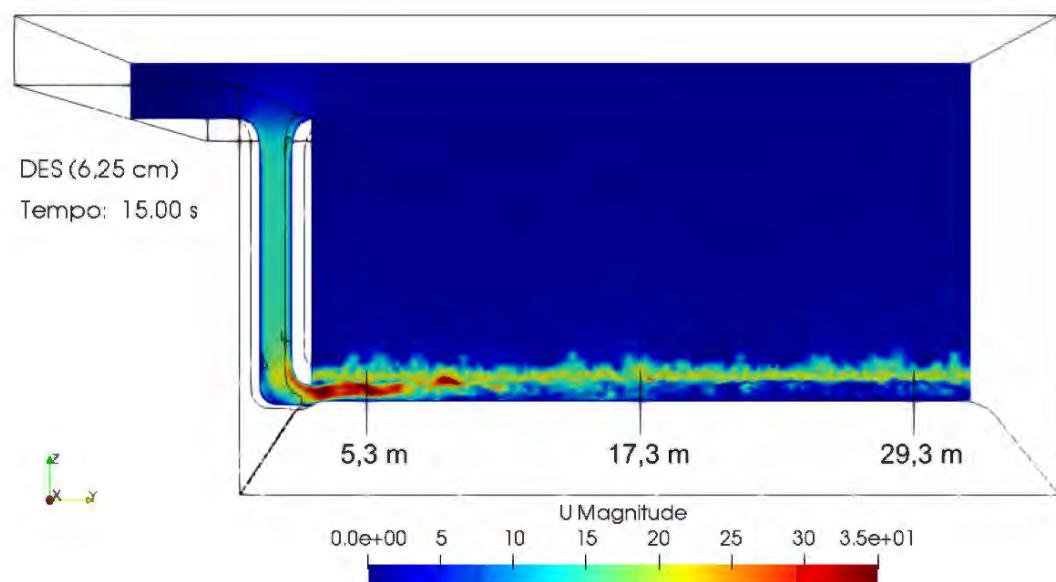
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.37 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.38 – MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR - CORTE TRANSVERSAL NA REGIÃO DO SISTEMA DE AERAÇÃO



FONTE: O Autor (2021)

Os resultados do modelo de simulação DES podem ser visualizados na Tabela 4.2.

TABELA 4.2 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DES

Refinamento Máximo	12,5 cm	6,25 cm
$Q_{w.inlet}$ (m ³ /s)	267,5	267,5
$Q_{w.outlet}$ (m ³ /s)	267,6	267,8
$U_{w.max}$ (m/s)	17,8	18,1
Q_a (m ³ /s)	115,9	108,0
U_a (m/s)	16,1	15,0
L (m)	8,0	7,6

Fonte: O Autor (2021)

4.3 ESCALA GEOMÉTRICA 1:30 - DES

A simulação realizada com escala geométrica 1:30 foi aplicada na malha de 12,5 cm (valor de protótipo). Logo, a quantidade total de células foi de 712.664 células com malha de refinamento máximo de 4,2 mm.

Conforme apresentado no capítulo Materiais e Métodos, foi determinado um tempo de simulação de 15 segundos (valor de protótipo), correspondente a 3 segundos em dimensões transpostas para valores de modelo na escala 1:30. Entretanto, após a simulação numérica, verificou-se a partir da análise de vazões de entrada e saída do domínio computacional, conforme metodologia empregada por Politano, Carrica e Weber (2009), que a duração da simulação não foi suficiente para garantir a convergência de um escoamento permanente. Portanto, o tempo de simulação foi estendido até verificar-se as características de um escoamento permanente, o qual ocorreu a partir de 12 segundos. A simulação se prolongou até o tempo 15 segundos e as análises foram realizadas nos três segundos finais da simulação.

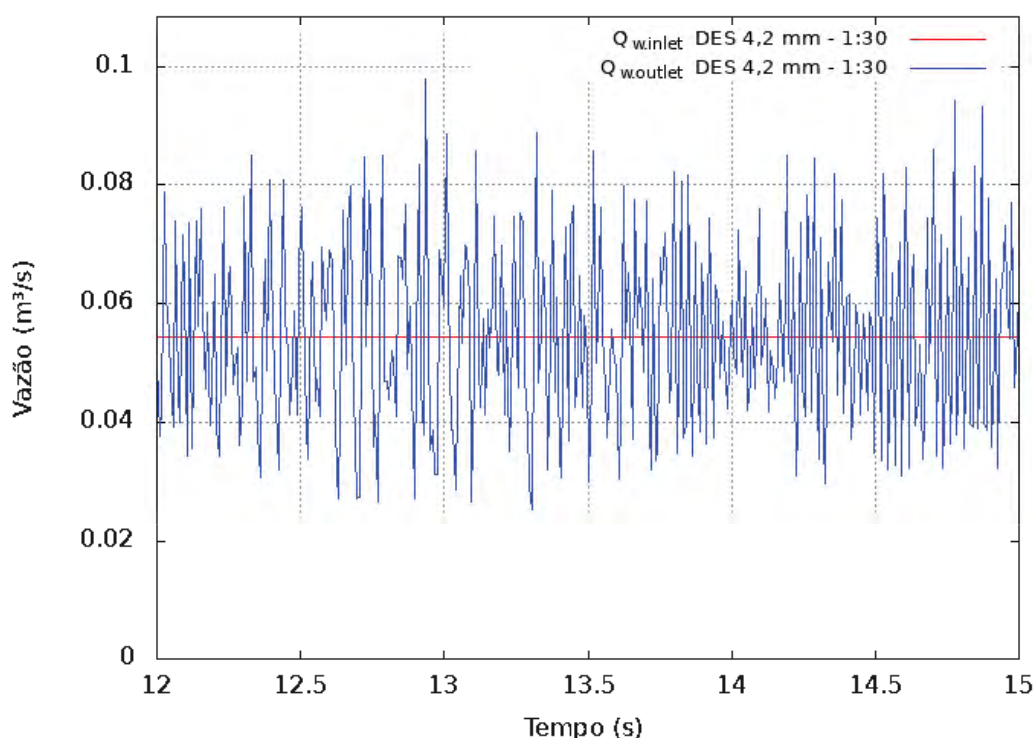
Nas análises das vazões verificou-se que a vazão de entrada manteve-se constante (condição de entrada - $Q_{w.inlet} = 0,05427$ m³/s). A vazão de saída apresentou maiores oscilações em relação as simulações com escala de protótipo, com uma vazão máxima de 0,09794 m³/s e uma vazão mínima de 0,02524 m³/s. Contudo, a média da vazão foi de 0,05435 m³/s, uma diferença de apenas 0,15% - Figura 4.39.

Na análise das características do escoamento foi observada turbulência do fluxo após o jato de água atingir a calha do vertedouro. Na região do degrau, verificou-se apenas pequenas perturbações na superfície livre. As Figuras 4.40 a 4.43 apresentam o escoamento na calha do vertedouro no tempo 15 segundos (tempo em escala de modelo). Em uma análise qualitativa, verificou-se um comprimento do jato de água de 0,27 m (aproximadamente 8,0 m referente ao protótipo).

A magnitude da velocidade do escoamento está apresentada nas Figuras 4.44 e 4.45. A 4,5 m a montante do aerador a velocidade máxima do escoamento foi da ordem de 3,3 m/s (18 m/s referente ao protótipo) - Figura 4.46. Conforme observado nos perfis de velocidades das simulações DES em escala de protótipo, o perfil de velocidades para a escala geométrica 1:30 apresentou o mesmo comportamento. Nota-se que não foi observado um perfil logarítmico de velocidades. A justificativa para esse comportamento pode ser pela solução numérica da região intermediária (zona cinza) do modelo de simulação DES.

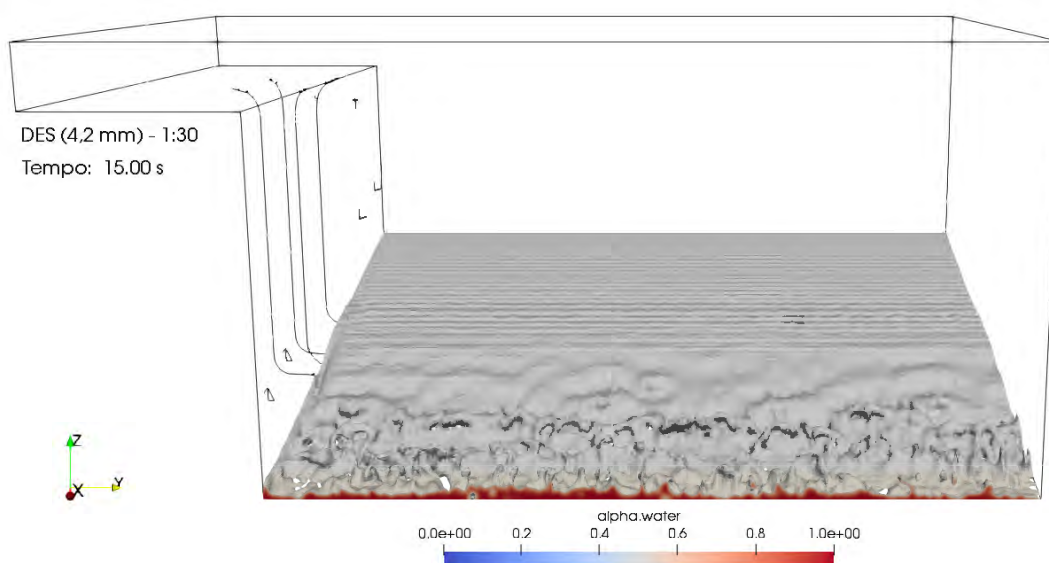
Observou-se a entrada de ar na torre de aeração, conforme mostrado na Figura 4.47. Os vetores da magnitude da velocidade do ar da figura apresentada mostraram que o ar foi transportado para jusante, logo, houve a incorporação no escoamento de água. A média da velocidade de ar no interior da torre foi de 2,2 m/s. Logo, a vazão de ar (Q_a) no interior da torre foi de 0,0176 m³/s (valor em modelo 1:30).

FIGURA 4.39 – VAZÃO DE ÁGUA DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA A MALHA COM REFINAMENTO MÁXIMO DE 6.25 cm - DES - MODELO 1:30



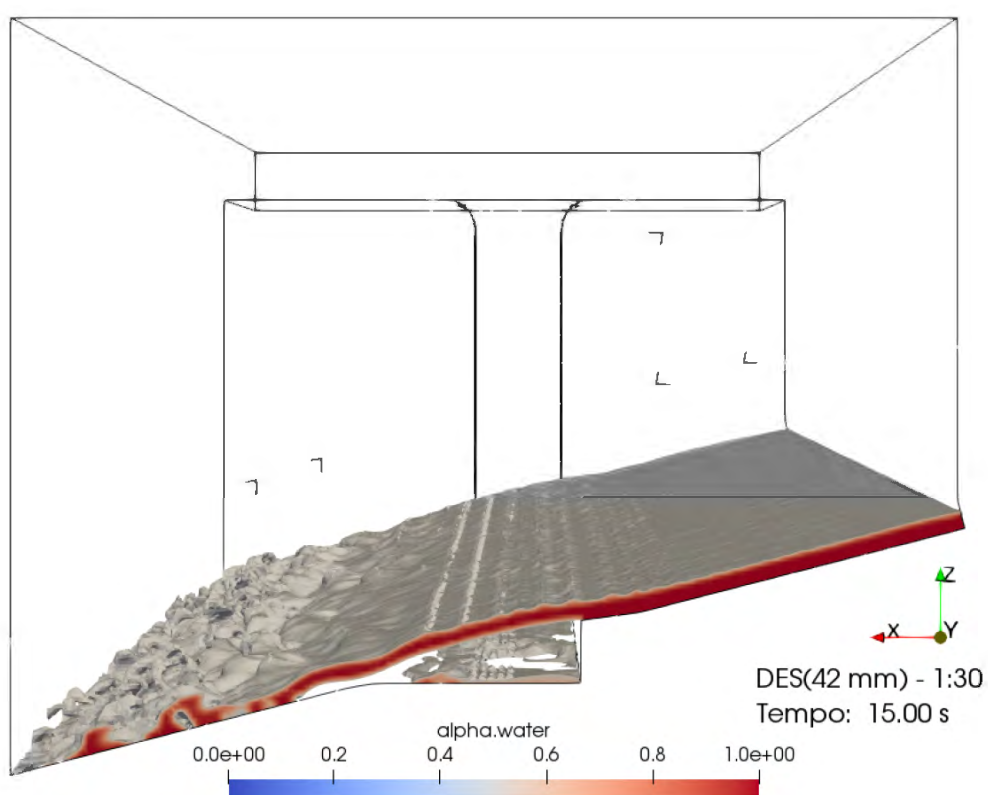
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.40 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE - MODELO 1:30



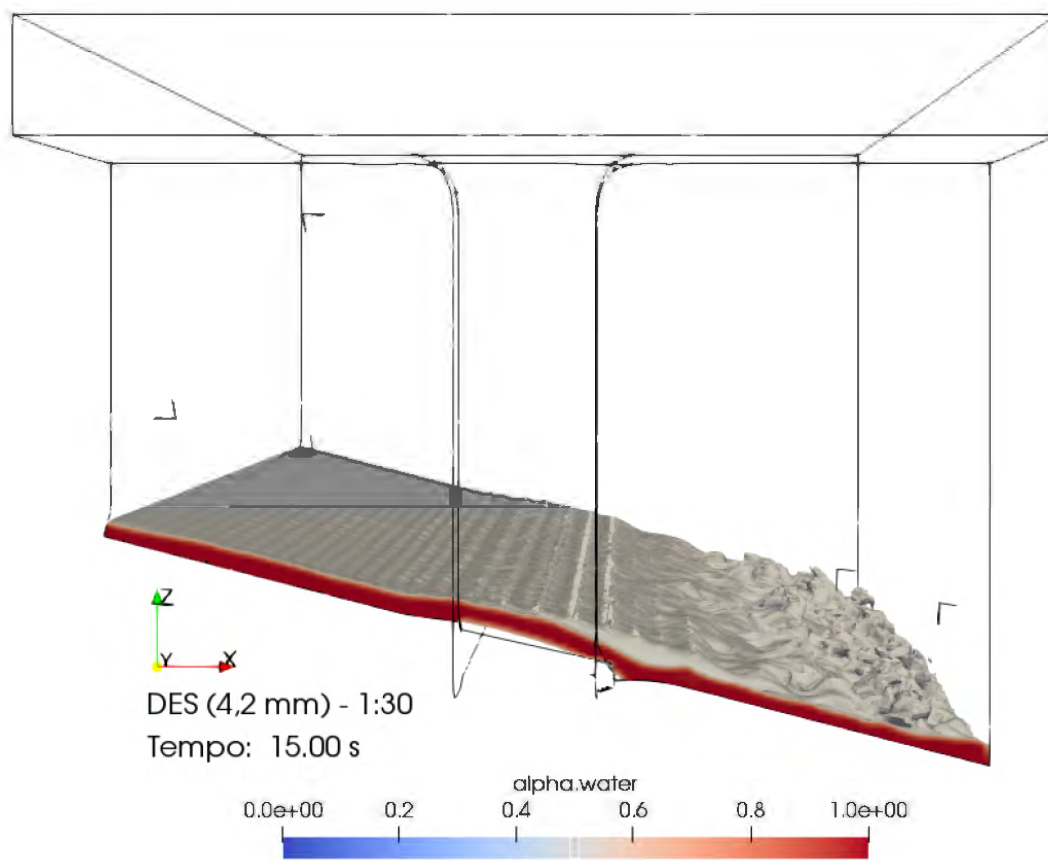
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.41 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA - MODELO 1:30



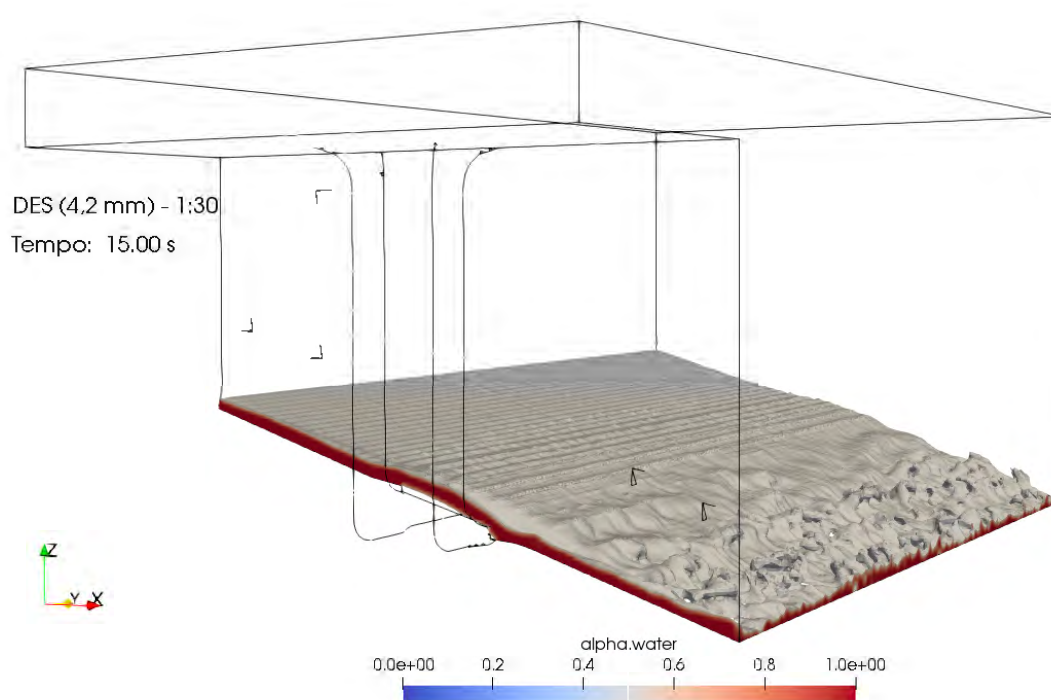
FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.42 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL ESQUERDA - MODELO 1:30



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.43 – ESCOAMENTO NA CALHA DO VERTEDOURO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL DIREITA / JUSANTE - MODELO 1:30



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.44 – VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE - VALORES DE MODELO 1:30

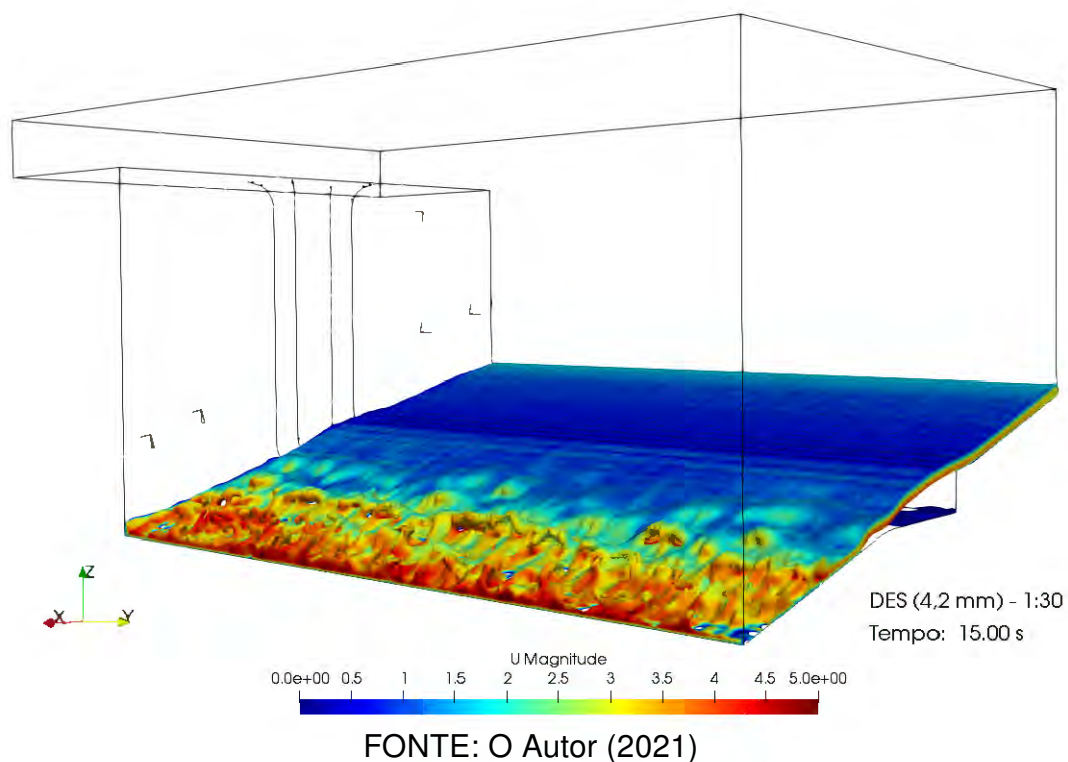


FIGURA 4.45 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - VISTA LATERAL/JUSANTE - VALORES DE MODELO 1:30

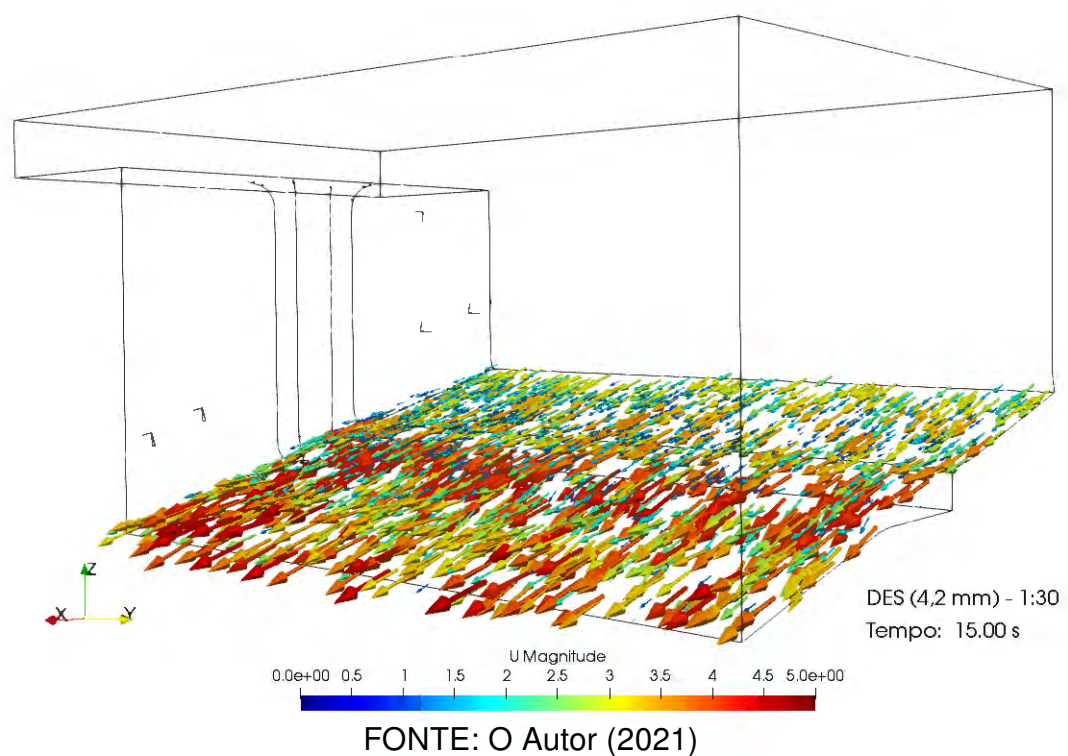
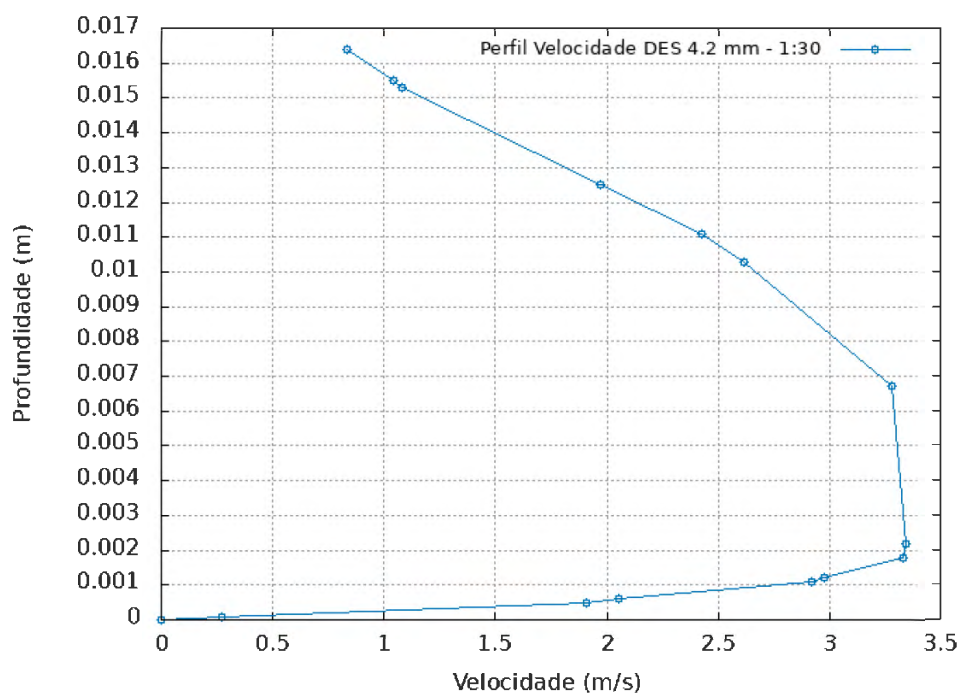
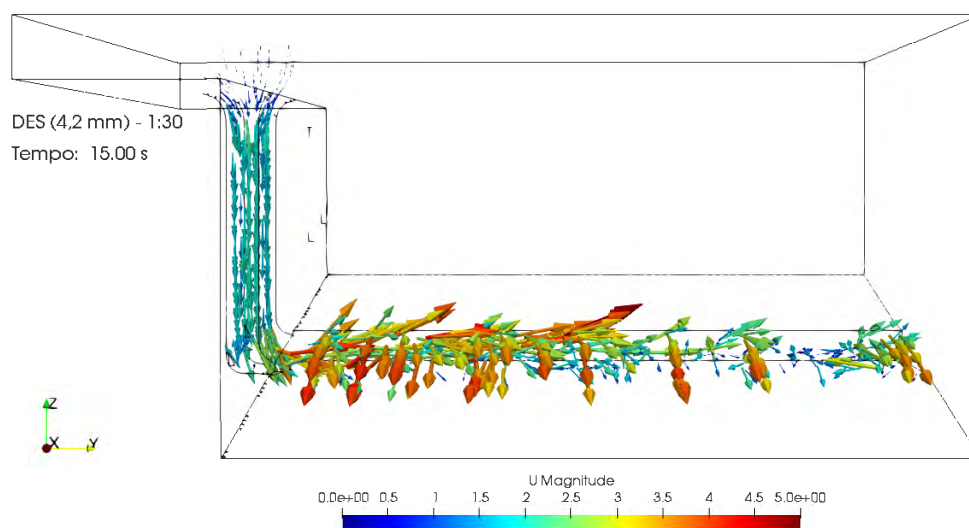


FIGURA 4.46 – PERFIL DE VELOCIDADES DO ESCOAMENTO A MONTANTE DO AERADOR DA USINA HIDRELÉTRICA DE FOZ DO AREIA - DES - 4.2 mm - VALORES DE MODELO 1:30



FONTE: O Autor (2021)

FIGURA 4.47 – VETORES DA MAGNITUDE DA VELOCIDADE DO AR NA REGIÃO DA TORRE DE AERAÇÃO E SOB O JATO DE ÁGUA DA UHE DE FOZ DO AREIA - VISTA DE JUSANTE - VALORES DE MODELO 1:30



FONTE: O Autor (2021)

4.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS COM DADOS DE PROTÓTIPO E DE MODELO FÍSICO

Nessa seção, os resultados das simulações computacionais são confrontados com dados de protótipo (Tabela 4.3) e de modelo físico de escala 1:30 (Tabela 4.4). Esses dados foram extraídos dos seguintes artigos: Pinto, Neidert e Ota (1982a), Pinto, Neidert e Ota (1982b), Pinto e Neidert (1982).

TABELA 4.3 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DADOS DE PROTÓTIPO CONSIDERANDO MEIO VÃO DA CALHA DO VERTEDOIRO

Ensaio / Parâmetro	Protótipo	RANS 12,5 cm	RANS 6,25 cm	DES 12,5 cm	DES 6,25 cm
Q_w (m ³ /s)	535,0	535,0	535,0	535,0	535,0
Q_a (m ³ /s)	395,0	116,6	57,6	231,8	216,0
β (%)	73,8	21,8	10,8	43,3	40,4
L (m)	8,2	8,3	8,2	8,0	7,6

Fonte: O Autor (2021)

TABELA 4.4 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS E RESULTADOS DE MODELO FÍSICO CONSIDERANDO MEIO VÃO DA CALHA DO VERTEDOIRO

Ensaio / Parâmetro	Modelo Físico 1:30	DES 4,2 mm 1:30
Q_w (m ³ /s)	0,1085	0,1085
Q_a (m ³ /s)	0,0095	0,0353
β (%)	8,8	32,6

Fonte: O Autor (2021)

Conforme apresentado na seção Aeração da Revisão Bibliográfica, o parâmetro de arraste de ar refere-se a razão entre a vazão de ar incorporada ao fluxo e a vazão de água do escoamento ($\beta = Q_a/Q_w$). Esse foi o principal parâmetro verificado nesse estudo. As modelagens numéricas baseadas no modelo de simulação RANS resultaram em valores de β iguais a 21,8 e 10,8% para as malhas de 12,5 e 6,25 cm, respectivamente, e representam uma diferença de 69,8% (malha de 12,5 cm) e 85,1% (malha de 6,25 cm). Portanto, com base nesses resultados, as simulações RANS não representaram adequadamente o processo de aeração no escoamento da calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia. Tal constatação foi verificada também a partir da visualização do escoamento, visto que não foram observadas instabilidades na superfície de água nem regiões de pulverização do fluxo do jato de água. Além disso, não foram observadas instabilidades adicionais do fluxo na região de impacto do jato de água com a calha do vertedouro. Provavelmente, as vazões de ar resultantes dessas simulações ocorreram em função do impacto do jato de água na calha do vertedouro

e conseqüente geração de ondas, responsáveis por transportar volumes de ar para jusante do escoamento.

O refinamento da região do escoamento foi realizado com o objetivo de obter maior precisão nos resultados numéricos e, de fato, o refinamento acarretou em escoamento mais uniforme para as modelagens com o modelo de simulação RANS. Referente a malha mais refinada, o escoamento apresentou ondas menores na região de impacto do jato de água. Por conseqüência, o arraste de ar foi menor, o que justifica a redução no valor do parâmetro de arraste de ar. No que se refere ao comprimento do jato de água, as simulações resultaram em valores da ordem de 8 m, valores da mesma ordem de grandeza do valor obtido para protótipo medido em modelo físico de escala 1:50 - ver Pinto, Neidert e Ota (1982a). Vale lembrar que esse valor é qualitativo, pois a medição foi realizada visualmente, tanto nas simulações numéricas quanto nas medições em modelo físico.

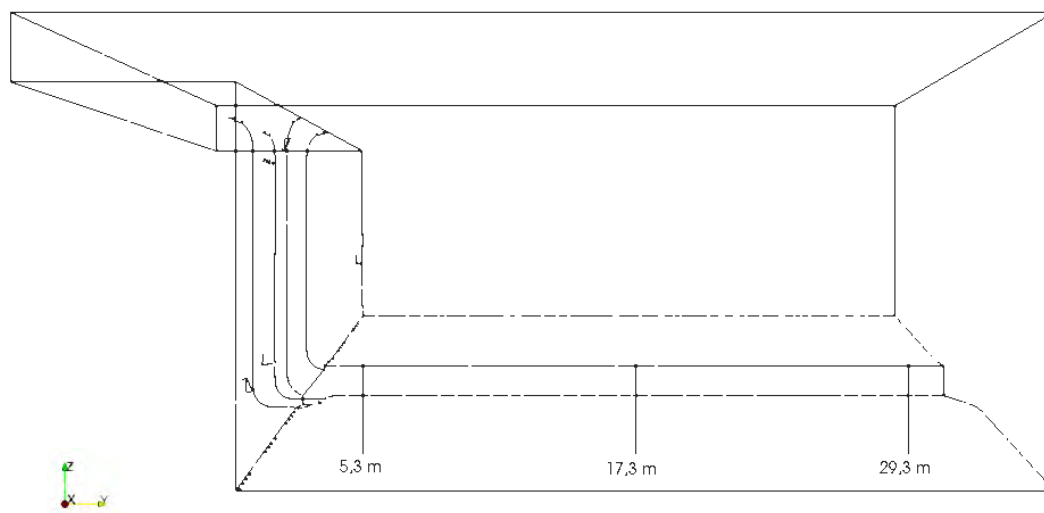
As modelagens que utilizaram o modelo de simulação DES apresentaram um comportamento mais adequado para o processo de aeração. A superfície de água apresentou o desenvolvimento de instabilidades (turbulência) no início do degrau, assim como uma região pulverizada do jato de água após o degrau. A região de impacto também mostrou-se mais adequada para o processo de aeração (região importante para a incorporação adicional do ar no fluxo), pois observou-se a dispersão do jato nessa região. Os parâmetros de arraste de ar β para as simulações DES resultaram nos valores de 43,3 e 40,4% para as malhas de 12,5 e 6,25 cm, respectivamente, que representam uma diferença de 39,9% (malha de 12,5 cm) e 44,0% (malha de 6,25 cm) em relação ao dado de protótipo ($\beta = 72,1\%$). Desse modo, inferiu-se que o modelo DES representou de maneira mais adequada o processo de aeração em relação ao modelo RANS. Os resultados obtidos para as duas simulações DES (malha de 12,5 e 6,25 cm), mesmo com a expectativa de que o refinamento da malha resultasse em diferenças significativas, foram considerados os mesmos, visto que as características do escoamento e a diferença entre as vazões de ar foram menores que 5%. Referente ao comprimento do jato de água, as simulações DES também resultaram em valores da mesma ordem de grandeza em relação ao dado de protótipo (8,0 m).

Nas modelagens com o modelo de simulação DES também foram comparadas as velocidades do ar na região abaixo do jato de água em três posições distintas (apresentadas no croqui da Figura 4.48), conforme observado na Tabela 4.5. As velocidades do ar foram iguais a 20,8, 15,8 e 9,1 m/s nas posições 5,3, 17,3 e 29,3 m, respectivamente, e representam diferenças em relação ao protótipo de 50,5, 54,9 e 64,5%. Ainda que as diferenças sejam consideradas significativas, o comportamento da redução da velocidade ao longo da região inferior do jato de água apresentou-se igual em relação aos dados de protótipo. Além disso, pode-se considerar que as

velocidades resultantes das simulações numéricas estão condizentes com as medições realizadas em protótipo, visto que os resultados numéricos foram inferiores em relação as velocidades de ar no interior da torre de aeração obtidas em protótipo.

Na simulação em escala geométrica 1:30, o resultado numérico do parâmetro de arraste de ar foi igual a 32,6%, enquanto que para o modelo físico de mesma escala o parâmetro β foi de apenas 8,8%. Esses valores indicam que, por mais que a simulação numérica não tenha apresentado por completo o processo de aeração, a entrada de ar pela torre de aeração foi maior na modelagem computacional do que no modelo físico reduzido.

FIGURA 4.48 – CROQUI DA POSIÇÃO DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE DE AR ABAIXO DO JATO DE ÁGUA



FONTE: O Autor (2021)

TABELA 4.5 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DADOS DE PROTÓTIPO - VELOCIDADE DO AR ABAIXO DO JATO DE ÁGUA

Posição (m)	Velocidade do Ar (m/s)	
	Protótipo	DES 6,25 cm
5,3	42,0	20,8
17,3	35,0	15,8
29,3	25,6	9,1

Fonte: O Autor (2021)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo do presente trabalho foi investigar se o uso da dinâmica dos fluidos computacional é capaz de simular adequadamente o processo de aeração em escoamentos de altas velocidades, mais precisamente, o escoamento sobre a calha do vertedouro da Usina Hidrelétrica de Foz do Areia. Dessa forma, foram realizadas duas abordagens principais de simulações numéricas, uma considerando a escala de protótipo e outra a escala geométrica 1:30.

Para a escala de protótipo foram realizadas modelagens numéricas utilizando dois modelos de simulação, o *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* - RANS em conjunto com o modelo de turbulência $k - \omega$ SST e o *Detached-Eddy Simulation* - DES em conjunto com o modelo Spalart-Allmaras DDES. Nessas simulações, foram verificadas duas malhas computacionais (malhas com tamanhos de células de 12,5 cm e 6,25 cm). A simulação com malhas de tamanhos de células diferentes foi realizada com o objetivo de buscar maior precisão nos resultados com malhas mais refinadas e, conseqüentemente, buscar uma representação adequada do processo de aeração. Na simulação com escala geométrica 1:30, foi realizada a modelagem numérica apenas com o modelo de simulação DES e com tamanho de células de 4,2 mm. Não foi realizada a simulação utilizando o modelo RANS porque verificou-se nas simulações de protótipo que esse modelo não representou adequadamente o escoamento sobre a calha do vertedouro. Todas as simulações numéricas foram realizadas com o auxílio do programa de licença gratuita OpenFOAM.

A etapa de pré-processamento foi tratada com muita atenção visando a qualidade dos resultados numéricos. Verificou-se que essa etapa demandou mais de 50% do tempo das modelagens computacionais.

Na sequência são descritas as principais conclusões e observações das simulações numéricas.

As modelagens com o modelo de simulação RANS não representaram adequadamente o processo de aeração em nenhuma das duas malhas computacionais. O escoamento sobre a calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia caracterizou-se por um escoamento uniforme e sem a presença de turbulência dos vórtices de grande escala. Foram observadas apenas pequenas ondulações na superfície de água a jusante do dispositivo de aeração, sendo que essas ondulações foram menos intensas na malha mais refinada. Referente à vazão de ar no interior da torre de aeração, as simulações numéricas geraram valores iguais a 116,6 e 57,6 m³/s para as malhas de 12,5 e 6,25 cm, respectivamente, que representam uma diferença de 70,5 e 85,4% em

relação a vazão de ar de protótipo. A partir dos resultados das modelagens numéricas e da análise qualitativa do comportamento do escoamento, concluiu-se que as vazões de ar obtidas foram resultados do impacto do jato de água na calha do vertedouro, o que gerou pequenas perturbações do escoamento e, em consequência, auxiliou a entrada e o transporte de ar para jusante.

Era esperado que o escoamento de água sobre a calha do vertedouro apresentasse perturbações a jusante do sistema de aeração. A superfície livre de água deveria apresentar perturbações acentuadas e o jato de água deveria caracterizar-se como pulverizado, o qual possui alta eficiência na retenção de ar. Do mesmo modo, a região de impacto do jato de água também deveria caracterizar-se dessa forma, o que incorporaria uma quantidade de ar adicional ao fluxo. Com a finalidade de reproduzir tais características, foram realizadas simulações numéricas com o modelo DES.

As modelagens com o modelo de simulação DES representaram mais adequadamente as características do escoamento sobre a calha do vertedouro, o que conduziu a resultados de vazões de ar no interior da torre de aeração maiores em relação as simulações RANS e, por consequência, indicou que o processo de aeração foi melhor representado. Nessas novas simulações, o escoamento caracterizou-se por turbulência acentuada na superfície de água após o degrau da calha. Sendo que o jato de água, assim como a região de impacto do jato, caracterizou-se por um escoamento pulverizado (simulação com tamanho da célula de 6,25 cm). De maneira geral, concluiu-se que o modelo DES permitiu a caracterização adequada do comportamento do escoamento. As simulações numéricas apresentaram valores de vazões de entrada de ar na torre de aeração iguais a 231,8 e 216,0 m³/s referente as malhas de 12,5 e 6,25 cm, respectivamente, que representam uma diferença de 41,3 e 45,3% em relação a vazão de ar de protótipo ($Q_a = 395$ m³/s). Os resultados obtidos nas duas simulações DES foram considerados os mesmos, visto que as características do escoamento permaneceram similares e a diferença de vazão de entrada de ar foram menores que 5% entre as duas simulações, mesmo com a expectativa do refinamento da malha resultasse em valores mais significativos.

Nas simulações com o modelo DES também foram comparadas as velocidades do ar sob o jato de água em três posições diferentes. Os valores obtidos foram iguais a 20,8, 15,8 e 9,1 m/s nas posições 5,3; 17,3 e 29,3 m, respectivamente, que representam diferenças em relação aos dados de protótipo de 50,5, 54,9 e 64,5%. Concluiu que, por mais que as diferenças de valores de velocidade e vazão de ar tenham sido consideradas significativas, o comportamento da redução da velocidade ao longo da região inferior do jato de água foi representado nas simulações numéricas.

Na simulação numérica em escala geométrica 1:30 observou-se turbulência do fluxo após o jato de água atingir a calha do vertedouro. Na região do degrau, verificaram-

se apenas pequenas perturbações na superfície de água. Referente à vazão de ar, o modelo numérico apresentou valor igual a $0,0353 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que o modelo físico de mesma escala apresentou um valor igual a apenas $0,0095 \text{ m}^3/\text{s}$. Esses valores indicam que, por mais que a simulação numérica não tenha representado por completo o processo de aeração, a entrada de ar pela torre de aeração foi maior na modelagem computacional do que no modelo físico reduzido. Entretanto, esperava-se que o modelo computacional gera-se resultados semelhantes ao modelo físico, visto que os dois modelos são baseados no critério de semelhança de Froude. Ou seja, os resultados do modelo computacional podem indicar que os efeitos de escala foram desprezados. Em relação ao comportamento do escoamento, os resultados numéricos em escala 1:30 parecem consistentes, pois, conforme esperado em função da escala do modelo, a aeração foi menor. Em protótipo, é possível a visualização da aeração do escoamento na calha do vertedouro. Já em modelos de escala 1:100, o escoamento se apresenta sem perturbações. E a aeração, quando ocorre, inicia em uma posição mais a jusante.

Em todas as simulações o comprimento do jato de água resultou em valores próximos ao valor de protótipo. Vale lembrar que essa análise é qualitativa, pois a definição do comprimento do jato foi realizada visualmente, tanto na modelagem numérica quanto nos dados de protótipo e de modelo físico.

De maneira geral, a utilização da modelagem numérica para este estudo permitiu avaliar o escoamento sob a calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia de uma forma que seria consideravelmente mais complexa de modo experimental. E, por mais que os resultados da entrada de vazão de ar das simulações em escala de protótipo não tenham alcançado os valores medidos em obra, o comportamento do escoamento foi representado adequadamente nas simulações DES (mesmo com uma malha considerada grosseira - com células de $6,25 \text{ cm}$) em função da análise apresentada dos resultados obtidos.

Para trabalhos futuros, recomenda-se primeiramente analisar o processo de aeração para outras vazões de vertimento do vertedouro. Essa análise permitirá verificar se as diferenças de vazões de entrada de ar seguem a mesma ordem de grandeza. Também seria interessante a avaliação de malhas mais refinadas, da ordem do milímetro considerando a escala de protótipo. Malhas mais refinadas permitirão representar com maior precisão as escalas dos pequenos vórtice de turbulência. Essas verificações permitirão concluir se o modelo de simulação DES junto com o modelo de turbulência Spalart-Allmaras DDES e o *solver* *interFoam* são, de fato, adequados para representar o processo de aeração na calha do vertedouro da UHE de Foz do Areia.

Caso essa metodologia não seja adequada, recomenda-se avaliar a utilização de outros modelos de turbulência, com preferência nos modelos de duas equações, tal como o $k - \omega$ SST em conjunto com o modelo de simulação DES. Além disso,

recomenda-se avaliar a utilização de outros *solvers* disponíveis no OpenFOAM, como o `twoPhaseEulerFoam`, em conjunto com os modelos DES ou LES. A utilização do modelo LES é sugerida visto que esse modelo permite obter resultados mais detalhados do escoamento simulado.

Outra recomendação para trabalhos futuros refere-se à estudos utilizando diferentes escalas geométricas, tendo em vista que a literatura dispõe de informações de modelagem física da UHE de Foz do Areia para escalas 1:8, 1:15 e 1:50. Esses estudos permitirão verificar se a modelagem computacional representa o processo de aeração com diferentes escalas e seguindo o critérios de semelhança de Froude.

REFERÊNCIAS

ALVES, A. A. M. **Caracterização das Solicitações Hidrodinâmicas em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico com Baixo Número de Froude**. 157 p. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 44.

ALWON, J. V. et al. Prediction of Air Entrainment in Skimming Flow Over Stepped Spillways Using Numerical Methods. **38th IAHR World Congress**, p. 11, 2019. Citado na página 91.

ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications**. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1995. 287 p. ISSN 0009286X. ISBN 0070016852. Disponível em: <<https://soaneemrana.org/onewebmedia/COMPUTATIONALFLUIDDYNAMICSBYJHONDANDERSON2JR..pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 77.

ANDERSSON, B. et al. **Computational Fluid Dynamics for Engineers**. First. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012. v. 9781107018. 212 p. ISBN 9781139093590. Citado 22 vezes nas páginas 52, 53, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 77, 79 e 91.

ARANTES, E. J. et al. Lower Nappe Aeration in Smooth Channels: Experimental Data and Numerical Simulation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 82, n. 2, p. 521–537, 2010. ISSN 16782690. Citado na página 22.

ARAUJO, M. F. F. **Modelagem Computacional Tridimensional de Escoamentos em Vertedouros de Baixa Queda**. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2014. Citado na página 84.

AYDIN, M. C.; ISIK, E.; ULU, A. E. Numerical Modeling of Spillway Aerators in High-head Dams. **Applied Water Science**, Springer International Publishing, v. 10, n. 1, p. 1–9, 2019. ISSN 2190-5487. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13201-019-1126-2>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 48.

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Verification and Validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD) Model for Air Entrainment at Spillway Aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 36, n. 5, p. 826–836, 2009. ISSN 03151468. Citado 6 vezes nas páginas 23, 31, 32, 37, 46 e 50.

AYDIN, M. C.; ULU, A. E.; KARADUMAN, Ç. Investigation of Aeration Performance of Ilisu Dam Outlet Using Two-phase Flow Model. **Applied Water Science**, Springer International Publishing, v. 9, n. 4, p. 1–13, 2019. ISSN 2190-5487. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13201-019-0982-0>>. Citado 4 vezes nas páginas 23, 38, 48 e 49.

BAYON-BARRACHINA, A.; LOPEZ-JIMENEZ, P. A. Numerical Analysis of Hydraulic Jumps Using OpenFOAM. **Journal of Hydroinformatics**, v. 17, n. 4, p. 662–678, 2015. ISSN 14647141. Citado 4 vezes nas páginas 73, 77, 91 e 95.

- BLAZEK, J. **Computational Fluid Dynamics Principles and Applications**. Third edit. [S.l.]: Elsevier Ltd., 2007. 451 p. ISBN 9780080999951. Citado na página 79.
- BOLLER, F. Experimental Investigation of Air Circulation Patterns in Classical Hydraulic Jumps. **International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures**, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 37.
- BRENNAN, D. **The Numerical Simulation of Two-Phase Flows in Settling Tanks**. 127 p. Tese (Thesis) — University of London, 2001. Citado na página 77.
- BRITO, R. J. R. **Análise da Aeração em Escoamentos de Altas Velocidades em Calhas de Vertedores**. 91 p. Tese (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 25, 28, 31, 32 e 35.
- CARVALHO, R. F.; BEG, M. N. A.; LOPES, P. M. Experimental and Numerical Characterisation of a Jet Impingement on a Pool. **38th IAHR World Congress - "Water: Connecting the World"**, v. 38, p. 3487–3494, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 91.
- CASTRO, A. M.; LI, J.; CARRICA, P. M. A Mechanistic Model of Bubble Entrainment in Turbulent Free Surface Flows. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier Ltd, v. 86, p. 35–55, 2016. ISSN 03019322. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.07.005>>. Citado na página 54.
- CELIK, I. B. Introductory Turbulence Modeling. p. 99, 1999. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~im450/palestras/&artigos/ASME/Tubulence/cds13work>>. Citado na página 55.
- CHANSON, H. **Study of Air Entrainment and Aeration Devices on Spillway Model**. Tese (Doutorado) — University of Canterbury, 1988. Citado 4 vezes nas páginas 26, 31, 32 e 36.
- CHANSON, H. Study of Air Entrainment and Aeration Devices. **Journal of Hydraulic Research**, v. 27, n. 3, p. 301–319, 1989. ISSN 00221686. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 32 e 36.
- CHANSON, H. Air Entrainment in Chute and Tunnel Spillways. **11th Australasian Fluid Mechanics Conference**, 1992. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 36.
- CHANSON, H. Self-aerated Flows on Chutes and Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 119, n. 2, p. 220–243, 1993. ISSN 19437900. Citado 5 vezes nas páginas 24, 26, 31, 32 e 36.
- CHANSON, H. **Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent Flows**. [S.l.: s.n.], 1995. CH 46/95. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796. Citado na página 25.
- CHANSON, H. **Air Bubble Entrainment In Free-Surface Turbulent Shear Flows**. [S.l.: s.n.], 2006. Citado 6 vezes nas páginas 24, 25, 40, 41, 42 e 43.
- CHANSON, H. Turbulent Air-water Flows in Hydraulic Structures: Dynamic Similarity and Scale Effects. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 9, n. 2, p. 125–142, 2008. ISSN 15677419. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 47.

CHANSON, H. Phase-detection measurements in free-surface turbulent shear flows. **Journal of Geophysics and Engineering**, IOP Publishing, v. 13, n. 2, p. S74–S87, 2016. ISSN 17422140. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/1742-2132/13/2/S74>>. Citado na página 25.

CHANSON, H.; GUALTIERI, C. Similitude and Scale Effects of Air Entrainment in Hydraulic Jumps. **Journal of Hydraulic Research**, v. 46, n. 1, p. 35–44, 2008. ISSN 00221686. Citado na página 46.

DAMINÁN, S. M. Description and Utilization of InterFoam Multiphase Solver. p. 1–64, 2004. Citado na página 79.

ERVINE, D. A.; FALVEY, H. T. Behaviour of Turbulent Water Jets in the Atmosphere and in Plunge Pools. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers (London)**, v. 83, n. pt 2, p. 295–314, 1987. ISSN 00203262. Citado na página 25.

FALVEY, H. T. Cavitation in Chutes and Spillways. **Water Resources Technical**, n. No. 42, 1990. Citado na página 24.

FARIA, T. M. G. A. **Modelação Numérica de Escoamentos sobre Descarregadores em Degraus**. 92 p. Tese (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 50, 54, 59, 60, 71 e 91.

FERREIRA, V. G.; LIMA, G. A. B. de; CORRÊA, L. Simulação Computacional de Alguns Problemas em Dinâmica dos Fluidos. **9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications**, p. 1330–1418, 2010. Citado na página 49.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Third. [S.l.]: Springer, 2002. 431 p. ISBN 3540420746. Citado 6 vezes nas páginas 51, 54, 55, 56, 57 e 76.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5 ed.. ed. LTC, 2001. 520 p. ISBN 8576051826. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=QDiQPgAACAAJ&pgi>>. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 40.

FREITAS, G. H. S.; MICHELS, F. S.; PASSOS, W. E. Análise Dimensional e Aplicação Hidráulica do Teorema Pi de Buckingham. p. 18, 2015. Citado na página 40.

FUHRHOP, H.; SCHULZ, H. E.; WITTENBERG, H. Solução para Aeradores de Fundo em Vertedores. **XXV Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, p. 10, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

GEORGE, W. K. **Lectures in Turbulence for the 21st Century**. London: [s.n.], 2013. 303 p. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

GREENSHIELDS, C. J. OpenFOAM - User Guide. Version 7, p. 237, 2019. Citado 6 vezes nas páginas 71, 75, 76, 78, 93 e 95.

HELLER, V. Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 3, p. 293–306, 2011. ISSN 00221686. Citado 4 vezes nas páginas 23, 37, 38 e 39.

HINZE, J. O. **Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory**. [S.l.]: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1959. 586 p. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. **Journal of Computational Physics**, v. 39, p. 201–225, 1981. ISSN 23641827. Citado na página 70.

HOLZINGER, G. **OpenFOAM: A Little User-Manual**. [S.l.], 2017. 305 p. Citado 3 vezes nas páginas 73, 75 e 78.

HOLZMANN, T. **Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM®**. Fourth. [S.l.: s.n.], 2017. 167 p. Citado na página 77.

KOBUS, H. Local Air Entrainment and Detrainment. **Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures**, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 44.

KÖKPINAR, M. A.; GÖĞÜŞ, M. High-speed Jet Flows Over Spillway Aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 885–898, 2002. ISSN 03151468. Citado 4 vezes nas páginas 28, 31, 32 e 35.

KOSCHITZKY, H.-P.; KOBUS, H. Hydraulics and Design of Spillway Aerators for Cavitation Prevention in High Speed Flows. **The International Symposium on Hydraulics for High Dams**, p. 724–733, 1988. Citado 7 vezes nas páginas 26, 27, 29, 30, 31, 32 e 34.

KRAMER, K.; HAGER, W. H.; MINOR, H. E. Development of Air Concentration on Chute Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 9, p. 908–915, 2006. ISSN 07339429. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

LAUNDER, B. E.; REECE, G. J.; RODI, W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 68, n. 3, p. 537–566, 1975. ISSN 14697645. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.

LIMA, A. C. d. M. **Caracterização da Estrutura Turbulenta em Escoamentos Aerados em Canal de Forte Declividade com Auxílio de Técnicas de Velocimetria a Laser**. 421 p. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, 2003. Citado na página 22.

LIMA, A. C. d. M.; SCHULZ, H. E.; GULLIVER, J. S. Air Uptake Along the Lower Nappe of a Spillway Aerator. **Journal of Hydraulic Research**, v. 46, n. 6, p. 839–843, 2008. ISSN 00221686. Citado na página 22.

MANAFPOUR, M.; EBRAHIMNEZHADIAN, H. The Multiphase Capability of Openfoam CFD Toolbox in Solving Flow Field in Hydraulic Structure. **4th International Conference on Long-Term Behavior and Eco-Friendly Dams**, n. Ltbd, p. 323–330, 2017. Citado na página 78.

MENTER, F. R. Zonal Two Equation k-w , Turbulence Models for Aerodynamic Flows. **AIAA Journal**, n. 2906, 1993. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM and Matlab**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2016. 798 p. ISBN 9783319168739. Citado na página 76.

PATANKAR, S. V.; SPALDING, D. B. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 15, p. 1787–1806, 1972. Citado na página 77.

PFISTER, M. Chute Aerators: Steep Deflectors and Cavity Subpressure. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 10, p. 1208–1215, 2011. ISSN 07339429. Citado 3 vezes nas páginas 29, 31 e 32.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models by Valentin Heller. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, p. 244–246, 2012. ISSN 00221686. Citado 5 vezes nas páginas 22, 42, 43, 46 e 47.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 136, n. 6, p. 352–359, 2010. ISSN 07339429. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. II: Hydraulic Design. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 136, n. 6, p. 360–367, 2010. ISSN 07339429. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. History and Significance of the Morton Number in Hydraulic Engineering. **Journal of Hydraulic Engineering**, p. 6, 2014. ISSN 19437900. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 44.

PINTO, N. L. d. S. **Hidráulica Aplicada**. Curitiba: Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza - Universidade Federal do Paraná, 1987. 95 p. Citado na página 34.

PINTO, N. L. d. S. Prototype Aerator Measurements. In **Air Entrainment in Free-Surface Flows**. Edited by I.R. Wood. **A. A. Balkema Publications**, p. 115–130, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 22, 35 e 36.

PINTO, N. L. d. S.; NEIDERT, S. H. Model Prototype Conformity in Aerated Spillway Flow. **Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures**¹, p. 273–284, 1982. Citado na página 126.

PINTO, N. L. d. S.; NEIDERT, S. H. Evaluating Entrained Air Flow Through Aerators. **Water Power & Dam Construction**, v. 35, n. 8, p. 40–42, 1983. Citado 4 vezes nas páginas 22, 31, 32 e 33.

PINTO, N. L. d. S.; NEIDERT, S. H.; OTA, J. J. Aeration at High Velocity Flows. **Water Power & Dam Construction**, v. 34, n. 2/3, p. 34–38, 42–44, 1982. Citado 13 vezes nas páginas 22, 31, 32, 33, 81, 82, 83, 94, 95, 96, 97, 126 e 127.

PINTO, N. L. d. S.; NEIDERT, S. H.; OTA, J. J. Prototype and Laboratory Experiments on Aeration at High Velocity Flows. **Water Power & Dam Construction**, p. 24, 1982. Citado 17 vezes nas páginas 22, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 41, 42, 45, 81, 95, 97 e 126.

POLITANO, M.; CARRICA, P.; WEBER, L. A Multiphase Model for the Hydrodynamics and Total Dissolved Gas in Tailraces. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier Ltd., v. 35, n. 11, p. 1036–1050, 2009. ISSN 03019322. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.06.009>>. Citado 4 vezes nas páginas 95, 96, 97 e 120.

RAMALHO, K. T. **Modelagem Computacional Tridimensional do Escoamento em Adufas de Desvio**. 110 p. Tese (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 49, 50, 51 e 56.

RUSCHE, H. **Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions**. 343 p. Tese (Doutorado) — University of London, 2002. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1806799.1806850>>. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 70.

RUTSCHMANN, P.; HAGER, W. H. Air Entrainment by Spillway Aerators. **J. Hydraul. Eng.**, v. 5, n. 6, p. 765–782, 1990. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 34.

SAGAUT, P.; DECK, S.; TERRACOL, M. **Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence**. London: Imperial College Press, 2006. 356 p. ISBN 9781860948978. Citado na página 64.

SAKHUJA, V. S.; PAUL, T. C.; SINGH, S. Air Entrainment Distortion in Free Surface Flows. **Irrigation and Power Research Institute**, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

SCHULZ, H. E.; BRITO, R. Equações com Bases Físicas para Aerador de Fundo: Análise de Dados e Modelo. p. 16, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 36.

SHUR, M. et al. Detached-Eddy Simulation of an Airfoil at High Angle of Attack. **Engineering Turbulence Modelling and Experiments**, Woodhead Publishing Limited, v. 4, p. 669–678, 1999. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-008043328-8/50064-3>>. Citado na página 63.

SOUZA, J. F. A. de et al. Uma Revisão sobre a Turbulência e sua Modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21–41, 2011. Citado na página 56.

SPALART, P. R. et al. A New Version of Detached-Eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities. **Theoretical and Computational Fluid Dynamics**, v. 20, n. 3, p. 181–195, 2006. ISSN 09354964. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 65.

TASSINARI, L. C. d. S. et al. Efeitos de Escala em Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus: Investigação Numérica e Computacional. **XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, p. 12, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 23, 38, 47 e 50.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A First Course in Turbulence**. Cambridge: The MIT Press, 1972. 310 p. ISSN 0029-5639. ISBN 9780262200196. Citado na página 53.

TERRIER, S. C. O. **Hydraulic Performance of Stepped Spillway Aerators and Related Downstream Flow Features**. 338 p. Tese (Doutorado) — École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 23, 31, 32 e 37.

TORRES, C. et al. Investigating Scale Effects of a Hydraulic Physical Model with 3D CFD. **Smart Dams and Reservoirs - Proceedings of the 20th Biennial Conference of the British Dam Society**, p. 89–101, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 23, 37, 47, 48 e 49.

- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Second. [S.l.]: Pearson Education Limited, 2007. 517 p. ISBN 9780131274983. Citado 10 vezes nas páginas 54, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 72 e 77.
- VISCHER, D.; VOLKART, P.; SIGENTHALER, A. Hydraulic Modelling of Air Slots in Open Chute Spillways. **Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures**, p. 239–252, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- VOLKART, P.; RUTSCHMANN, P. Air Entrainment Devices (Air Slots). n. 72, 1984. Citado 5 vezes nas páginas 28, 29, 30, 31 e 32.
- WEI, W. R. et al. Free-surface Air Entrainment in Open-channel Flows. **Science China Technological Sciences**, v. 60, n. 6, p. 893–901, 2016. ISSN 1862281X. Citado na página 24.
- WILCOX, D. C. **Turbulence Modelling for CFD**. Third edit. DCW Industries, Inc., 2006. 536 p. ISBN 9781928729082. Disponível em: <<http://www.dcwindustries.com>>. Citado na página 63.
- WOOD, I. R. Air Water Flows. **International Association for Hydro-Environment Engineering and Research**, 1985. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 32 e 33.
- YANG, J.; TENG, P.; ZHANG, H. Experiments and CFD Modeling of High-Velocity Two-phase Flows in a Large Chute Aerator Facility. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 13, n. 1, p. 48–66, 2019. ISSN 1997003X. Citado 4 vezes nas páginas 23, 31, 32 e 48.