

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCELO YUDI MINODA TAKENOBU

AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DO COMPRIMENTO DE DEFLETORES PARA TDG EM  
VERTEDOUROS COM BACIA DE DISSIPAÇÃO UTILIZANDO OPENFOAM

CURITIBA

2025

MARCELO YUDI MINODA TAKENOBU

AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DO COMPRIMENTO DE DEFLETORES PARA *TDG* EM  
VERTEDOUROS COM BACIA DE DISSIPACÃO UTILIZANDO OPENFOAM

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: Prof. José J. Ota, DSc

(Prof. Fernando Andrade, DSc — em memória)

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Takenobu, Marcelo Yudi Minoda

Avaliação hidráulica do comprimento de defletores para gases totais dissolvidos (TDG) em vertedouros com bacia de dissipação utilizando OpenFOAM / Marcelo Yudi Minoda Takenobu. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: José Junji Ota

1. Defletores. 2. Vertedouros. 3. Dinâmica dos fluidos. 4. Fluidodinâmica computacional. 5. Gases totais dissolvidos. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Ota, José Junji. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MARCELO YUDI MINODA TAKENOBU** intitulada: **Avaliação hidráulica do comprimento de defletores para TDG em vertedouros com bacias de dissipação utilizando OpenFOAM**, 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, 24 de Janeiro de 2025.

Assinatura Eletrônica  
10/02/2025 14:11:43.0

JOSÉ JUNJI OTA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
19/02/2025 17:33:02.0

LUIS MAURICIO ROMERO MÉRIDA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
29/01/2025 10:05:34.0

ANDRE LUIZ TONSO FABIANI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
30/01/2025 16:16:05.0

BRUNO VICTOR VEIGA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - DEP. DE  
HIDRÁULICA)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por todos os momentos de provação e sabedoria ao longo desta jornada. Sem Ele, a concretização deste trabalho não seria possível.

Aos meus pais, Ademar e Eliana, pelo amor incondicional e ensinamentos que sempre me inspiraram.

Dedico um agradecimento especial e póstumo ao meu orientador, Profº Fernando Oliveira de Andrade, cuja orientação e contribuições foram fundamentais para este trabalho. Sua sabedoria, paciência e generosidade em compartilhar conhecimentos marcaram minha jornada acadêmica e profissional. Apesar de sua partida prematura, o seu legado permanece vivo em todos que tiveram o privilégio de aprender com ele. Minha gratidão por tudo o que ele fez por mim e por tantos outros alunos. Que sua memória continue sendo uma fonte de inspiração.

Agradeço também ao Profº José J. Ota pelo apoio e pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho. Estendo também minha gratidão aos professores da banca, André Fabiani, Bruno Veiga e Maurício Romero, pela paciência, pelas sugestões construtivas e pelo apoio técnico, que foram fundamentais para a realização deste estudo. Agradeço também ao PPGERHA, pelo suporte e compreensão durante minha trajetória no programa.

Aos meus amigos da antiga divisão de hidráulica do CEHPAR/LACTEC, de 2016 a 2024, que foram essenciais em cultivar a minha paixão pela hidráulica — em especial ao meu antigo supervisor, Carlos Olavo Slota Ovelar. Também agradeço aos meus amigos Peterson Beherend, Ugo Leal e Thiago Godoy pelos momentos de descontração que equilibraram a rotina dupla de trabalho e estudos. Sua amizade e apoio foram pilares essenciais.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta caminhada, meu muito obrigado. Este trabalho é, de certa forma, reflexo das contribuições e do suporte de cada um de vocês.

*A fé mostra a realidade que esperamos e dá a convicção daquilo que não vemos  
(Hebreus 11:1)*

## RESUMO

No contexto de empreendimentos hidrelétricos, vertedouros são estruturas responsáveis para extravasar volumes excedentes de água dos reservatórios para garantir a segurança dos empreendimentos. A operação dessas estruturas de controle pode ocasionar também erosões no leito do rio e em alguns casos, a mortalidade de peixes por supersaturação de gases totais dissolvidos (*TDG - total dissolved gases*). Os principais registros desse impacto na ictiofauna local foram em usinas hidrelétricas localizadas nos rios Columbia e Snake (EUA), dotadas de vertedouros de ogiva com bacia de dissipação. A construção de defletores horizontais na calha do vertedouro é uma solução comumente utilizada para mitigar a supersaturação de gás na água e, desse modo, também reduz a mortalidade dos peixes. Os defletores alteram a hidrodinâmica do escoamento, de acordo com a vazão vertida e nível de água de jusante, pode produzir quatro principais regimes de escoamento: *plunging flow*, *skimming flow*, *undular jet* e *surface jump*. O processo de definição da geometria dos defletores costuma ser realizada com auxílio de modelos físicos e computacionais e considera principalmente as condições hidráulicas de operação mais recorrentes. Desse modo, o presente trabalho busca avaliar de modo sistemático o efeito do comprimento de defletores na hidrodinâmica do escoamento. O método utilizado considerou a elaboração de um modelo computacional DES (*detached eddy simulation*) calibrado com testes realizados em um modelo físico reduzido na escala geométrica 1:15. Foram realizadas 22 simulações no *software* OpenFOAM. Foi observado baixa influência do comprimento na alteração dos regimes do escoamento. Além disso, foi observado um efeito na redução da capacidade de descarga para vazões mais elevadas com a estrutura do defletor. O presente trabalho e os estudos desenvolvidos em modelo reduzido fazem parte do projeto de P&D ANEEL 6491-0541/2019 “Metodologia para Modelagem Computacional de TDG na Água em Fluxos Efluentes de Vertedouros” em que o autor esteve incluído desde o início dos estudos.

Palavras-chaves: Defletor. Vertedouro. Dinâmica dos fluidos computacional. OpenFOAM. Simulação DES. TDG.

## ABSTRACT

In the context of hydroelectric projects, spillways are structures responsible for releasing excess water from reservoirs to ensure the safety of the facilities. The operation of these control structures can also lead to riverbed erosion and, in some cases, fish mortality due to supersaturation of total dissolved gases (TDG). The main records of this impact on local ichthyofauna were observed at hydroelectric plants located on the Columbia and Snake rivers (USA), equipped with ogee spillways and stilling basins. The construction of horizontal deflectors on the spillway chute is a commonly used solution to mitigate gas supersaturation in the water and, consequently, reduce fish mortality. Deflectors modify the flow hydrodynamics and, depending on the discharged flow rate and downstream water level, can produce four main flow regimes: plunging flow, skimming flow, undular jet, and surface jump. The process of defining deflector geometry is often carried out with the aid of physical and computational models, primarily considering the most recurrent hydraulic operating conditions. Therefore, the present study aims to systematically evaluate the effect of deflector length on flow hydrodynamics. The method employed involved developing a computational DES (Detached Eddy Simulation) model calibrated with tests conducted on a 1:15 geometric scale physical model. A total of 22 simulations were performed using the OpenFOAM software. The results showed a low influence of deflector length on flow regime changes. Furthermore, the deflector structure reduced discharge capacity for higher flow rates. This study, along with the reduced-scale model tests, is part of the ANEEL R&D project 6491-0541/2019, "Methodology for Computational Modeling of TDG in Water in Spillway Effluent Flows", in which the author has been involved since the project's inception.

Key-words: Deflector. Spillway. Computational fluid dynamics. OpenFOAM. Detached Eddy Simulation. TDG.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – PROCESSO DE FORMAÇÃO E DISSIPACÃO DE TDG A JUSANTE DE VERTEDOUROS COM BACIA DE DISSIPACÃO . . .	21
FIGURA 2.2 – BOLHAS NAS BARBATANAS DE UM SALMÃO . . . . .	22
FIGURA 2.3 – EFEITO DESEJÁVEL COM USO DE DEFLETORES HORIZONTAIS PARA REDUÇÃO DE SUPERSATURAÇÃO DE TDG . . .	23
FIGURA 2.4 – REGIMES DE ESCOAMENTO COM O USO DE DEFLETORES HORIZONTAIS NA CALHA DE VERTEDOUROS . . . . .	23
FIGURA 2.5 – ESTUDOS EM MODELO REDUZIDO (A ESQUERDA) E IMPLANTAÇÃO DO DEFLETOR NO VERTEDOURO DE YACYRETA	24
FIGURA 2.6 – VISTA LONGITUDINAL DO VERTEDOURO DA USINA DE ICE HARBOR . . . . .	25
FIGURA 2.7 – MEDIÇÕES DE TDG ANTES E DEPOIS DA CONSTRUÇÃO DE DEFLETORES NA USINA DE ICE HARBOR . . . . .	25
FIGURA 2.8 – POSIÇÕES DE MEDIÇÃO DE TDG NA UHE ICE HARBOR . . .	26
FIGURA 2.9 – VISTA AÉREA DA USINA DE ICE HARBOR . . . . .	26
FIGURA 2.10 – CURVA DE PERFORMANCE DO DEFLETOR - USINA DE HELLS CANYON . . . . .	27
FIGURA 2.11 – DIFERENTES ESCALAS DE VÓRTICES EM UM CONDUTO FECHADO E O PROCESSO DE CASCATA DE ENERGIA . . .	32
FIGURA 2.12 – CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE SIMULAÇÕES <i>CFD</i> . . . . .	32
FIGURA 2.13 – COMPARAÇÃO ENTRE DNS E LES . . . . .	33
FIGURA 2.14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES FUNÇÕES DE FILTRO NO ESPECTRO DE ENERGIA . . . . .	38
FIGURA 2.15 – REGIÕES DE SIMULAÇÃO RANS/LES EM UM RESSALTO HIDRÁULICO . . . . .	39
FIGURA 2.16 – À ESQUERDA ESCOAMENTO ESTRATIFICADO E À DIREITA, UM ESCOAMENTO DISPERSO . . . . .	40
FIGURA 2.17 – EFEITO DE VÓRTICE TURBULENTO (LINHA CONTÍNUA) EM UMA PARTÍCULA (LINHA TRACEJADA) PARA DIFERENTES NÚMEROS DE STOKES . . . . .	41
FIGURA 2.18 – ABORDAGENS DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO: A) EULERIANO-LAGRANGIANO E B) EULERIANO-EULERIANO . . . . .	42
FIGURA 2.19 – VOLUME OF FLUID - VOF: A) INTERFACE REAL ENTRE FLUIDOS, B) FRAÇÃO DE VOLUME CALCULADA PELO VOF E C) INTERPOLAÇÃO LINEAR DA SUPERFÍCIE . . . . .	43

FIGURA 3.1 – CORTE LONGITUDINAL DO VERTEDOURO E BACIA DE DISSIPAÇÃO DA UHE COLÍDER SEM A ESTRUTURA DO DEFLETOR	45
FIGURA 3.2 – PLANTA DO VERTEDOURO E BACIA DE DISSIPAÇÃO DA UHE COLÍDER . . . . .	45
FIGURA 3.3 – GEOMETRIA DA OGIVA DO VERTEDOURO DA UHE COLÍDER	45
FIGURA 3.4 – CONSTRUÇÃO DO DEFLETOR HORIZONTAL NA UHE COLIDER	46
FIGURA 3.5 – DIMENSÕES DO DEFLETOR HORIZONTAL NO VERTEDOURO	46
FIGURA 3.6 – CROQUI ESQUEMÁTICO DO CANAL EXPERIMENTAL . . . . .	47
FIGURA 3.7 – MODELO FÍSICO REDUZIDO - ESCALA GEOMÉTRICA 1:15 .	48
FIGURA 3.8 – SENSORES DE NÍVEL ULTRASSÔNICOS INSTALADOS NO MODELO . . . . .	48
FIGURA 3.9 – CONE DE INFLUÊNCIA MIC+130 . . . . .	49
FIGURA 3.10 – TRANSMISSOR DE PRESSÃO ZURICH . . . . .	49
FIGURA 3.11 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE VELOCIDADES - DELFT . . . . .	50
FIGURA 3.12 – ESTRUTURA BÁSICA DE UMA SIMULAÇÃO . . . . .	51
FIGURA 3.13 – VISTAS LONGITUDINAL E TRANSVERSAL DO DOMÍNIO . . . . .	54
FIGURA 3.14 – REGIÕES DE REFINAMENTO DA MALHA COMPUTACIONAL	55
FIGURA 3.15 – FACES E CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O DOMÍNIO 3D	56
FIGURA 3.16 – GEOMETRIAS DE DEFLETORES HORIZONTAIS AVALIADAS	58
FIGURA 3.17 – CURVAS DE PERFORMANCE ESTUDADAS EM MODELO FÍSICO (D2) . . . . .	58
FIGURA 3.18 – CURVA CHAVE IMPOSTA NO MODELO FÍSICO - ESCALA 1:15	59
FIGURA 3.19 – ESQUEMA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE DESCARGA	61
FIGURA 3.20 – GRÁFICO COM OS VALORES DE $G_0$ UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES . . . . .	61
FIGURA 3.21 – VISUALIZAÇÃO DA INTERFACE DO <i>PARAVIEW</i> . . . . .	63
FIGURA 3.22 – ESCOAMENTO A JUSANTE DO DEFLETOR . . . . .	64
FIGURA 3.23 – COMPARAÇÃO DAS LINHAS PIEZOMÉTRICAS E PERFIS DE LINHA D'ÁGUA . . . . .	64
FIGURA 3.24 – CONFRONTO DE VELOCIDADES NAS POSIÇÕES X = 120 M (A ESQUERDA) E 161 M (A DIREITA) A JUSANTE DA CRISTA DO VERTEDOURO . . . . .	65
FIGURA 4.1 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ NAJ = 247,11 m . . . . .	67
FIGURA 4.2 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ NAJ = 247,11 m . . . . .	67
FIGURA 4.3 – MODELO FÍSICO - $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ NAJ = 247,11 m . . . . .	68
FIGURA 4.4 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ NAJ = 250,00 m . . . . .	68
FIGURA 4.5 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ NAJ = 250,00 m . . . . .	69
FIGURA 4.6 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ NAJ = 252,00 m . . . . .	69
FIGURA 4.7 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ NAJ = 252,00 m . . . . .	70

FIGURA 4.8 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - Q = 1.600 m <sup>3</sup> /s NAJ = 251,00 m .	71
FIGURA 4.9 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - Q = 1.600 m <sup>3</sup> /s NAJ = 251,00 m .	71
FIGURA 4.10 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - Q = 1.600 m <sup>3</sup> /s NAJ = 254,00 m .	71
FIGURA 4.11 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - Q = 1.600 m <sup>3</sup> /s NAJ = 254,00 m .	72
FIGURA 4.12 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - Q = 1.600 m <sup>3</sup> /s NAJ = 257,00 m .	72
FIGURA 4.13 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - Q = 1.600 m <sup>3</sup> /s NAJ = 257,00 m .	73
FIGURA 4.14 – SIMULAÇÕES (D1) NA CURVA DE PERFORMANCE - MODELO FÍSICO . . . . .	74
FIGURA 4.15 – SIMULAÇÕES (D2) NA CURVA DE PERFORMANCE - MODELO FÍSICO . . . . .	74
FIGURA 4.16 – SIMULAÇÕES (D3) NA CURVA DE PERFORMANCE - MODELO FÍSICO . . . . .	75
FIGURA 4.17 – LINHAS D'ÁGUA - Q = 4.554 m <sup>3</sup> /s (T.R. 100 anos) - NAJ = 255,25 m . . . . .	76
FIGURA 4.18 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - Q = 4.554 m <sup>3</sup> /s (T.R. 100 anos) - NAJ = 255,25 m . . . . .	76
FIGURA 4.19 – LINHAS D'ÁGUA - Q = 5.743 m <sup>3</sup> /s (T.R. 1.000 anos) - NAJ = 256,92 m . . . . .	77
FIGURA 4.20 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - Q = 5.743 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 256,92 m .	77
FIGURA 4.21 – COMPARATIVO DO ESCOAMENTO (CAMPO ALPHA.WATER) - T.R. 100 ANOS . . . . .	78
FIGURA 4.22 – COMPARATIVO DE CAMPOS DE VELOCIDADES - T.R. 100 ANOS . . . . .	79
FIGURA 4.23 – COMPARATIVO DO ESCOAMENTO (CAMPO ALPHA.WATER) - T.R. 1.000 ANOS . . . . .	80
FIGURA 4.24 – COMPARATIVO DE CAMPOS DE VELOCIDADES - T.R. 1.000 ANOS . . . . .	81
FIGURA A.1 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 247,11 m (D1) . . . . .	90
FIGURA A.2 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 247,11 m (D2) . . . . .	90
FIGURA A.3 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 247,11 m (D3) . . . . .	91
FIGURA A.4 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 250 m (D1) . . . . .	92
FIGURA A.5 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 250 m (D2) . . . . .	92
FIGURA A.6 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 250 m (D3) . . . . .	93

FIGURA A.7 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 252 m (D1) . . . . .	94
FIGURA A.8 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 252 m (D2) . . . . .	94
FIGURA A.9 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 300 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 252 m (D3) . . . . .	95
FIGURA A.10–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 251 m (D1) . . . . .	96
FIGURA A.11–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 251 m (D2) . . . . .	96
FIGURA A.12–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 251 m (D3) . . . . .	97
FIGURA A.13–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 254 m (D1) . . . . .	98
FIGURA A.14–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 254 m (D2) . . . . .	98
FIGURA A.15–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 254 m (D3) . . . . .	99
FIGURA A.16–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 257 m (D1) . . . . .	100
FIGURA A.17–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 257 m (D2) . . . . .	100
FIGURA A.18–ESCOAMENTO E VELOCIDADES - Q = 1600 m <sup>3</sup> /s - NAJ = 257 m (D3) . . . . .	101

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – CONSTANTES E TERMOS DE FECHAMENTO NA SIMULAÇÃO DES . . . . .	40
TABELA 3.1 – DETALHES DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DAS FACES - 1	57
TABELA 3.2 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DAS FACES DO DOMÍNIO - 2 . .	57
TABELA 3.3 – Valores da curva chave imposta no modelo físico - escala 1:15 . .	59
TABELA 3.4 – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA CADA DEFLETOR . .	60
TABELA 3.5 – SIMULAÇÕES SEM DEFLETOR E DEFLETOR D3 - T.R. 100 E 1.000 ANOS . . . . .	60
TABELA 3.6 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS REALIZADAS	62
TABELA 3.7 – SETUP E CONFIGURAÇÃO DOS HARDWARES UTILIZADOS .	65
TABELA 4.1 – RESUMO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES . . . . .	73
TABELA 4.2 – COEFICIENTE DE DESCARGA DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ASMM	Método de Modelagem de Tensão Algébrica
CEHPAR	Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza
<i>CFD</i>	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
CFL	Courant–Friedrichs–Lewy
<i>DES</i>	<i>Detached Eddy Simulation</i>
<i>DNS</i>	<i>Direct Numerical Simulation</i>
EUA	Estados Unidos
<i>GBD</i>	<i>Gas Bubble Disease</i>
<i>GPU</i>	<i>Graphics Processing Unit</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>LES</i>	<i>Large Eddy Simulation</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MVF	Método dos Volumes Finitos
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
<i>PISO</i>	<i>Pressure Implicit with Splitting of Operators</i>
<i>RANS</i>	<i>Reynolds Average Navier-Stokes</i>
<i>RSM</i>	<i>Reynolds Stress Model</i>
<i>SGS</i>	<i>Sub-grid Scale</i>
SO	Sistema Operacional
<i>TDG</i>	<i>Total Dissolved Gases</i>
UHE	Usina Hidrelétrica
<i>VoF</i>	<i>Volume of Fluid</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área da seção transversal do orifício de controle (m <sup>2</sup> )
$B$	largura (m)
$BP$	pressão dos componentes do ar em condições locais (Pa)
$C_d$	coeficiente de descarga em vertedouro com controle de comportas (adim.)
$C_{DES}$	constante numérica para a condição de contorno da simulação <i>DES</i> (adm)
$Co$	número de Courant–Friedrichs–Lewy (adim.)
$D$	diâmetro característico (m)
$\Delta P$	variação da pressão do ar medido na fase líquida (Pa)
$Eu$	número de Euler do escoamento (adim.)
$\varepsilon$	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
$Fr$	número de Froude do escoamento (adim.)
$f_c$	forças de campo (variável)
$\phi$	propriedade genérica do escoamento (variável)
$\phi'$	flutuação da propriedade genérica do escoamento (variável)
$\bar{\phi}$	média da propriedade genérica do escoamento (variável)
$g$	aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
$\Gamma_t$	difusividade turbulenta de massa (m <sup>2</sup> /s)
$h$	profundidade do escoamento, perpendicular ao fundo (m)
$H$	carga hidráulica a montante do vertedouro medida a partir da crista (m)
$i, j, k$	índices para notação indicial variando entre os valores 1, 2 e 3 (adim.)
$k$	energia cinética turbulenta (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
$k_s$	rugosidade em grão de areia (m)

$L$	comprimento (m)
$\lambda$	escala de geométrica de comprimento entre modelo e protótipo (adim.)
$\mu$	viscosidade dinâmica (Pa.s)
$\mu_t$	viscosidade turbulenta ( $m^2/s$ )
$N$	número de amostras de uma propriedade medida (adim.)
$\omega$	taxa de dissipação específica de energia cinética turbulenta ( $s^{-1}$ )
$Re$	número de Reynolds (adim.)
$\rho$	massa específica do fluido ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	tensão superficial do fluido (N/m)
$Sc_t$	Número de Schmidt turbulento (N/m)
$t$	instante do tempo (s)
$T$	intervalo de tempo (s)
$We$	número de Weber (adim.)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	DEFLETORES PARA REDUÇÃO DE TDG EM VERTEDOUROS	20
2.2	CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA	27
2.3	FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	29
2.3.1	Equações Governantes dos Fluidos	29
2.3.2	Tratamento numérico da turbulência	31
2.3.2.1	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)</i>	34
2.3.2.2	<i>Large Eddy Simulation (LES)</i>	36
2.3.2.3	<i>Detached-Eddy Simulation (DES)</i>	38
2.3.3	Simulação de escoamentos Multifásicos	40
2.3.4	Abordagens Computacionais de escoamentos Multifásicos	42
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>44</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO-PILOTO	44
3.2	ESTUDOS EM MODELO FÍSICO REDUZIDO	47
3.3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	50
3.3.1	<i>Software CFD</i> escolhido - OpenFOAM	50
3.3.2	Construção do Modelo Computacional	54
3.3.3	Configurações Hidráulicas e Geométricas	57
3.3.4	Método para Avaliação dos Resultados	62
3.3.5	Condição de Verificação	64
3.3.6	Configuração de Hardware	65
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>66</b>
4.1	EFEITO DO COMPRIMENTO DE DEFLETORES (D1, D2 E D3)	66
4.1.1	Vazão de 300 m <sup>3</sup> /s	66
4.1.2	Vazão de 1.600 m <sup>3</sup> /s	70
4.1.3	Avaliação dos regimes de escoamento na curva de performance	73
4.2	EFEITO DO DEFLETOR SOBRE O ESCOAMENTO PARA VAZÕES ELEVADAS — T.R. 100 E 1.000 ANOS	75
4.3	CAPACIDADE DE DESCARGA	82
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>83</b>

**REFERÊNCIAS . . . . . 85**

## 1 INTRODUÇÃO

Vertedouros são estruturas hidráulicas destinadas a extravasar vazões excedentes de maneira segura para jusante de uma determinada região. Nos empreendimentos hidrelétricos, essas estruturas de concreto são essenciais para garantir a segurança de barragens, mantendo níveis de água seguros no reservatório.

Na operação de vertedouros em ogiva, por exemplo, o escoamento efluente é caracterizado por altas velocidades e, por vezes, é adotada a solução de dissipação de energia por ressalto hidráulico — a fim de dissipar energia de montante para jusante. Nesse cenário, o jato mergulha no colchão de água existente, incorporando ar ao fluxo principal. Todo o processo ocorre sobre uma estrutura de concreto armado, denominada bacia de dissipação.

Além disso, a operação de vertedouros também pode ser utilizada para garantir a sobrevivência da ictiofauna local em regiões de baixa oxigenação na água, mesmo que isso leve a uma menor geração de energia. Contudo, o excesso de gases atmosféricos dissolvidos na água pode ser prejudicial à vida aquática local (POLITANO et al., 2004).

Trabalhos apresentados por Weitkamp (2008), Politano, Carrica e Weber (2009), Schneider e Wilhelms (2016) apresentaram registros e descreveram danos observados à ictiofauna gerados por essa supersaturação de gases totais na água, encontrado na bibliografia como *total dissolved gases (TDG)*.

A solução usual para evitar a supersaturação de gases na água é a construção de defletores na calha do vertedouro, considerando as condições hidráulicas mais recorrentes do empreendimento. O escoamento resultante dessas estruturas apresenta quatro regimes principais, determinados pelo nível de água a jusante e pela vazão: *plunging flow*, *skimming flow*, *undular jet* e *surface jump* — mantendo a nomenclatura inglesa apresentado por Wang (2013). O gráfico que indica o regime de escoamento para uma determinada configuração hidráulica é chamada de curva de performance do defletor.

As características geométricas e de elevação são comumente definidas com o auxílio de modelos físicos (POLITANO et al., 2016). Estudos indicam também a viabilidade do uso de ferramentas computacionais de dinâmica dos fluidos (*CFD*) na concepção dos defletores (WANG, 2013). Contudo, apesar da existência dessas ferramentas, ainda há carência literária dos efeitos hidrodinâmicos gerados pelos defletores, sob alteração de uma característica geométrica específica, como comprimento ou seção transversal. Além disso, para vazões maiores e de menor recorrência, o defletor pode ser prejudicial ao processo de dissipação de energia a jusante, como obser-

vado na UHE Yacireta (BACCHIEGA; FATTOR, 2014) - local onde foram observadas velocidades mais elevadas e erosões a jusante do vertedouro.

O presente trabalho visa complementar os estudos existentes por meio de simulações computacionais de diferentes comprimentos de defletores, em regime permanente, e seus efeitos hidrodinâmicos a jusante, utilizando a ferramenta OpenFOAM. Informações de estudos em modelo físico reduzido foram utilizados, baseado no estudo de caso do vertedouro da usina hidrelétrica de Colíder. Desse modo, apresentam-se os seguintes objetivos gerais e específicos:

#### Objetivos Gerais

Avaliar o efeito de diferentes comprimentos de defletores na curva de performance para vertedouros com bacia de dissipação e os efeitos hidrodinâmicos a jusante do defletor para vazões mais elevadas utilizando o *software* OpenFOAM.

#### Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo computacional no *software* OpenFOAM capaz de representar os regimes de escoamento observados no modelo físico — desenvolvido no CEHPAR em 2021.
- Analisar o comportamento hidráulico do escoamento com e sem a estrutura do defletor no vertedouro para vazões mais elevadas (velocidades, pressões e capacidade descarga);
- Identificar possíveis limitações na representatividade do modelo computacional.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo descreve os principais temas relacionados ao escopo desta pesquisa, incluindo o estado da arte.

Ao todo, cinco itens serão apresentados. O primeiro item define e caracteriza os defletores horizontais e seus efeitos a jusante de vertedouros para redução de TDG (*total dissolved gases*), escopo principal do trabalho. Em seguida, são apresentados os conceitos relacionados aos critérios de semelhança, uma vez que o trabalho apresenta informações de modelo físico reduzido. Por fim, os últimos itens apresentam as equações governantes do fluido, o tratamento numérico da turbulência e abordagem computacional de escoamentos multifásicos.

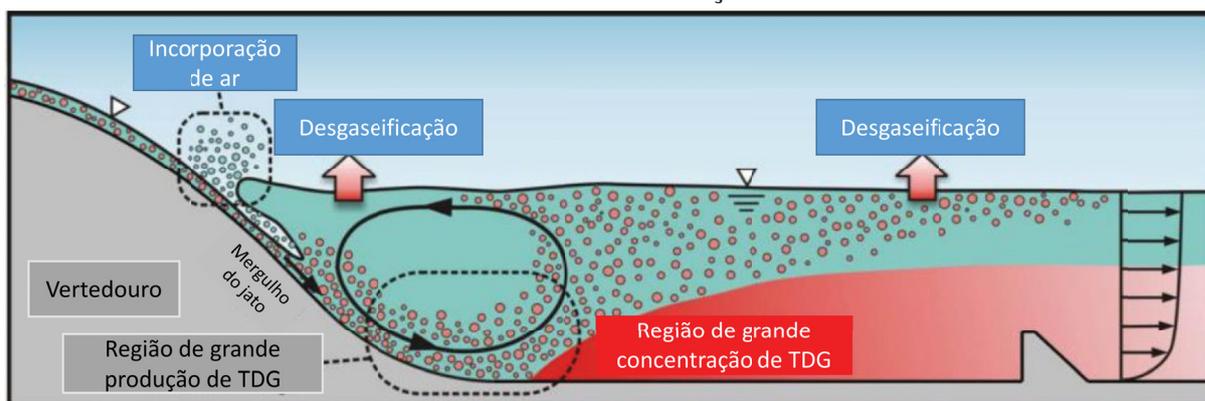
### 2.1 DEFLETORES PARA REDUÇÃO DE TDG EM VERTEDOUROS

Em grandes empreendimentos hidrelétricos, o processo de dissipação de energia a jusante de vertedouros possui grande importância ambiental e técnico-estrutural. A ocorrência de altas velocidades nessas regiões pode comprometer a estabilidade de estruturas próximas devido a possível ocorrência de erosões. Na área ambiental, as fossas geradas por esses processos erosivos podem também aprisionar a fauna aquática local em períodos de estiagem, com baixos níveis de água.

Para reduzir a energia residual do escoamento na operação de vertedouros, é comum a construção de uma bacia de dissipação (ou de tranquilização). Essa estrutura consiste em uma laje de concreto, cujo propósito é garantir, com segurança, a ocorrência do ressalto hidráulico — fenômeno físico caracterizado pela transição de um escoamento em regime supercrítico para subcrítico, gerando principalmente a mudança de energia cinética para energia potencial.

O ressalto hidráulico é caracterizado por uma intensa turbulência, com formação de vórtices, oscilações de pressão e níveis de água, além da incorporação e aprisionamento de ar atmosférico ao escoamento. Uma parcela do ar retorna a superfície livre e outra é dissolvida na água dependendo das características locais do fluxo, como pressão e temperatura (Figura 2.1). Desse modo, os gases totais dissolvidos (*TDG*) representam a quantidade de ar (oxigênio, nitrogênio, argônio, dióxido de carbono) dissolvido em um determinado volume de água (MYERS; PARKINSON, 2003).

FIGURA 2.1 – PROCESSO DE FORMAÇÃO E DISSIPAÇÃO DE TDG A JUSANTE DE VERTEDOUROS COM BACIA DE DISSIPACÃO



FONTE: Adaptado de Politano et al. (2016)

Ovelar, Dettmer e Takenobu (2020) fazem uma analogia do processo de supersaturação de gases totais dissolvidos na água em vertedouros com a abertura de um refrigerante. No processo de fabricação de refrigerantes é usado ácido carbônico ( $H_2CO_3$ ), que quando solubilizado transforma-se em dióxido de carbono ( $CO_2$ ) supersaturado (pressão maior que a atmosférica). Essa supersaturação do gás se desfaz com a abertura do refrigerante, até atingir a condição de equilíbrio do ambiente local. Em vertedouros com bacia de dissipação, a presença de ar atmosférico em regiões de alta pressão no interior do ressalto hidráulico criam um ambiente propício para essa supersaturação gasosa. Esse volume de água supersaturada com ar se propaga, reduzindo-se por difusão e convecção, em direção a regiões mais a jusante, até atingir novamente a condição de equilíbrio local.

A quantificação do TDG (adimensional) é dada como uma porcentagem de saturação do ar na água. Por exemplo, uma medição de 120% em uma amostra de água indica 20% de supersaturação de ar. Colt (1983) apresenta essa relação (Equação 2.1) em função da soma das pressões dos gases na fase líquida ( $BP + \Delta P$ ) e na fase gasosa ( $BP$ ). Se a pressão total na fase líquida for menor ou igual à atmosférica, bolhas de ar não poderão ser formadas independente dos níveis de gases presentes.

$$TDG = \frac{BP + \Delta P}{BP} \times 100 \quad (2.1)$$

onde:

$BP$  : Soma das pressões dos componentes do ar em condições locais na fase gasosa (pressão atmosférica) (Pa);

$\Delta P$  : Acréscimo ou decréscimo de pressão do ar medido na fase líquida (Pa).

Segundo Weitkamp (2008), a supersaturação de TDG também é um fenômeno natural que ocorre em rios a jusante de quedas de água. Existem situações em que as cataratas do Niágara já apresentaram valores de TDG da ordem de 130%, por exemplo.

A supersaturação de TDG na água pode ser prejudicial à biota aquática local. Os primeiros relatos de mortandade de peixes relacionado ao tema foram registrados nos rios Columbia e Snake (ambos nos EUA), em meados da década de 1960. Os altos valores de TDG observados coincidiram com a operação dos vertedouros das UHE Chief Joseph e Macnary (EBEL, 1969). Rulifson e Abel (1971) verificaram registros de até 140% de TDG na água.

O dano mais comum à ictiofauna, devido as altas concentrações de TDG, é conhecido como GBD, do inglês, *gas bubble disease*. A extensão dos danos pode variar de acordo com a espécie do peixe, tempo de exposição e a supersaturação de TDG local (MESA; WEILAND; MAULE, 2004). A Figura 2.2 ilustra a formação de bolhas nas barbatanas de um salmão após sua exposição em regiões de supersaturação de TDG.

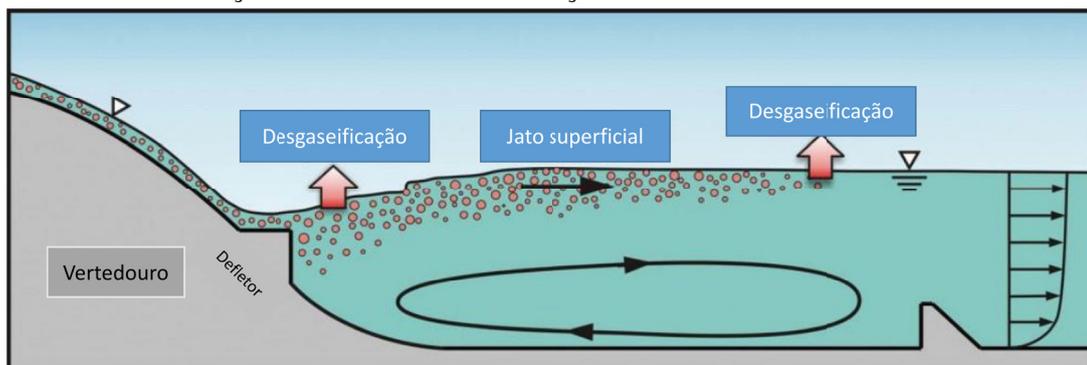
FIGURA 2.2 – BOLHAS NAS BARBATANAS DE UM SALMÃO



FONTE: Weitkamp (2008)

A solução hidráulica comumente adotada para mitigar a supersaturação de TDG na água a jusante de empreendimentos hidrelétricos é a construção de defletores horizontais na calha do vertedouro. A função dessas estruturas de concreto é alterar a trajetória do jato, direcionando-o principalmente tangente a superfície livre da água. A redução do mergulho do jato em direção ao fundo da bacia de dissipação, região com maiores pressões, reduz a dissolução dos gases incorporados ao escoamento (Figura 2.3). O comprimento ideal e a elevação adequada dos defletores dependem das condições hidráulicas do empreendimento (regime hidrológico, níveis de água de jusante, dimensões do vertedouro, dentre outros).

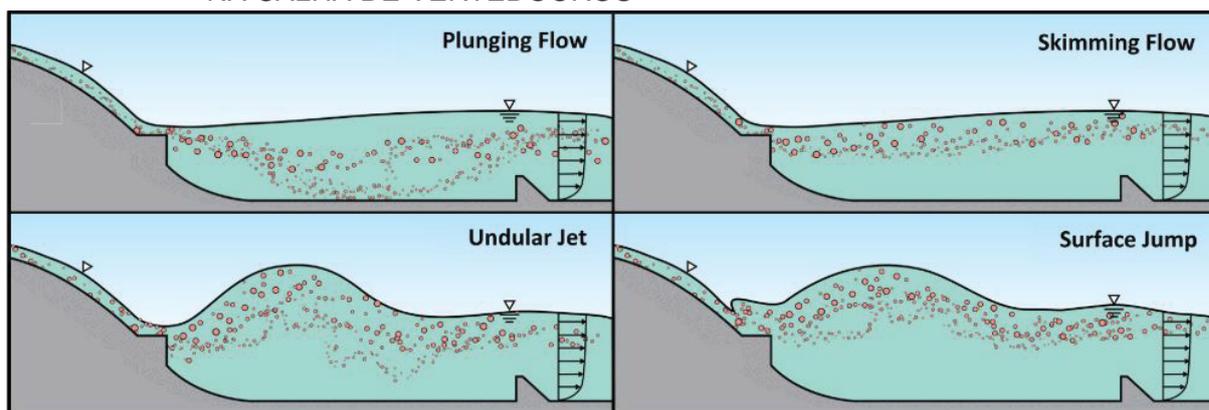
FIGURA 2.3 – EFEITO DESEJÁVEL COM USO DE DEFLETORES HORIZONTAIS PARA REDUÇÃO DE SUPERSATURAÇÃO DE TDG



FONTE: Weitkamp (2008)

Wang et al. (2015) descreveram que para baixos níveis de água, inferiores a cota do defletor, observa-se que o jato vertido mergulha na bacia de dissipação resultando em um escoamento com alta produção de TDG, denominado “*plunging flow*”. Por outro lado, níveis de água de jusante muito mais elevados que a cota do defletor produzem um ressalto hidráulico sobre o defletor, denominado como “*surface jump*”. Entre estes dois cenários, podem ser observados os regimes “*skimming flow*”, condição ideal descrito no parágrafo anterior, e “*undular jet*”, caracterizado por uma sobrelevação do escoamento a jusante do defletor. Os quatro regimes de escoamentos descritos podem ser observados na Figura 2.4.

FIGURA 2.4 – REGIMES DE ESCOAMENTO COM O USO DE DEFLETORES HORIZONTAIS NA CALHA DE VERTEDOUROS



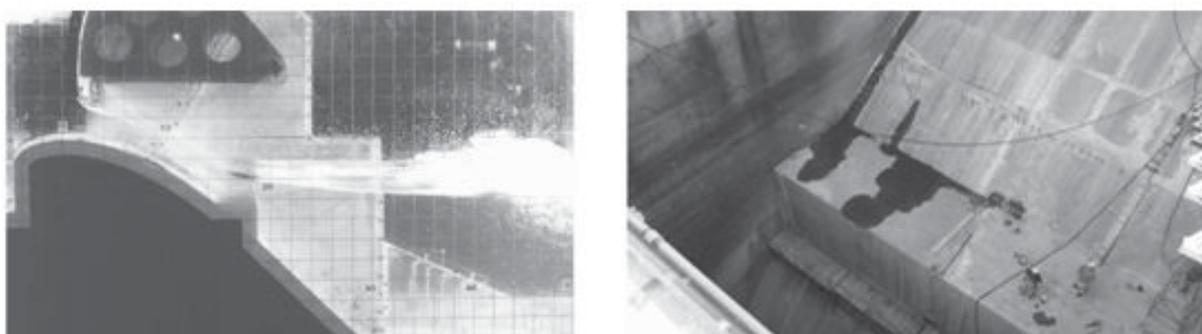
FONTE: Wang et al. (2015)

Segundo Politano et al. (2016), os principais parâmetros para o projeto de um defletor incluem a sua elevação, transição, comprimento e ângulo de saída. Recomenda-se que o defletor seja posicionado em elevações mais baixas que o nível de água de jusante para evitar o regime *plunging flow*, porém alto suficiente para manter sua performance para níveis de água mais elevados. Desse modo, a condição ideal de interesse é a de regime *skimming flow*, a qual produz a menor supersaturação de gases

na água. Devido a existência de vários parâmetros geométricos, o estudo de defletores são desenvolvidos em modelos físico reduzidos sob critério de semelhança de Froude.

Outro registro de supersaturação de TDG observado foi na Usina de Yacyretá, localizada no Rio Paraná (BACCHIEGA; FATTOR, 2014). Em 1994, a operação do vertedouro resultou na mortandade da ictiofauna local a jusante do empreendimento. Estudos em modelo reduzido, realizados pelo laboratório de INA em 1995, definiram a configuração geométrica do defletor utilizado, com comprimentos variando de 3,5 m a 4,0 m. Os defletores construídos possuem 4,0 m de comprimento e localizado 6,5 m abaixo da crista (Figura 2.5). Essas dimensões representam 21,6% e 35,1%, respectivamente da carga de projeto do vertedouro.

FIGURA 2.5 – ESTUDOS EM MODELO REDUZIDO (A ESQUERDA) E IMPLANTAÇÃO DO DEFLETOR NO VERTEDOIRO DE YACYRETA



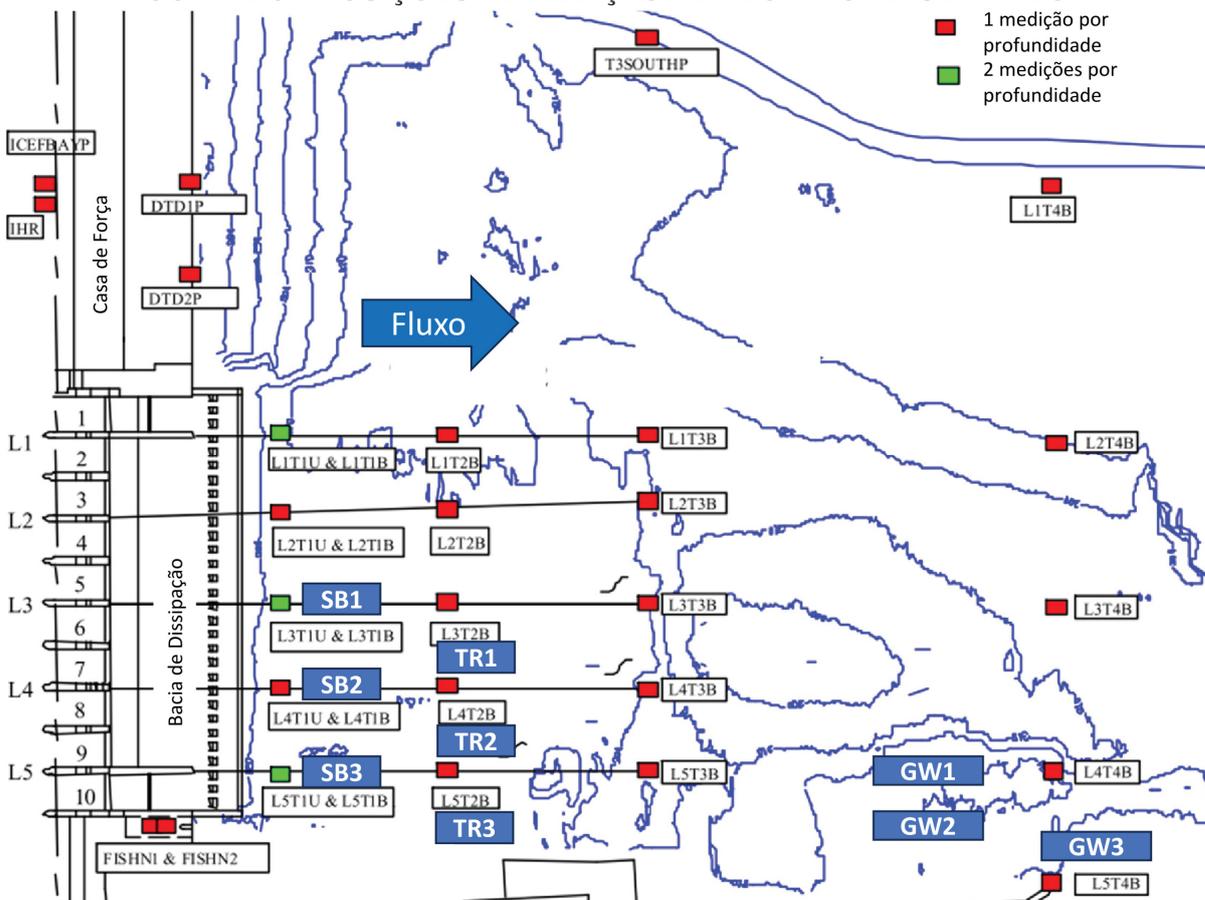
FONTE: Bacchiega e Fattor (2014)

Após a instalação dos defletores, foi corroborado o regime *skimming flow* para as condições hidráulicas com vazões mais baixas e mais recorrentes, produzindo uma inversão do perfil de velocidades na região mais funda da bacia de dissipação, o que reduziu a entrada de ar no escoamento. Contudo, foi destacado que essa inversão no perfil de velocidades produz o arraste de materiais do leito do rio para a bacia de dissipação. Bacchiega e Fattor (2014) também destacaram a redução na capacidade de dissipação de energia do ressalto hidráulico, principalmente para vazões mais altas.

A construção de defletores na calha do vertedouro na usina de Ice Harbor (EUA) também reduziu a supersaturação de TDG (SCHNEIDER; WILHELMS, 2016). A configuração original do vertedouro operava com um desnível de 30 m (Figura 2.6). As medições foram realizadas mediante a instalação de 40 sondas multiparâmetros para medição de TDG, pressão, temperatura da água, profundidade e oxigênio dissolvido. Na bacia de dissipação as medições de TDG indicaram reduções de 150% para 125% e no final da parede de navegação, de 135% para 114% (Figura 2.7)



FIGURA 2.8 – POSIÇÕES DE MEDIÇÃO DE TDG NA UHE ICE HARBOR



FONTE: Adaptado Schneider e Wilhelms (2016)

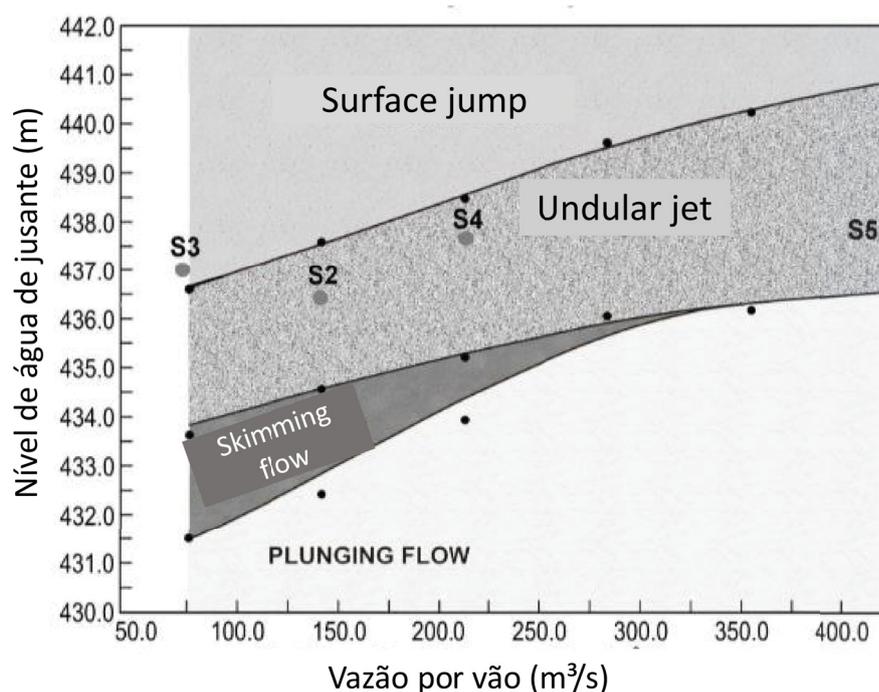
FIGURA 2.9 – VISTA AÉREA DA USINA DE ICE HARBOR



FONTE: Adaptado Schneider e Wilhelms (2016)

Segundo Politano e Laughery (2016), com o auxílio de modelos físicos reduzidos, é possível definir as curvas de performance de um defletor. As curvas de performance relacionam a vazão vertente e nível de água de jusante com um dos quatro (4) regimes de escoamento resultante. A configuração desse gráfico é bastante sensível às características geométricas do defletor. A Figura 2.10 ilustra a curva de performance obtida em um modelo físico com escala geométrica 1:48 para a usina de Hells Canyon (EUA).

FIGURA 2.10 – CURVA DE PERFORMANCE DO DEFLETOR - USINA DE HELLS CANYON



FONTE: Adaptado Politano e Laughery (2016)

## 2.2 CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA

Como apresentado no item anterior, o uso de modelos físicos reduzidos para representação de escoamentos complexos é amplamente utilizado para avaliação e validação prévia de um projeto de engenharia. Desse modo, além da semelhança geométrica, na qual as dimensões lineares do modelo estão relacionadas por um único fator de escala ao protótipo, há outras duas condições de semelhança necessárias para que o modelo represente a física do protótipo, a semelhança cinemática e a dinâmica.

Na semelhança cinemática, as velocidades em um mesmo instante e posição do espaço são correspondentes no modelo e ao protótipo. Devem ter o mesmo sentido e direção, com seu módulo também proporcional a um outro fator de escala. Na semelhança dinâmica, condição mais restritiva na elaboração de um modelo físico, todas as forças predominantes no escoamento devem ser representadas também proporcionalmente.

Desse modo, a teoria da análise dimensional permite definir critérios de semelhança para escoamentos de diferentes escalas para diferentes variáveis físicas. Essa teoria é baseada no teorema dos  $\pi$ 's de Buckingham. Se existe uma relação entre  $n$  variáveis físicas (força, velocidade, viscosidade, dentre outras), expressas em termos de  $K$  unidades fundamentais (massa, comprimento e tempo, por exemplo), então, haverá  $(n - K)$  números adimensionais possíveis de serem formados para representar o fenômeno físico.

Segundo Henderson (1966) e Fox e McDonald (2001), uma grandeza importante nos escoamentos em superfície livre é a aceleração da gravidade ( $g$ ). O parâmetro adimensional,  $Fr$ , pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e de gravidade. Também pode ser expresso como uma razão entre a velocidade do escoamento ( $u$ , em m/s) e a celeridade de ondas (raiz do produto da gravidade pela profundidade do escoamento, em m/s) (Equação 2.2). Esse número adimensional é comumente utilizado para classificação de regimes de escoamento em rios. Para número de Froude igual 1,0, o escoamento é classificado como crítico. Para valores de  $Fr > 1$ , o escoamento é classificado como supercrítico (torrencial) e para  $Fr < 1$ , como subcrítico (fluvial).

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{g d}} \quad (2.2)$$

O número de Reynolds, outro critério de semelhança adimensional, pode ser interpretado como uma relação entre as forças de inércia e de viscosidade. Escoamentos com elevados números de Reynolds são considerados turbulentos pelo fato das forças de inércia serem predominantes às forças viscosas. No cenário contrário, o escoamento é considerado como laminar.

$$Re = \frac{u L \rho}{\mu} \quad (2.3)$$

onde:

$\mu$  : viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s);

$L$  : comprimento característico (m);

$\rho$  : massa específica (kg/m<sup>3</sup>);

De acordo com Novak et al. (2010), em escoamentos onde os fenômenos de aprisionamento de ar e os mecanismos de quebras de bolhas ligados à tensão superficial ( $\sigma$ ) forem preponderantes, o número de Weber se torna importante. O número de Weber é a razão entre as forças de inércia e as forças de tensão superficial, sendo escrito como:

$$We = \frac{\rho u^2 L}{\sigma} \quad (2.4)$$

onde:

$\sigma$  : a tensão superficial do fluido (N/m).

A escolha de um número adimensional conduz a um critério de semelhança entre as dimensões de escala de modelo e protótipo. Por exemplo, em um escoamento de canais, de superfície livre, sugere-se o critério de semelhança de Froude. Contudo, mesmo utilizando um fluido idêntico em escala de modelo e protótipo e o valor da gravidade ser a mesma, pode ocorrer problemas na representação das viscosidade e tensão superficial, conhecido como efeitos de escala.

## 2.3 FUNDAMENTOS DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

O avanço tecnológico intensificou o uso de ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (*CFD*) na engenharia, tornando a modelagem numérica de escoamentos turbulentos algo mais recorrente e factível. A base dessas simulações são as equações governantes dos fluidos, que descrevem os processos físicos e estabelecem, por vezes, hipóteses e limitações também.

Nesse sentido, o tratamento numérico da turbulência é um dos maiores desafios na simulação de escoamentos, exigindo métodos que balanceiem precisão e viabilidade computacional. Modelos como RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), LES (*Large Eddy Simulation*) e DNS (*Direct Numerical Simulation*) oferecem diferentes níveis de detalhe e custos computacionais, cada um indicado para aplicações diferentes.

Programas computacionais como FLOW-3D, ANSYS Fluent e OpenFOAM se destacaram na indústria e na academia por permitirem simulações customizáveis e abrangentes de fluidos multifásicos com cálculo da turbulência.

O presente item está estruturado em cinco partes. O primeiro discorre sobre as equações governantes, importante para a descrição do movimento dos fluidos. Em seguida, o item de tratamento numérico da turbulência, apresentando os principais métodos de modelagem, cada um com suas características e aplicações. No terceiro item, são caracterizados os diferentes tipos de escoamento multifásicos e suas características. O quarto item introduz os métodos para definição da superfície livre (interface água e ar). O último item explora os alguns *softwares* de *CFD*, com uma análise de suas funcionalidades e principais características.

### 2.3.1 Equações Governantes dos Fluidos

Neste item, descreve-se as principais equações governantes dos fluidos, oriundas de leis de conservação. Nota-se que, devido à complexidade e extensão dessas equações, foi adotada a notação indicial com a convenção de Einstein para somatórios, que possui duas principais características:

- Índices “livres” são representados por letras que ocorrem uma única vez em cada termo da equação. Identificam a existência de um sistema de equações;
- Índices “mudos” são representados por letras que ocorrem somente duas vezes em um dado termo da equação. Identificam que existe um somatório em um dado termo da equação.

Desse modo, para cada grupo de equações apresentadas, os valores adotados para esses índices (i, j e k) serão descritos previamente.

O conjunto das equações de Navier-Stokes (NS) é baseado nas leis de conservação de massa e quantidade de movimento (Equações 2.5 e 2.6, no formato diferencial e tridimensional, com  $i$  e  $j = 1, 2, 3$ ). O sistema descreve o comportamento de fluidos contínuos (infinitamente divisível) em um domínio definido considerando efeitos de campos vetoriais (velocidade), grandezas escalares (pressão) e propriedades da matéria.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_c \quad (2.6)$$

onde:

$t$  : tempo (s);

$x$  : posição no espaço (m);

$f_c$  : forças de campo por unidade de volume (por exemplo, a gravidade) (variável);

$p$  : pressão sob a face do elemento diferencial (Pa);

$\tau$  : tensor cisalhante sob a face do elemento diferencial (Pa).

A classificação de um escoamento compressível ou incompressível pode ser feita de acordo com o número de Mach. Ferziger e Peric (2002) consideram a simplificação de fluxo incompressível aceitável para valores de  $Ma$  menor que 0,3. Isso seria equivalente a uma velocidade de escoamento da ordem de 440 m/s, acima das encontradas nos empreendimentos energéticos. Esse valor admite uma variação mínima no valor da massa específica da água para a simplificação das equações de NS.

E, quando assumido a incompressibilidade do fluxo e substituído o tensor cisalhante ( $\tau_{ij}$ ) pela relação constitutiva de um fluido newtoniano e viscosidade dinâmica constante ( $\mu$ ), as Equações 2.5 e 2.6 podem ser reescritas (Equações 2.7 e 2.8). A Equação 2.8 também é conhecida como Equação de Cauchy.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_c \quad (2.8)$$

A solução das Equações 2.7 e 2.8 necessitam de um fechamento numérico adicional para a turbulência. O tratamento desse fenômeno, detalhado no próximo item, possui simplificações temporais e espaciais, de acordo com a complexidade a ser representada do escoamento.

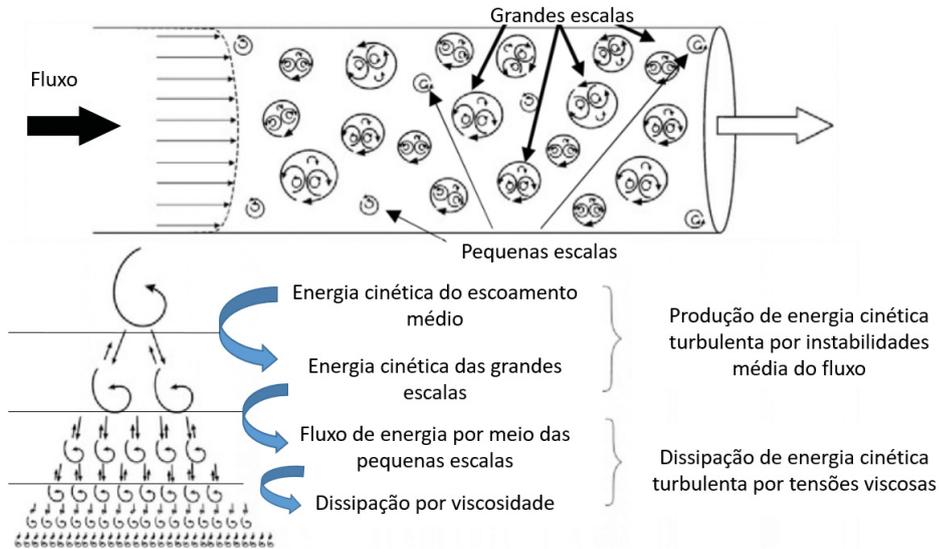
### 2.3.2 Tratamento numérico da turbulência

Segundo Andersson et al. (2012), o movimento turbulento é definido como uma condição irregular do escoamento na qual diversas propriedades apresentam variações aleatórias em função das coordenadas de espaço e tempo. Esses valores médios podem ser analisados somente de modo estatístico. Essas variações instantâneas, também chamadas de flutuações, ocorrem em diversos campos escalares e vetoriais (velocidades, temperatura, pressão), geradas por diferentes dimensões de vórtices que são preponderantes no transporte de quantidade de movimento e energia comparadas à difusão a nível molecular (SOUZA et al., 2011).

O processo de transferência contínua de energia no interior do escoamento turbulento foi descrito por Kolmogorov. Os maiores vórtices absorvem mais a energia do escoamento, transferindo-a para outros menores sucessivamente até a ocorrência da dissipação de energia pela viscosidade. Esse processo é conhecido por “cascata de energia”. No contexto de obras hidráulicas com valores elevados de número de Reynolds ( $Re > 12.500$ ) (FRENCH, 1986), os vórtices de maior escala são mais influenciados pela geometria do escoamento e os de menor escala possuem uma natureza isotrópica (ANDERSSON et al., 2012). A Figura 2.11 apresenta um escoamento em conduto fechado representando os vórtices de diferentes escalas junto a esquematização do processo de transferência de energia entre vórtices.

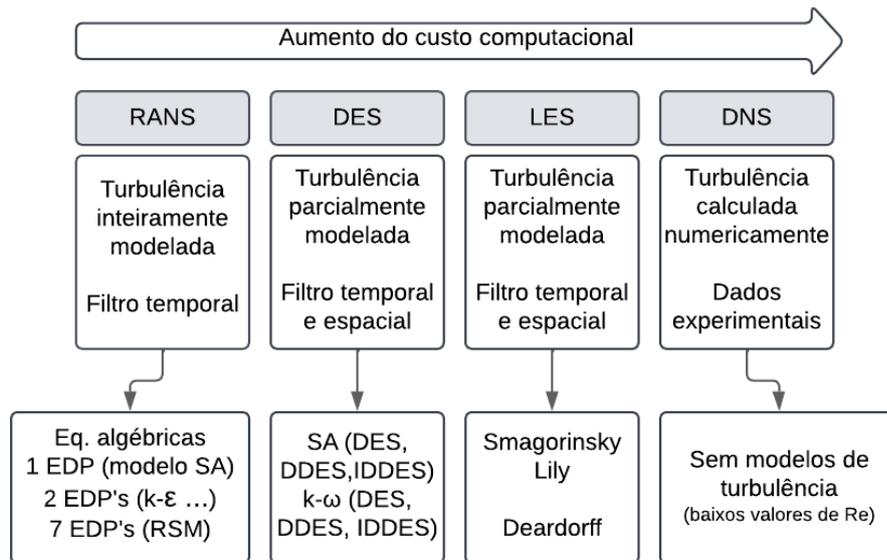
Devido à grande quantidade de escalas características de tempo e comprimento contida no movimento turbulento, torna-se necessário o uso de malhas computacionais extremamente refinadas para que todos os processos resultantes do movimento turbulento sejam resolvidos numericamente no espaço e tempo. Isso impossibilita a resolução direta das equações de Navier-Stokes para casos de escoamento com geometrias complexas e alto número de Reynolds, levando à necessidade de desenvolvimento de modelos que diminuam o requerimento de poder computacional e ao mesmo tempo sejam capazes de representar os fenômenos físicos da turbulência desejados. A Figura 2.12 apresenta as principais modelagens de simulação da turbulência, relacionando-as com o seu esforço computacional.

FIGURA 2.11 – DIFERENTES ESCALAS DE VÓRTICES EM UM CONDUTO FECHADO E O PROCESSO DE CASCATA DE ENERGIA



FONTE: Adaptado de Andersson et al. (2012)

FIGURA 2.12 – CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE SIMULAÇÕES CFD

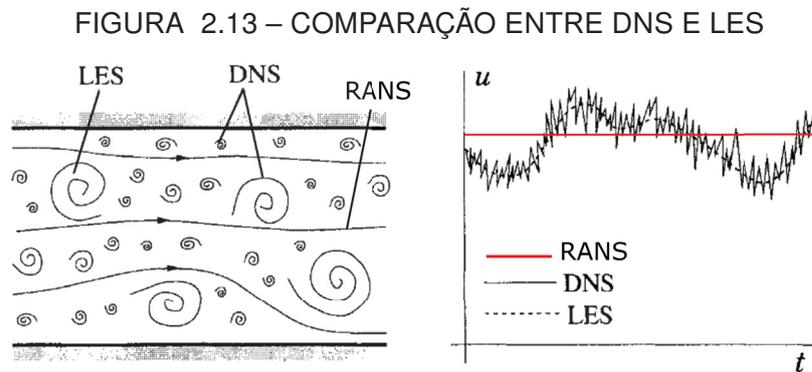


FONTE: Adaptado de Andersson et al. (2012)

A simulação DNS (*Direct Numerical Simulation*) resolve numericamente as equações tridimensionais de Navier-Stokes por completo, não sendo necessário o fechamento das equações por modelos de turbulência, simulando todas as escalas de vórtices do escoamento. Devido ao alto grau de discretização temporal e espacial requerido, a DNS é comumente aplicada somente em escoamentos laminares, para baixos valores de  $Re$ . 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.

A simulação de turbulência LES (*Large Eddy Simulation*), pertencente ao grupo SRS (*Scale Resolving Simulation*), calcula numericamente o comportamento das maiores escalas de comprimento do escoamento, semelhante ao DNS (JASAK, 2009). As menores escalas, de comportamento isotrópico, são representadas de maneira simplificada por modelos submalha, aumentando sua aplicação em escoamentos com valores de  $Re$  mais elevados. A Figura 2.13 apresenta 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).



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 (*Reynolds-Averaged Navies-Stokes*) são os mais utilizados e apresentam subclassificações de acordo com o grau de sofisticação da solução escolhida (desde modelos algébricos até equações diferenciais).

Adicionalmente, entre os modelos de simulação LES e RANS, também existem modelos híbridos como o DES (*detached eddy simulation*), unindo características de ambas simulações, com uma discretização espacial e temporal variável de acordo com a região do domínio.

Os próximos sub-itens apresentam uma revisão dos aspectos essenciais das principais simulações de turbulência, separados nas categorias de modelos para equações médias de Navier-Stokes (RANS), para simulação de grandes escalas (LES) e o modelo híbrido (DES), desenvolvidos no âmbito de pesquisas e de aplicações práticas de engenharia.

### 2.3.2.1 Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

Os modelos de turbulência RANS, também conhecidos como modelos de fechamento em um ponto (*single point closures*) ou de fechamento local (*local closure*). Segundo Souza et al. (2011), a denominação RANS se deve à decomposição das variáveis das equações de Navier-Stokes em uma parcela média e outra flutuante.

Segundo Ferziger e Peric (2002), estatisticamente em escoamentos permanentes, toda variável pode ser representada como a soma de um valor médio no tempo e espaço com sua parcela de flutuação, gerada pela turbulência. A Equação 2.9 apresenta essa decomposição de uma variável genérica  $\phi$  e a Equação 2.10, a definição do valor médio da propriedade em determinado local do espaço:

$$\phi(x_i, t) = \bar{\phi}(x_i) + \phi'(x_i, t) \quad (2.9)$$

$$\bar{\phi}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \phi(x_i, t) dt \quad (2.10)$$

onde:

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

$\phi'$  : parcela da propriedade instantânea (variável);

$T$  : intervalo de tempo (s).

Para escoamentos não-permanentes e avaliados de maneira discretizada, a Equação 2.10 pode ser reescrita:

$$\bar{\phi}(x_i, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi(x_i, t) \quad (2.11)$$

onde:

$N$  : número de amostras da propriedade utilizadas na média (variável).

O intervalo médio de tempo  $T$  e o número de amostras  $N$  devem ser grandes o suficiente para eliminar as flutuações da escala de tempo geradas pela turbulência. No limite onde  $T$  tende ao infinito,  $\bar{\phi}$  não depende do tempo no qual a média se inicia e a média das parcelas da variável flutuante  $\bar{\phi}'$  pode ser considerada nula.

As equações RANS são obtidas pelo processo de decomposição de Reynolds no sistema de equações de Navier Stokes. Isto é, as variáveis do escoamento (i.e., velocidades, pressões e campos escalares) são decompostas em um valor médio somado ao valor flutuante em torno da média (Equação 2.9). Esse processo resulta nas equações médias de conservação de massa e quantidade de movimento, que para um fluido incompressível com propriedades constantes podem ser escritas como:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_j\bar{u}_i + \rho\overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} = \frac{\partial\bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial\bar{p}}{\partial x_i} + f_c \quad (2.13)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.14)$$

Segundo Andersson et al. (2012), os termos da parcela  $\rho\overline{u'_j u'_i}$  são chamados tensores de Reynolds (nove termos cisalhantes ao todo para escoamentos tridimensionais). Os termos semelhantes (se  $i = j$ ) são considerados não-nulos por serem o quadrado das flutuações de velocidade em um mesmo eixo. Para termos distintos ( $i \neq j$ ), chamados segundos momentos, a correlação de diferentes componentes de velocidades também garantem que as tensões de cisalhamento sejam diferentes de zero (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O aparecimento do tensor de Reynolds ( $\rho\overline{u'_i u'_j}$ ) adiciona novas variáveis ao problema, fazendo com que o sistema de equações possua mais variáveis do que equações de fechamento e, portanto, se torne um sistema aberto. A saída para o fechamento desse sistema é a modelagem do tensor de Reynolds, mediante uso de valores que já estão disponíveis nas equações médias. Este processo é chamado de fechamento da turbulência, uma vez que o tensor de Reynolds é o termo matemático que descreve a influência da turbulência sobre o escoamento médio.

Os principais modelos de turbulência podem ou não ser baseados em uma propriedade chamada de viscosidade turbulenta. A maior parte dos modelos RANS baseia-se na hipótese da viscosidade turbulenta, proposta por Boussinesq em 1877 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A hipótese relaciona proporcionalmente os tensores de Reynolds com a deformação média do fluido, numa forma semelhante à da Equação 2.14:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (2.15)$$

$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (2.16)$$

$$\mu_t = C\rho\vartheta l \quad (2.17)$$

onde:

$\mu_t$  : viscosidade turbulenta (Pa.s);

$\delta$  : delta de Kronecker (para  $i = j$ ,  $\delta = 1$ , caso contrário, 0) (adim.);

$k$  : energia cinética turbulenta por unidade de massa ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ );

$C$  : constante de proporcionalidade (depende do modelo de turbulência) (adim.);

$\vartheta$  : escala de velocidade do escoamento (m/s);

$l$  : comprimento de escala turbulenta (m).

Souza et al. (2011) destacam a fragilidade da definição dessas propriedades turbulentas no sentido físico, porém ressalta sua importância no contexto de escoamentos de interesses práticos. A viscosidade turbulenta é uma propriedade do escoamento

e não do fluido, variando ao longo do tempo e no espaço. Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), esses termos estão relacionados pelo número de Prandtl/Schmidt turbulento, conforme apresentado na Equação 2.18. Experimentos mostram que essa relação frequentemente possui um valor constante, variando entre 0,7 a 0,9, de acordo com o fluido (FREIRE; COLACO; ILHA, 2006).

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\Gamma_t} \quad (2.18)$$

onde:

$Sc_t$  : número de Schmidt turbulento (adim.);

$\Gamma_t$  : difusividade turbulenta de massa (m<sup>2</sup>/s).

Desse modo, as equações de Navier-Stokes para escoamento de fluido incompressível e com propriedades constantes, modeladas mediante uso do conceito de viscosidade turbulenta escrevem-se:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.20)$$

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. Nessa linha, os modelos  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$  com suas variações (RNG, Realizable, SST) são as mais apresentadas nas bibliografias (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007; ANDERSSON et al., 2012; SOUZA et al., 2011; FERZIGER; PERIC, 2002)

### 2.3.2.2 Large Eddy Simulation (LES)

A simulação de grandes escalas (LES), também conhecida como SRS (*Scale Resolving Simulation*), é uma simulação numérica intermediária entre os modelos RANS e DNS. O comportamento físico das diferentes escalas turbulentas do escoamento são filtradas espacialmente por um comprimento característico de filtro ( $\Delta$ ), separando os grandes vórtices, responsáveis pelo preponderante transporte de energia e quantidade de movimento, dos pequenos vórtices, onde prevalece a isotropia (NETO, 2002).

O processo de filtragem permite reduzir a complexidade numérica de escoamentos com valores de  $Re$  mais elevados, comparado com o DNS, resolvendo numericamente as grandes escalas e modelando as pequenas. A operação de filtragem espacial

de uma função genérica  $\overline{\overline{\phi}}(x, t)$ , definida junto com uma função de filtro  $G(x, x', \Delta)$ , é apresentada a seguir:

$$\overline{\overline{\phi}}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x', \Delta) f(x', t) dx'_1 dx'_2 dx'_3 \quad (2.21)$$

onde:

- $\overline{\overline{\phi}}(x, t)$  : função filtrada (variável);
- $f(x, t)$  : função a ser filtrada (variável);
- $G(x, x', t)$  : função de filtro ( $1/m^3$ );
- $\Delta$  : comprimento característico de filtro (m).

Neste item, salienta-se que a barra horizontal dupla sobrescrita é utilizada para indicar que um termo ou uma variável é filtrada espacialmente (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Nas simulações RANS (item 2.3.2.1), notação semelhante foi utilizada em um contexto diferente para indicar uma média temporal dos termos e das variáveis apresentadas.

As funções de filtro mais comuns para simulações tridimensionais em LES são a *top-hat*, Gaussiana e a *Spectral cutoff*, apresentadas respectivamente nas seguintes equações:

$$G(x, x', \Delta) = \begin{cases} 1/\Delta^3 & |x - x'| \leq \Delta/2 \\ 0 & |x - x'| > \Delta/2 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$G(x, x', \Delta) = \left( \frac{6}{\pi \Delta^2} \right)^{3/2} e^{-6|x-x'|^2/\Delta^2} \quad (2.23)$$

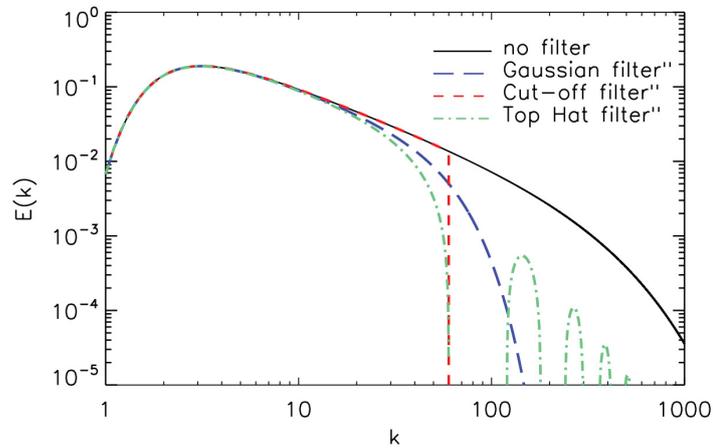
$$G(x, x', \Delta) = \prod_{i=1}^3 \frac{\sin[(x_i - x'_i)/\Delta]}{x_i - x'_i} \quad (2.24)$$

A função de filtro *top-hat*, também conhecida como *box-filter*, possui maior uso em aplicações utilizando o método dos volumes finitos e o filtro Gaussiano, no método das diferenças finitas. O *spectral cutoff*, semelhante ao filtro Gaussiano, é preferido pela academia devido ao seu maior grau de detalhe comparado com o *top-hat*. A Figura 2.14 apresenta, sob a forma de um gráfico di-log, a diferença entre as diferentes funções de filtro no espectro de energia turbulenta do escoamento. No eixo da ordenada, a energia das diferentes escalas de comprimento ( $E(k)$ ) e, na abcissa, o número de ondas (*wave number*) ( $k$ ). A parte remanescente do espectro não representada adequadamente, com as pequenas escalas, é resolvida por modelagens de fechamento.

Por definição, o comprimento característico de filtro é uma medida indicativa do tamanho de vórtices para determinar aqueles que serão retidos ou rejeitados. Em simulações de CFD com método dos volumes finitos, o valor de  $\Delta$  deve ser superior ou igual ao tamanho das células, com objetivo de não se perder a informação calculada em seu domínio. Na condição mais detalhada da representação da turbulência, o valor

do comprimento característico de filtro é igual a aresta de um hexaedro regular, com base nas três dimensões das células do domínio.

FIGURA 2.14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES FUNÇÕES DE FILTRO NO ESPECTRO DE ENERGIA



FONTE: Laval (2020)

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2.25)$$

onde:

$\Delta x, \Delta y$  e  $\Delta z$  [m] : comprimento da célula da malha nas direções x, y e z.

As equações de Navier-Stokes na simulação LES, para escoamento de fluidos incompressíveis, são semelhantes às apresentadas nos modelos RANS, com a diferença da operação de filtragem nos termos com barra sobrescrita. Após o processo de filtragem especial, as equações filtradas de conservação de massa e quantidade de movimento são dadas por (FERZIGER; PERIC, 2002):

$$\frac{\partial \bar{\rho} \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.27)$$

### 2.3.2.3 Detached-Eddy Simulation (DES)

A simulação DES, inicialmente proposta por Spalart et al. (1997), envolve uma aplicação híbrida dos métodos 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 de 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).

Essas simulações utilizam um comprimento de escala variável  $L_{DES}$ , que depende da malha computacional e da escala de comprimento turbulento ( $L_{RANS}$ ):

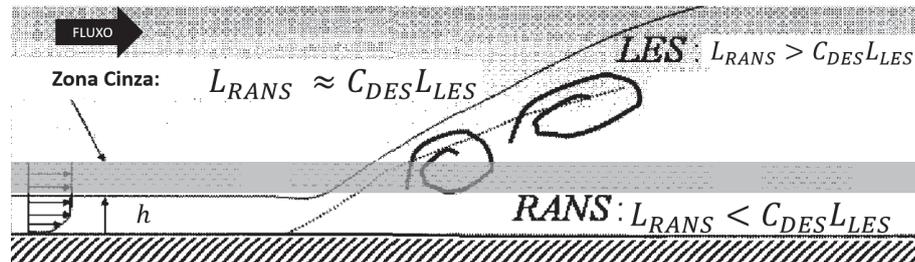
$$\begin{aligned} L_{DES} &= \min(L_{RANS}, C_{DES}L_{LES}) \\ L_{LES} &= \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \end{aligned} \quad (2.28)$$

onde:

- $L_{DES}$  : comprimento de escala LES;
- $L_{RANS}$  : comprimento de escala RANS;
- $C_{DES}$  : constante relacionada as condições de contorno do modelo DES;
- $L_{LES}$  : maior comprimento em uma das direções da célula.

A separação do domínio para o uso das diferentes métodos de simulação (LES/RANS) no escoamento está ilustrado na Figura 2.15, com a lamina d'água representada pela letra  $h$ .

FIGURA 2.15 – REGIÕES DE SIMULAÇÃO RANS/LES EM UM RESSALTO HIDRÁULICO



FONTE: Adaptado Sagaut, Deck e Terracol (2006)

Nota-se que, na Figura 2.15, a região inferior do escoamento ( $h < C_{DES}L_{LES}$ ) é modelada utilizando RANS devido ao elevado grau de anisotropia do escoamento comum nesta região. Nas regiões mais distantes do fundo do canal ( $L_{RANS} > C_{DES}L_{LES}$ ), utiliza-se a simulação 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 turbulência mutuamente.

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 e  $k-\omega$ . Na Tabela 2.1 estão apresentados alguns dos valores e termos mais utilizados na simulação DES. Nota-se que os valores da constante são sensíveis para definir a transição dos modelos RANS e LES e o termo  $L_{RANS}$  representa a escala de comprimento turbulenta prevista em uma modelagem RANS.

TABELA 2.1 – 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)

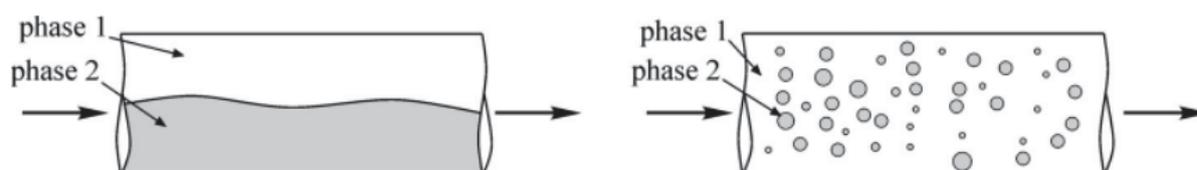
Desse modo, as equações de Navier Stokes nesse tipo de simulação, utiliza-se das formulações em RANS (Equações 2.12 e 2.13) e LES (Equações 2.27 e 2.26), dependendo da região em estudo.

### 2.3.3 Simulação de escoamentos Multifásicos

Escoamentos multifásicos são caracterizados quando mais de uma fase escoar simultaneamente em um domínio. O termo fase, entende-se como uma região do espaço delimitada por uma interface de espessura infinitesimal que encerra em seu interior um material com composição química homogênea, propriedades de transporte e de estado definíveis e que seja separável por processos mecânicos (ANDERSSON et al., 2012).

Os escoamentos multifásicos são classificados principalmente em dois grupos: escoamentos separados (estratificados) e escoamentos dispersos (Figura 2.16).

FIGURA 2.16 – À ESQUERDA ESCOAMENTO ESTRATIFICADO E À DIREITA, UM ESCOAMENTO DISPERSO



FONTE: Andersson et al. (2012)

Andersson et al. (2012) também 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 da fase contínua. Em escoamentos densos, as interações entre partículas são dominantes.

Em um escoamento multifásico, a quantidade de volume ocupado pelas fases é descrita pela variável fração de volume (*volume fraction*). A fração de volume da fase dispersa se caracteriza pela soma dos volumes das partículas dispersas em um volume unitário, conforme Equação 2.29.

$$\alpha_d = \frac{\sum_{i=1}^{N_d} V^i}{V} \quad (2.29)$$

onde:

$\alpha_d$  : fração de volume da fase dispersa;

$V^i$  : volume ocupado por uma partícula ou gota da fase dispersa;

$N_d$  : quantidade de partículas ou gotas no volume  $V$ .

Tendo em vista que a soma das frações de volume das fases dispersa e contínua deve ser igual a 1, a fração de volume da fase contínua  $\alpha_f$  resulta (para um sistema bifásico):

$$\alpha_f = 1 - \alpha_d \quad (2.30)$$

A fração de volume é calculada ao longo do tempo com uma equação de transporte adicional. Se o sistema multifásico possuir três fluidos (ex. água, ar e óleo), são necessárias duas equações de transporte para o cálculo da fração de volume. A equação de transporte da fração de volume da fase dispersa é assim expressa:

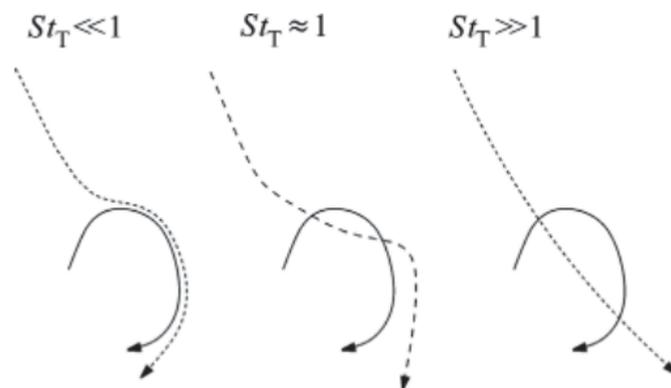
$$\frac{\partial \alpha_d}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_d \mathbf{u}_d) = 0 \quad (2.31)$$

onde:

$\mathbf{u}_d$  : velocidade da fase dispersa.

Para estimar se um fluido se comporta como partículas ou como uma fase contínua em outro fluido, o número de Stokes é utilizado. O número relaciona a escala de tempo da fase dispersa (partículas) com a da fase contínua (escoamento). Valores de número de Stokes muito maiores que a unidade indicam um escoamento em que as partículas são independentes do comportamento da fase contínua (Figura 2.17).

FIGURA 2.17 – EFEITO DE VÓRTICE TURBULENTO (LINHA CONTÍNUA) EM UMA PARTÍCULA (LINHA TRACEJADA) PARA DIFERENTES NÚMEROS DE STOKES



FONTE: Andersson et al. (2012)

O acoplamento entre a fase contínua e dispersa pode ser tratado com as seguintes abordagens:

- acoplamento de uma via (*one-way coupling*): se as partículas não influenciam o escoamento, somente o efeito do escoamento nas partículas é importante.
- acoplamento de duas vias (*two-way coupling*): se o número de Stokes for maior que a unidade, a fração de volume da fase dispersa é suficientemente grande para afetar a densidade média da mistura. Se ainda o escoamento for suficientemente diluído, as interações entre partículas podem ser negligenciadas.
- acoplamento de quatro vias (*four-way coupling*): semelhante ao acoplamento de duas vias, porém as interações entre partículas passam a ser importantes.

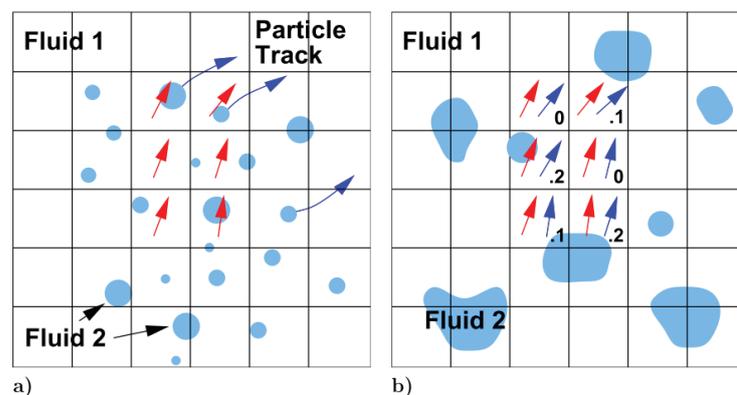
#### 2.3.4 Abordagens Computacionais de Escoamentos Multifásicos

As duas principais abordagens para o cálculo de escoamentos multifásicos dispersos são os modelos Euleriano-Lagrangiano e Euleriano-Euleriano, ilustrados na Figura 2.18.

A abordagem euleriana-lagrangiana é utilizada para escoamentos dispersos, em que a fase fluida é modelada como contínua e as partículas da fase dispersa têm suas trajetórias modeladas individualmente. O segundo modelo, euleriano-euleriano, aborda as fases como fluidos, por isso também é chamado de modelo de dois fluidos.

Em escoamentos estratificados, o modelo Euleriano-Euleriano pode ser simplificado para reduzir o esforço computacional dos cálculos dando origem a dois modelos: o modelo de mistura (escorregamento algébrico) e o modelo *Volume-of-Fluid* (VoF) - bastante tradicional nos *softwares* FLOW-3D e OpenFOAM.

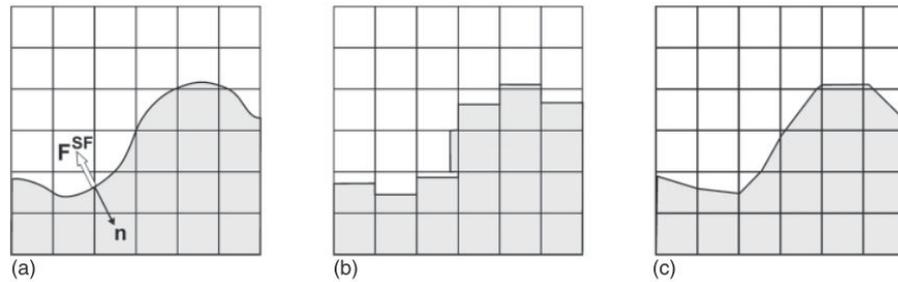
FIGURA 2.18 – ABORDAGENS DO ESCOAMENTO MULTIFÁSICO: A) EULERIANO-LAGRANGIANO E B) EULERIANO-EULERIANO



FONTE: Rusche (2002)

A abordagem Volume of Fluid (VoF) é aplicada para escoamentos multifásicos estratificados. Segundo Andersson et al. (2012), um dos principais objetivos deste tipo de simulação é a correta caracterização da interface entre fluidos.

FIGURA 2.19 – VOLUME OF FLUID - VOF: A) INTERFACE REAL ENTRE FLUIDOS, B) FRAÇÃO DE VOLUME CALCULADA PELO VOF E C) INTERPOLAÇÃO LINEAR DA SUPERFÍCIE



FONTE: Andersson et al. (2012)

O método VoF utiliza uma equação de transporte para representar a fração de volume ocupada por um fluido ao longo do domínio computacional (Equação 2.32).

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\alpha) = 0 \quad (2.32)$$

Andersson et al. (2012) exemplificam que, para se obter boa precisão na caracterização da interface de uma bolha, uma malha de cerca de 20 células por diâmetro da bolha é necessária. Castro, Li e Carrica (2016) sugere uma estimativa entre 8 a 12 elementos para a representação da dinâmica de interface das bolhas, desconsiderando efeitos de coalescência.

Em modelos de escoamento estratificado, geralmente adiciona-se a força de tensão superficial na equação de quantidade de movimento, uma vez que essa força se torna importante quando a interface entre fluidos deixa de ser reta.

Andersson et al. (2012) salientam que, em grandes interfaces tais como as encontradas em escoamentos estratificados sem grandes ondulações, ou em bolhas ou gotas com diâmetros maiores que alguns centímetros, a força de tensão superficial pode ser negligenciada. Contudo, em escoamentos com bolhas de alguns milímetros, a força de tensão superficial pode ser dominante e ser responsável por manter as bolhas com formato esférico.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método adotado para avaliar o efeito do comprimento de defletores horizontais na curva de performance foi realizado por meio de simulações computacionais hidrodinâmicas, utilizando o *software* OpenFOAM. O presente capítulo divide-se em três itens: Caracterização do Projeto-Piloto, Estudos em Modelo Físico Reduzido e Simulações Computacionais.

No primeiro item, é definido e justificado a escolha do empreendimento hidrelétrico a ser representado neste trabalho (Projeto-Piloto). Além disso, é realizada uma caracterização das principais estruturas hidráulicas do arranjo geral, como vertedouro, bacia de dissipação e o defletor horizontal.

O segundo item apresenta os estudos em modelo físico reduzido, desenvolvidos por Dettmer (2022), no laboratório do CEHPAR. Destaca-se a importância desse tema no presente capítulo, uma vez que as medições realizadas no modelo físico foram utilizadas para validar o modelo computacional. Nesse item também são descritos os equipamentos utilizados para os diferentes tipos de medições realizadas.

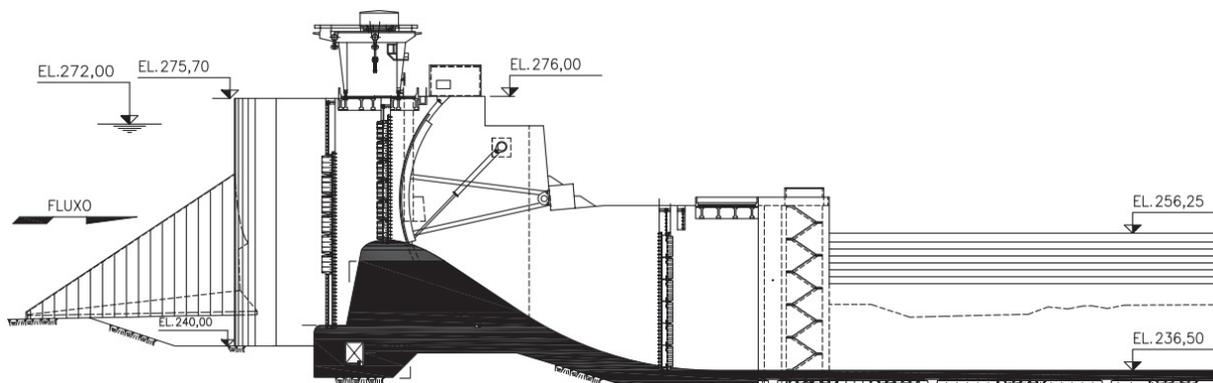
No terceiro item, referente às simulações computacionais, são apresentados os aspectos numéricos do *software* escolhido, o domínio físico representado, o processo de construção e validação da malha computacional. Também são apresentadas as configurações hidráulicas e geométricas a serem simuladas e a configuração de hardware utilizada.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROJETO-PILOTO

A UHE Colíder, localizada no rio Teles Pires (MT) e com início de operação em 2019, possui um vertedouro e bacia de dissipação. O vertedouro possui quatro vãos controlados por comportas segmento e com capacidade de descarregar uma vazão de  $6.937 \text{ m}^3/\text{s}$  (cheia decamilenar). A Figura 3.1 apresenta um corte longitudinal do vertedouro e da bacia de dissipação e a Figura 3.2 ilustra o vertedouro visto em planta.

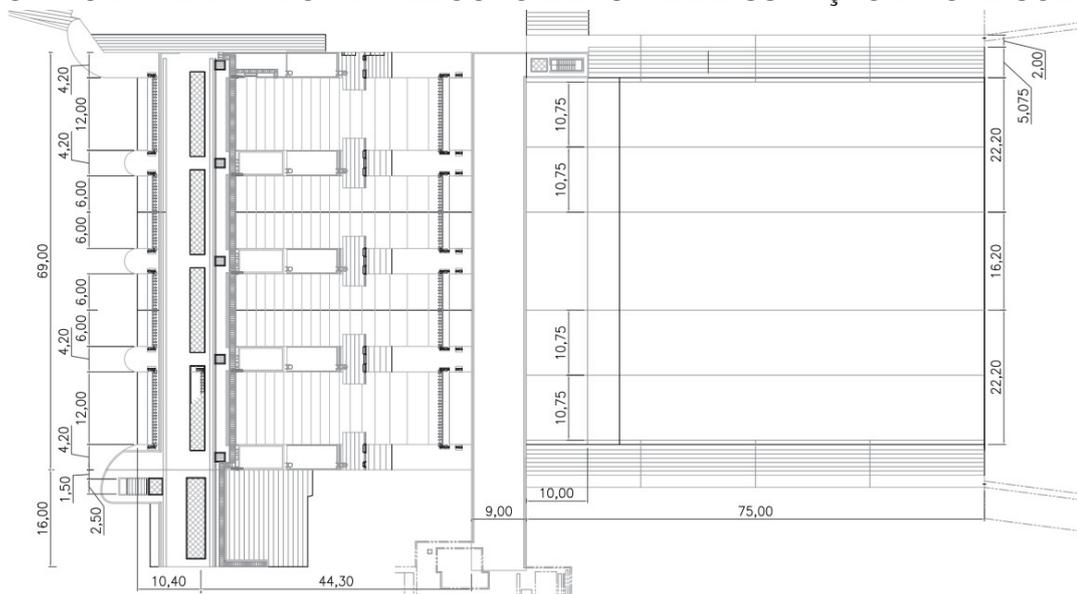
A crista do vertedouro está na elevação 255,30 m (Figura 3.3). O vertedouro é composto por vãos de 12,00 m e pilares de 4,20 m, totalizando 69,00 m de largura ao longo de toda a estrutura. Trata-se de um vertedouro com um desnível de 18,80 m entre a elevação da crista do vertedouro ao fundo da bacia de dissipação.

FIGURA 3.1 – CORTE LONGITUDINAL DO VERTEDOURO E BACIA DE DISSIPACÃO DA UHE COLÍDER SEM A ESTRUTURA DO DEFLETOR



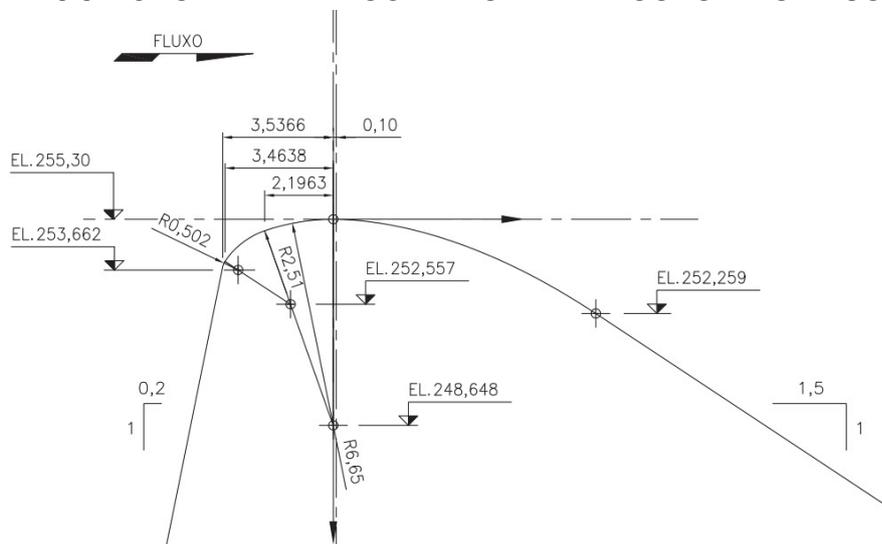
FONTE: Adaptado - Copel (2020)

FIGURA 3.2 – PLANTA DO VERTEDOURO E BACIA DE DISSIPACÃO DA UHE COLÍDER



FONTE: Adaptado - Copel (2020)

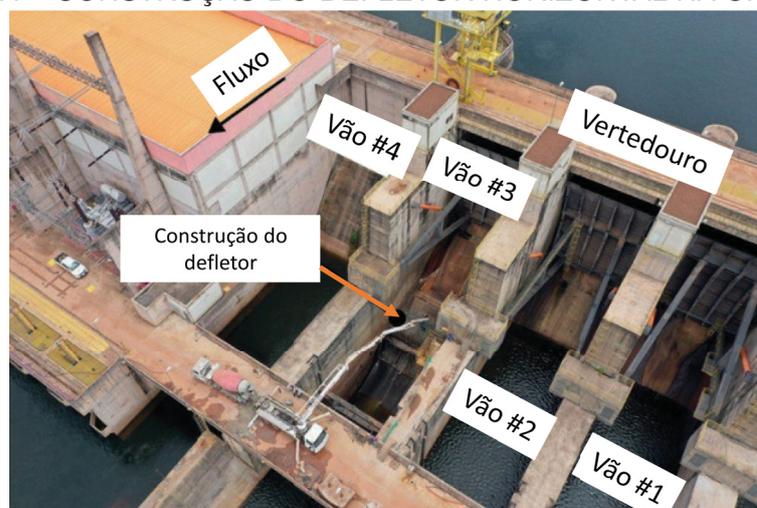
FIGURA 3.3 – GEOMETRIA DA OGIVA DO VERTEDOURO DA UHE COLÍDER



FONTE: Adaptado - Copel (2020)

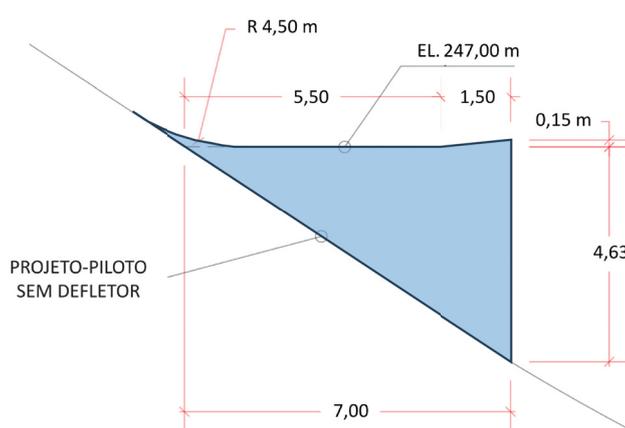
Contudo, antes da operacionalização da usina, foi registrado um episódio de mortandade de peixes, em 2017 (SOUZA, 2019). Na sequência, já foram iniciados os estudos em modelo físico reduzido (escala geométrica 1:60) para a definição da geometria e posição dos defletores e estudos computacionais para modelagem de TDG na água. Para a definição do defletor, foram consideradas as vazões mais recorrentes e a curva chave do empreendimento, buscando o regime *skimming flow*. Em 2021, foram construídos os defletores horizontais na calha do vertedouro, nos quatro vãos existentes (Figura 3.4). O detalhe do defletor e suas dimensões são ilustradas na Figura 3.5.

FIGURA 3.4 – CONSTRUÇÃO DO DEFLETOR HORIZONTAL NA UHE COLIDER



FONTE: Schaskos (2021)

FIGURA 3.5 – DIMENSÕES DO DEFLETOR HORIZONTAL NO VERTEDOURO



FONTE: Dettmer (2022)

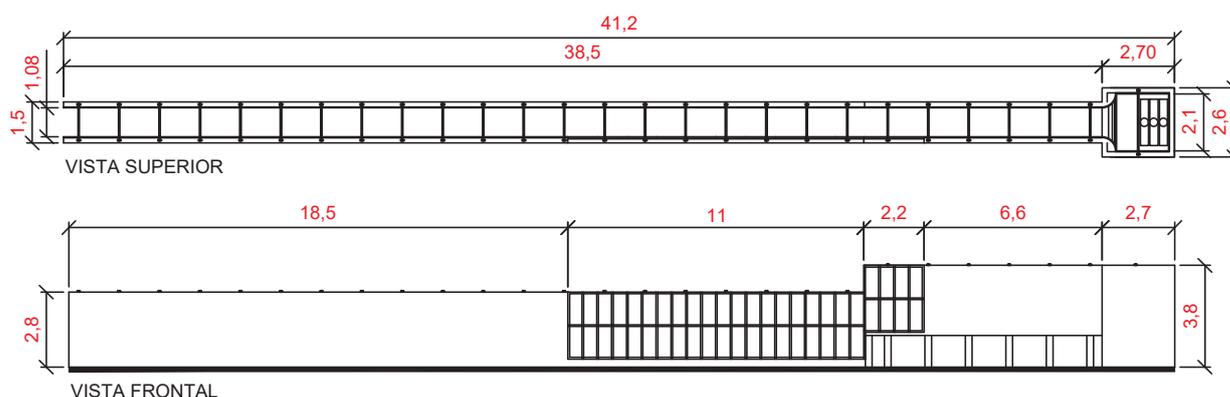
Desse modo, a escolha da UHE Colíder como Projeto-Piloto considerou aspectos como a presença de uma bacia de dissipação, a instalação de defletores horizontais na obra, e pela existência de informações e dados de modelo físico realizados ao longo do projeto de P&D (2020-2023) e de estudos anteriores.

### 3.2 ESTUDOS EM MODELO FÍSICO REDUZIDO

Os estudos desenvolvidos em modelo físico reduzido e apresentados neste trabalho foram realizados em uma escala geométrica 1:15, operando sob o critério de semelhança de Froude. A definição da escala geométrica considerou também outros aspectos como área disponível, capacidade de recalque de vazão e maior representatividade de escoamentos aerados, foco também do P&D.

O canal experimental possui 41,20 m de comprimento, 1,50 m de largura. O trecho a montante do vertedouro possui 3,80 m de altura e o trecho a jusante, 2,80 m, totalizando uma área de aproximadamente 120 m<sup>2</sup>. A Figura 3.6 ilustra o croqui esquemático do canal experimental, com medidas e elevações em escala de modelo (escoamento da direita para esquerda).

FIGURA 3.6 – CROQUI ESQUEMÁTICO DO CANAL EXPERIMENTAL



FONTE: Dettmer (2022)

O modelo físico reproduziu um vão do vertedouro no canal experimental com dois meio pilares, a comporta segmento, ogiva do vertedouro, bacia de dissipação, defletor e o canal de restituição (Figura 3.7). O sistema de alimentação de vazão do modelo foi composta por três tubos de aço galvanizado com diâmetro de 300 mm capazes de fornecer vazões até 510 l/s. Na extremidade de jusante do canal experimental foi instalada uma comporta basculante de aço, utilizada para impor o nível de água de jusante durante os testes.

Foram realizadas medições de perfil de linha de água, pressões médias e instantâneas, além de velocidades médias em diferentes regiões do escoamento. As características dos equipamentos e processos de medição são descritos a seguir.

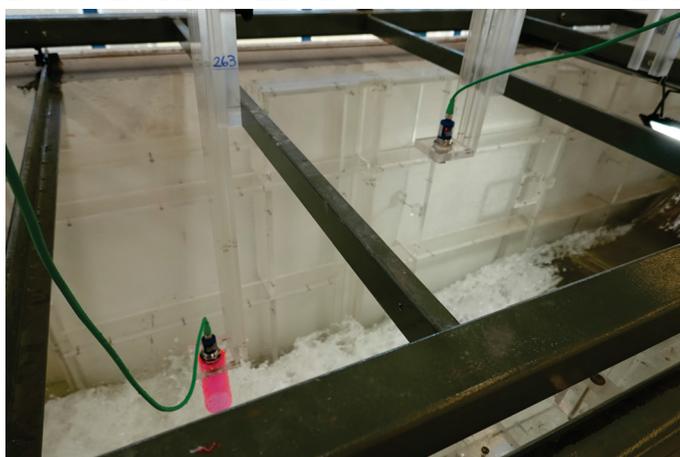
FIGURA 3.7 – MODELO FÍSICO REDUZIDO - ESCALA GEOMÉTRICA 1:15



FONTE: Dettmer (2022)

Os perfis de linha de água foram traçados por medições com sensores ultrassônicos do modelo MIC+130 da marca Sense, com precisão na faixa de 0,18 a 0,57 mm. As leituras foram realizadas com frequência de 15 amostras por segundo, durante 2 minutos, totalizando 1.800 amostras. Os sensores foram instalados no eixo central do canal em uma plataforma móvel capaz de deslocar-se ao longo da bacia de dissipação (Figura 3.8).

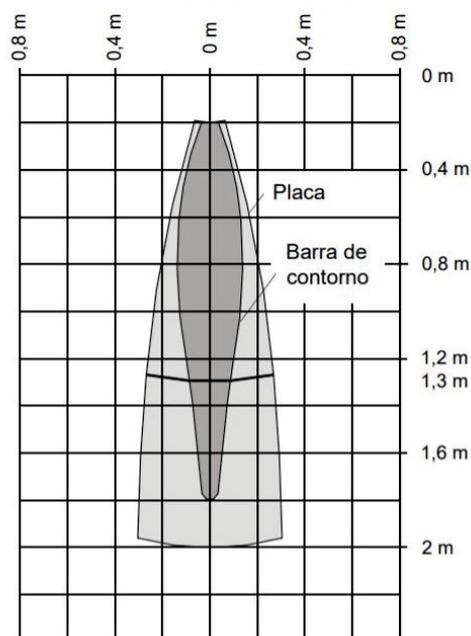
FIGURA 3.8 – SENSORES DE NÍVEL ULTRASSÔNICOS INSTALADOS NO MODELO



FONTE: Dettmer (2022)

O funcionamento do sensores de nível de água é ilustrado na Figura 3.9. A área em cinza escuro representa a zona onde o sensor lê de forma precisa (de 0,2 m até 1,3 m — região interna da barra de contorno). A área em cinza claro é a região de máxima operação, onde são detectados somente objetos maiores (com distâncias a partir de 1,30 m até 2,00 m).

FIGURA 3.9 – CONE DE INFLUÊNCIA MIC+130



FONTE: Sense (2009)

Nota-se que além dos registros com os sensores de nível, foi instalada uma régua limnométrica a 26,7 m a jusante da crista (400 m em protótipo).

As medições de pressões médias foram realizadas com piezômetros no eixo do canal experimental nas estruturas do vertedouro e bacia de dissipação. Já as pressões instantâneas foram realizadas com transmissores de pressão da marca Zurich, com faixa de medição entre -0,5 m.c.a a 3,5 m.c.a e somente na região do defletor. A frequência de amostragem foi de 500 Hz durante 4 min, totalizando 120.000 amostras por teste no modelo (em cada tomada).

FIGURA 3.10 – TRANSMISSOR DE PRESSÃO ZÜRICH



FONTE: Dettmer (2022)

Por fim, as medições de velocidades no canal foram realizadas em duas posições, a 8,00 m e 10,73 m a jusante da crista (120,00 m e 161,00 m, em protótipo), ao final da bacia de dissipação a partir da cota 238,00 m. A escolha das seções foi motivada

pela turbulência e intensidade do escoamento no modelo físico. Destaca-se também a grande presença de bolhas na operação do modelo físico, principalmente para vazões mais elevadas ensaiadas, justificando medições mais distantes do vertedouro. Foi utilizado um micromolinete bidirecional (Figura 3.11). As medições foram registradas durante 2 minutos a frequência de 25 Hz, totalizando 1.500 amostras.

FIGURA 3.11 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE VELOCIDADES - DELFT



FONTE: Dettmer (2022)

### 3.3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

#### 3.3.1 *Software CFD* escolhido - OpenFOAM

##### A - Descrição do Programa

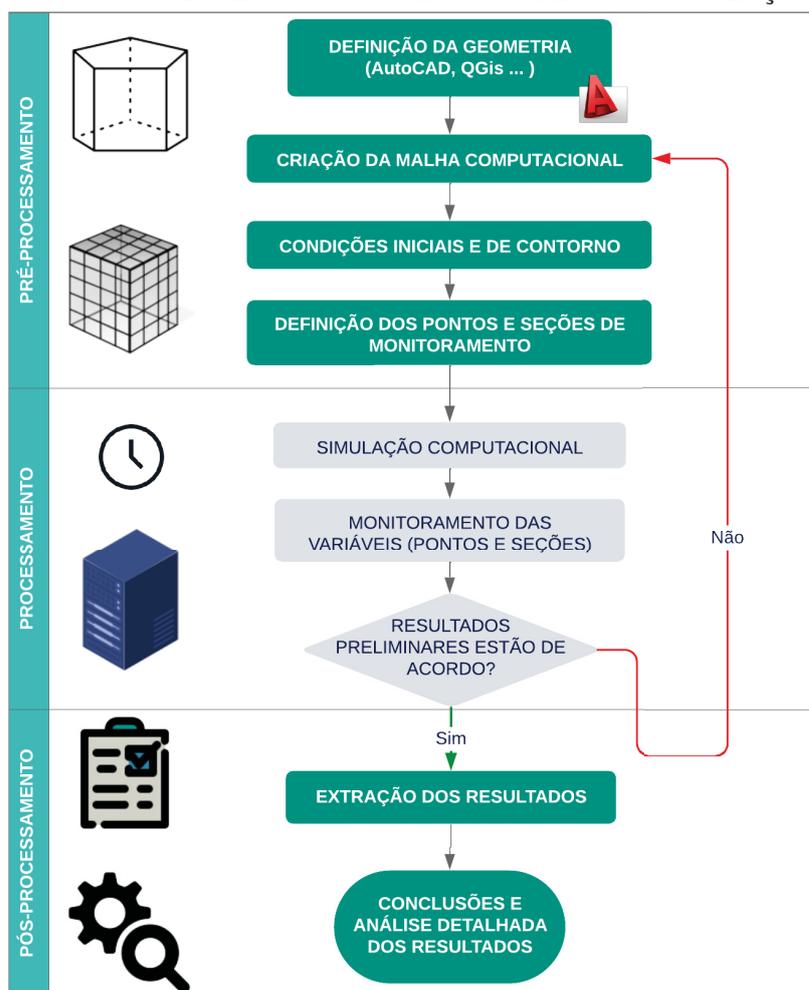
O *software* OpenFOAM, da sigla *Open Field Operation and Manipulation*, é um programa de código aberto, com licença gratuita, em linguagem C++, desenvolvido pela OpenCFD Ltd e CFD Direct. Sua instalação é viável no Linux, Windows (subsistema Linux) e macOS. No âmbito elaboração deste documento, as duas versões utilizadas foram o OpenFOAM v8 e v2012., sendo o primeiro com ferramentas mais voltadas para a pesquisa e outro em aplicações práticas.

Semelhante ao ANSYS e ao COMSOL, o OpenFOAM simula diversos tipos de cenários físicos, envolvendo transferência de calor e escoamentos multifásicos, utilizando o método dos volumes finitos.

A estrutura dos processos de uma simulação está ilustrada na Figura 3.12, dividido em 3 partes: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Nota-se que essa divisão também se faz presente em outros *softwares* CFD.

O pré-processamento é primeira etapa de qualquer modelagem computacional CFD. Essa fase consiste na criação de sólidos e geometrias complexas que serão representadas (elaborados em outros programas como Blender, AutoCAD e Meshlab, por exemplo) e da malha computacional (estruturada ou não estruturada), elaborado no próprio OpenFOAM, caracterizando suas condições de contorno. Em resumo, define o

FIGURA 3.12 – ESTRUTURA BÁSICA DE UMA SIMULAÇÃO



FONTE: O Autor (2025)

domínio e sua discretização espacial, condição fundamental para representar qualquer cenário físico.

Na etapa de processamento (*solving*) são definidas principalmente as equações governantes a serem resolvidas (*solver*), incluindo as hipóteses físicas adotadas (como incompressibilidade e fluido newtoniano, por exemplo) e o método de acoplamento de velocidade-pressão. Adicionalmente, no OpenFOAM, também pode-se utilizar funções de acompanhamento durante a simulação, com o intuito de avaliar ao longo da modelagem os parâmetros físicos pontuais ou resíduos numéricos de cada variável do sistema físico. Outro recurso disponível nesta etapa do software é o uso da malha dinâmica, onde é possível refinar ou desrefinar regiões do domínio em um determinado intervalo de tempo sob algum critério previamente especificado.

Na etapa do pós-processamento, os resultados da simulação são avaliados localmente e em todo domínio para os múltiplos campos gerados (velocidade, pressão, nível de água, dentre outros). Como o OpenFOAM não possui interface gráfica, comumente utiliza-se o software ParaView (licença gratuita) para tal etapa. Além disso, é

possível utilizar funções definidas pelo programa para calcular variáveis secundárias que dependam das informações salvas em cada diretório de tempo salvo.

Salienta-se que no processo descrito, a criação de um modelo computacional representativo dependeu da repetição dessas três etapas. Uma vez que os resultados não sejam suficientemente satisfatórios com os dados a serem representados, é necessário alterar a malha e/ou o *solver* utilizado.

#### B - *Solver* Utilizado: `interFoam`

O OpenFOAM é um *software* de código aberto utilizado para simulações *CFD* e possui *solvers* especializados — biblioteca de ferramentas para resolver problemas específicos baseados nas equações governantes dos fluidos, (Navier-Stokes, por exemplo). Cada *solver* é configurado para abordar diferentes fenômenos físicos, permitindo flexibilidade de simplificações e precisão. Esses *solvers* oferecem aos usuários a possibilidade de personalizar e ajustar suas simulações.

O *solver* `interFoam` é voltado para simulações multifásicas, para resolver problemas que envolvem duas fases isotérmicas e imiscíveis (como ar e água) — utilizando o método euleriano-euleriano simplificado para escoamentos estratificados (*Volume of Fluid*). O método é baseado no rastreamento da fração volumétrica das fases, o que permite capturar interfaces nos escoamentos.

Entre as vantagens do `interFoam`, destaca-se o suporte para modelagens de diferentes escoamentos, de laminar a turbulento, incluindo a possibilidade de adicionar modelos de turbulência. Por ser integrado ao OpenFOAM, o *solver* também é gratuito, escalável para simulações de HPC (*high performance computing*) e permite integração com outras ferramentas de pós-processamento. No entanto, o *solver* apresenta algumas desvantagens. A captura precisa da interface depende da qualidade da malha e do refinamento local, o que pode aumentar significativamente o custo computacional. É também calculado somente uma equação de quantidade de movimento para ambos os fluidos. Além disso, a configuração inicial do caso requer um conhecimento detalhado da estrutura do OpenFOAM, o que pode ser não trivial em relação a *softwares* com licença comercial.

Desse modo, o `interFoam` foi escolhido como *solver* neste estudo devido ao seu equilíbrio entre flexibilidade, precisão e suporte para simulações complexas de escoamentos multifásicos - além de ter sido utilizado em estudos anteriores também (HUANG et al., 2021).

#### C - Outros Aspectos Numéricos

Neste subitem são descritos os principais parâmetros numéricos de fechamento utilizados nas simulações realizadas neste trabalho: modelo de turbulência, acoplamento velocidade-pressão, número de Courant e coeficientes de relaxamento.

Além de uma breve caracterização desses parâmetros, quando necessário, também é justificada a escolha de cada um deles - destacando vantagens e limitações.

A escolha do modelo de turbulência, DES k-Omega SST, baseou-se em trabalhos anteriores. Conforme Wang, Politano e Weber (2018), a modelagem RANS não é apropriada para representar a anisotropia da superfície livre dos regimes de escoamento produzidos pelos defletores horizontais. Dessa forma, optou-se, também por um modelo híbrido DES, com fechamento da parte RANS com o modelo k-Omega SST — semelhante à estudos anteriores (TAKENOBU et al., 2022)

O número de Courant é um parâmetro adimensional usado para avaliar a estabilidade de soluções que envolvem transporte de fluxos - principalmente em regimes de escoamento não-permanente. Ele é definido como a razão entre a distância percorrida por uma partícula em um intervalo de tempo e o tamanho da célula de malha. Logo, o parâmetro indica o quão rápido uma partícula pode se mover através da malha em relação a um passo temporal da simulação. Para garantir estabilidade nos métodos de cálculos, sugere-se que o número de Courant seja mantido abaixo de 1,0. Nas simulações foi adotado o valor de 0,50 ao longo de todos os testes.

Outro tópico que merece destaque é o acoplamento velocidade-pressão. Devido a natureza implícita da pressão na equação da continuidade e ausência de um equacionamento próprio, o processo de descobrir os campos resultantes de velocidade e pressão que respeitem as equações de conservação é um processo complexo. No OpenFOAM existem 3 métodos disponíveis para a solução deste problema: SIMPLE, PISO e PIMPLE.

O SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) é um algoritmo recomendado para regimes permanentes e apresenta correções dos campos de velocidade e pressão em todo o domínio em um nível geral. O PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) é indicado para problemas transientes com correções dos campos de velocidade e pressão dentro de cada passo de tempo. O PIMPLE (*Merged PISO-SIMPLE algorithm*) é a união de ambos os métodos, com a vantagem de ser estável para passos de tempos maiores em regime transiente, porém tem maior custo computacional. Desse forma, optou-se por utilizar o método PIMPLE nas simulações, devido a natureza anisotrópica e transiente do escoamento.

Os coeficientes de relaxação, configurados no arquivo `fvSolution` do OpenFOAM, controlam a atualização das variáveis em cada iteração, equilibrando estabilidade e velocidade de convergência. Valores entre 0 e 1 (sub-relaxação) limitam mudanças bruscas, melhorando estabilidade em problemas não lineares, enquanto valores acima de 1 (sobrerelaxação) podem acelerar a convergência em sistemas bem condicionados. Nas simulações deste trabalho foi utilizado o coeficiente de 1,0.

### 3.3.2 Construção do Modelo Computacional

Todas as malhas computacionais foram elaboradas utilizando o gerador de malha do OpenFOAM, `blockMesh`. As dimensões e informações dos domínios computacionais criados estão contidos em um dicionário chamado `blockMeshDict`, localizado no diretório `system` dos casos simulados. O corte do vertedouro e os refinamentos em regiões específicas do domínio utilizaram o dicionário `snappyHexMeshDict`.

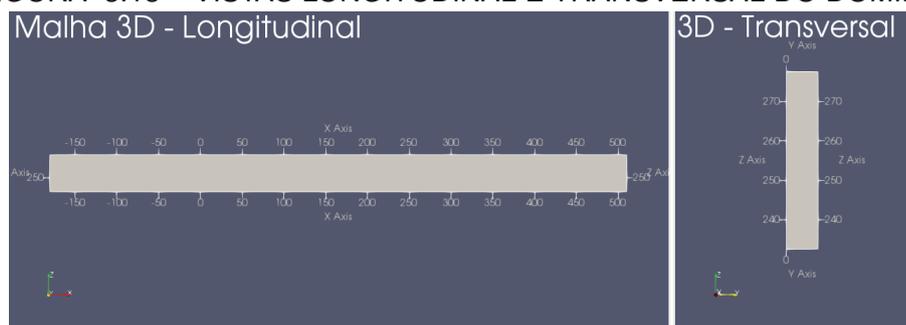
A seguir, é apresentada a caracterização das malhas computacionais e os critérios utilizados. O subitem é dividido em três partes: dimensões dos domínios computacionais; condições de contorno; e, tamanho e quantia de células.

#### A - Dimensões dos Domínios Computacionais

As dimensões de comprimento, largura e altura dos domínios computacionais em dimensões de protótipo foram: 690,00 m x 8,10 m x 45,00 m, respectivamente. A Figura 3.13 apresenta vistas do domínio tridimensional em dimensões de protótipo. A justificativa para adoção dessas dimensões foram:

- Comprimento (L): definida como 630,00 m, sendo 180,00 m a montante da crista do vertedouro e 510,00 m a jusante do mesmo ponto de referência. O domínio abrange as estruturas do vertedouro, bacia de dissipação e as régua limnimétricas;
- Largura (B): definida como 8,10 m, resultante da configuração de meio vão do vertedouro (6,00 m) com o meio pilar esquerdo (2,10 m). A metade direita do canal foi representada utilizando um plano de simetria, com objetivo de reduzir custo computacional;
- Altura (H): definida como 45,00 m em acordo com as cotas da bacia de dissipação (EL. 236,50 m), e uma sobrelevação da ordem de 5,00 m no nível do reservatório de operação (N.A.R = 272,00 m) na região de alimentação a montante do vertedouro.

FIGURA 3.13 – VISTAS LONGITUDINAL E TRANSVERSAL DO DOMÍNIO



FONTE: O Autor (2025)

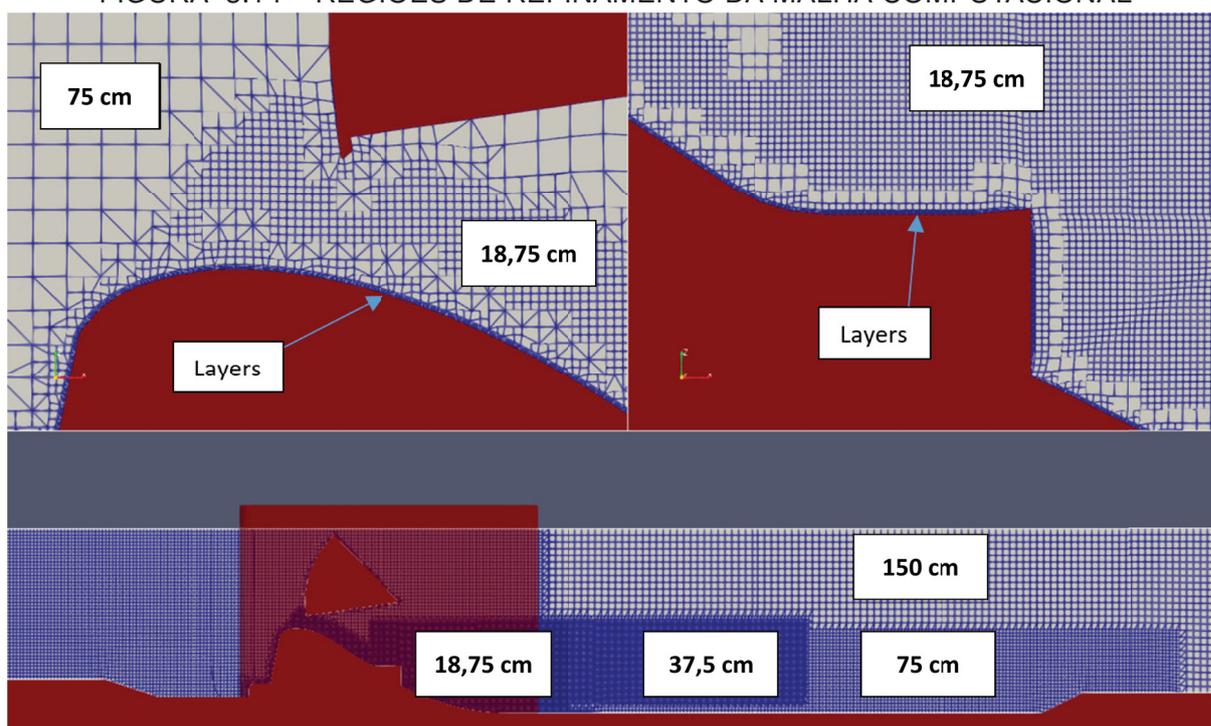
## B - Características das Malhas Computacionais

A elaboração das malhas a partir do domínio computacional utilizou arquivos em formato STL desenvolvidos no AutoCAD e baseadas nas informações da UHE de Colider. Os arquivos STL representaram as estruturas do vertedouro, comporta, defletor, pilares, bacia de dissipação, alimentação e a restituição do canal. Com o uso da ferramenta *snappyHexMesh*, o domínio foi redefinido considerando as geometrias a serem representadas.

A quantidade e o tamanho dos elementos das malhas computacionais variaram entre as diferentes configurações hidráulicas. Os testes com maiores aberturas de comporta usaram elementos com menor refinamento, resultando também em um menor número de elementos. Outro fator característico do domínio foi a presença ou ausência do defletor na calha do vertedouro. A adoção dessa estrutura aumenta a superfície de contorno de corte da malha e por isso, quando implementado, aumentou a quantidade de elementos.

O refinamento da malha foi realizada em cinco regiões específicas do escoamento: na abertura da comporta, na região próxima à calha do vertedouro, no defletor, na bacia de dissipação e na região próxima ao meio pilar esquerdo. Também foram adicionadas *layers* (elementos ortogonais e paralelos ao contorno sólido) para representar adequadamente o gradiente de velocidades do escoamento no vertedouro. A Figura 3.14 ilustra para uma das malhas utilizadas, as regiões de refinamento do domínio.

FIGURA 3.14 – REGIÕES DE REFINAMENTO DA MALHA COMPUTACIONAL



FONTE: O Autor (2025)

Os tamanhos dos elementos seguiram a escala geométrica, em dimensões de protótipo, conforme o critério de semelhança de Froude, com elementos entre 0,09 m a 1,50 m no eixo x (eixo longitudinal), 0,045 m a 1,50 m no eixo z (altura) e 0,30 m a 2,00 m no eixo y (eixo transversal).

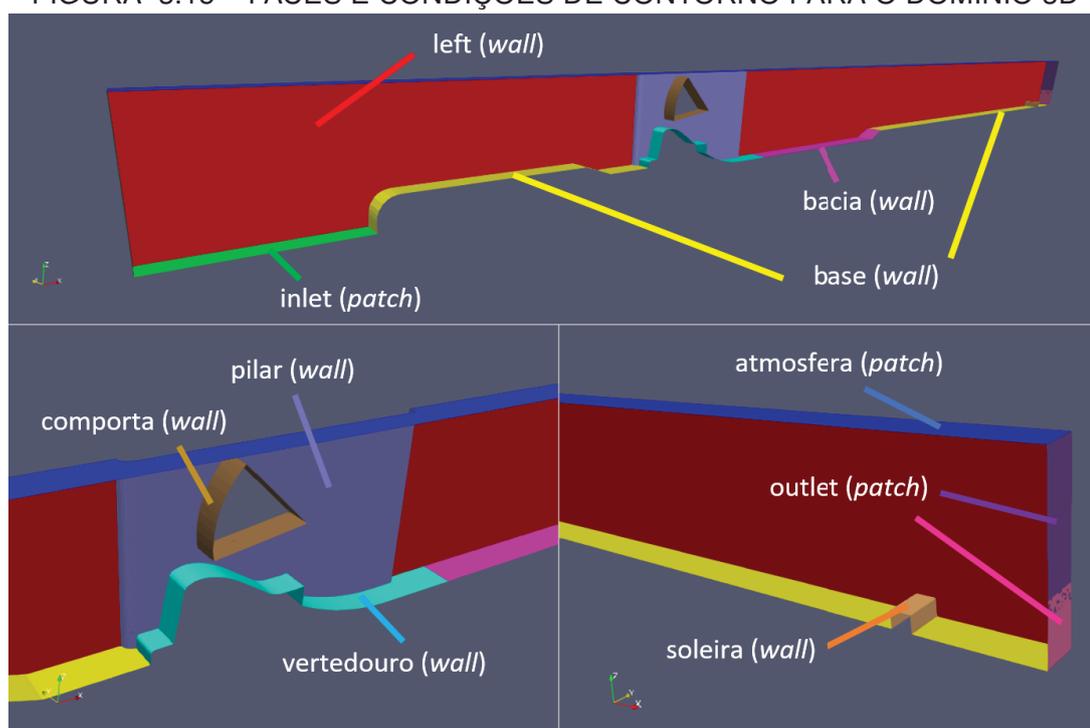
As malhas produzidas apresentaram um máximo grau de não ortogonalidade (ângulo formado entre uma linha conectando o centroide dos dois elementos e o vetor normal a face compartilhada entre células) da ordem de 60 a 65 - intervalo de valores considerados adequados para simulação numérica. O número de elementos variou entre 350 a 550 mil. As diferenças existentes entre o número de elementos entre as malhas computacionais de modelo e protótipo foram devidas aos ajustes localizados particulares de cada geometria e configuração dos ensaios.

### C - Condições de Contorno

As condições de contorno utilizadas nas presentes simulações podem ser classificadas em três principais conjuntos: *patch*, *wall* e *symmetryPlane*. Para cada face declarada do domínio foi utilizada uma condição de contorno diferente (Figura 3.15).

Os conjuntos *patch* e *wall* necessitam de condições de contorno adicionais para seus usos. O *symmetryPlane* desconsidera as componentes dos vetores ortogonais das condições do fluxo ao plano definido e economiza no número de elementos das malhas computacional, representando somente meio vão do vertedouro (GREENSHIELDS, 2019).

FIGURA 3.15 – FACES E CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O DOMÍNIO 3D



FONTE: O Autor (2025)

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as condições de contorno utilizadas nas simulações, incluindo a caracterização dos conjuntos `patch` e `wall`. Para detalhes adicionais de cada condição de contorno, sugere-se a leitura do manual do OpenFOAM (GREENSHIELDS, 2019).

TABELA 3.1 – DETALHES DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DAS FACES - 1

Campos/Faces	<i>inlet</i>	<i>outlet</i>	<i>left</i>	<i>right</i>
<code>alpha.water</code>	<code>fixedValue</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>syPlane</code>
<code>k</code>	<code>fixedValue</code>	<code>inletOutlet</code>	<code>kqRWallFunction</code>	<code>syPlane</code>
<code>nut</code>	<code>calculated</code>	<code>calculated</code>	<code>nutkRoughWallFunction</code>	<code>syPlane</code>
<code>p_rgh</code>	<code>fixedFluxPressure</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>fixedFluxPressure</code>	<code>syPlane</code>
<code>U</code>	<code>flowRateInletVelocity</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>noSlip</code>	<code>syPlane</code>
<code>omega</code>	<code>fixedValue</code>	<code>inletOutlet</code>	<code>omegaWallFunction</code>	<code>syPlane</code>

FONTE: O Autor (2025)

TABELA 3.2 – CONDIÇÕES DE CONTORNO DAS FACES DO DOMÍNIO - 2

Campos/Faces	<i>atmosfera</i>	<i>vertedouro/comporta/pilar</i>	<i>bacia/soleira</i>
<code>alpha.water</code>	<code>inletOutlet</code>	<code>zeroGradient</code>	<code>zeroGradient</code>
<code>k</code>	<code>inletOutlet</code>	<code>kqRWallFunction</code>	<code>kqRWallFunction</code>
<code>nut</code>	<code>calculated</code>	<code>nutkRoughWallFunction</code>	<code>nutkRoughWallFunction</code>
<code>p_rgh</code>	<code>totalPressure</code>	<code>fixedFluxPressure</code>	<code>fixedFluxPressure</code>
<code>U</code>	<code>pressureInletOutletVelocity</code>	<code>noSlip</code>	<code>noSlip</code>
<code>omega</code>	<code>inletOutlet</code>	<code>omegaWallFunction</code>	<code>omegaWallFunction</code>

FONTE: O Autor (2025)

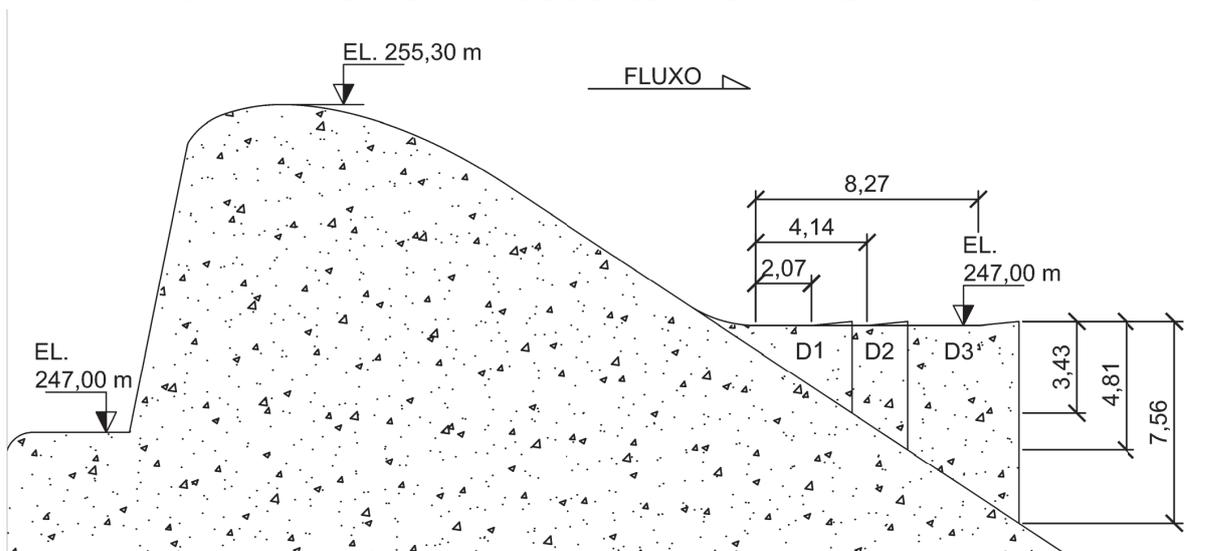
onde:

- `alpha.water` : indicador de fase: 0 para ar e 1 para água;
- `k` : energia cinética turbulenta por unidade de massa;
- `nut` : viscosidade turbulenta;
- `p_rgh` : pressão relativa;
- `omega` : taxa de dissipação turbulenta específica (modelos  $k-\omega$ ).

### 3.3.3 Configurações Hidráulicas e Geométricas

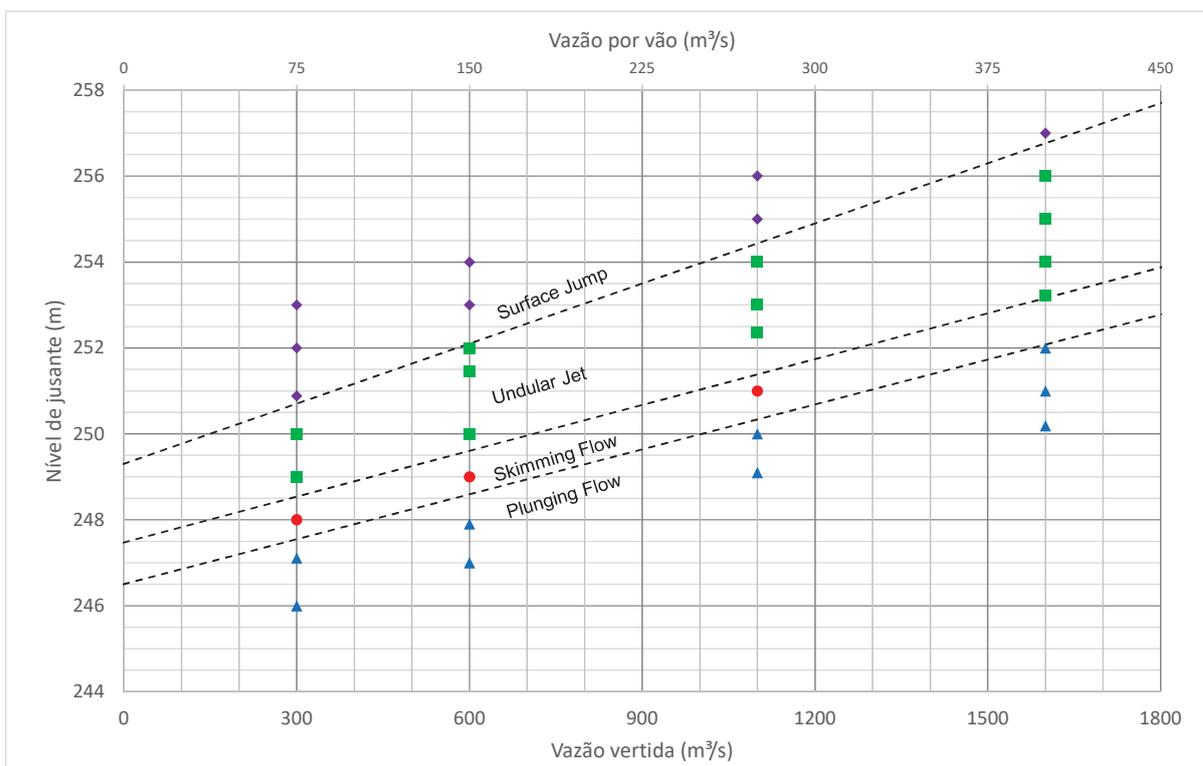
Para a avaliação do efeito do comprimento de defletores na curva de performance, serão avaliados três comprimentos: o comprimento original (D2), utilizado na UHE Colider, o segundo com a metade dessa medida (D1) e o terceiro, com o dobro do comprimento original (D3) — ilustrados na Figura 3.16. Foram consideradas duas vazões mais recorrentes como configurações hidráulicas e que foram estudadas em modelo físico. Para cada vazão foi adotada três níveis de água de jusante, os quais ou foram estudados em modelo físico, ou que se aproximam de regiões bem definidas em relação a classificação do regimes de escoamento apresentado por Ovelar, Dettmer e Takenobu (2022) (Figura 3.17). As aberturas líquidas da comporta segmento seguiram os valores obtidos no modelo físico.

FIGURA 3.16 – GEOMETRIAS DE DEFLETORES HORIZONTAIS AVALIADAS



FONTE: O Autor (2024)

FIGURA 3.17 – CURVAS DE PERFORMANCE ESTUDADAS EM MODELO FÍSICO (D2)



FONTE: Ovelar, Dettmer e Takenobu (2022)

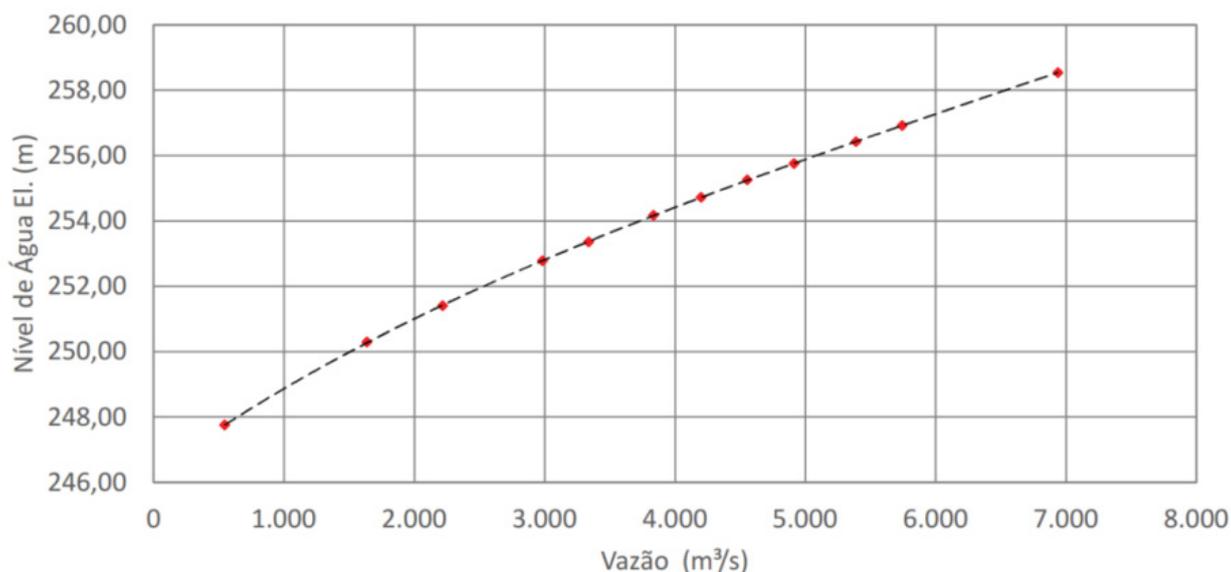
As informações utilizadas para imposição das condições de contorno no modelo físico (escala 1:15) foram baseadas na curva-chave apresentada na Tabela 3.3, a qual relaciona diferentes tempos de retorno com as respectivas vazões e níveis d'água de jusante (N.A.J.), ilustrado na Figura 3.18. Salienta-se também que a operação das (3) casas de força foi representada pela elevação do nível de água a jusante do vertedouro, sendo que para cada unidade adicionava-se 546 m<sup>3</sup>/s a vazão vertida para o cálculo do nível de água de jusante imposto.

TABELA 3.3 – Valores da curva chave imposta no modelo físico - escala 1:15

Operação	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	N.A.J (m)
1 unidade	546	247,75
3 unidades	1.637	250,29
TR 2 anos	2.215	251,40
TR 5 anos	2.982	252,78
TR 10 anos	3.338	253,36
TR 25 anos	3.834	254,17
TR 50 anos	4.199	254,72
TR 100 anos	4.554	255,25
TR 200 anos	4.912	255,75
TR 500 anos	5.389	256,42
TR 1.000 anos	5.743	256,92

FONTE: Dettmer (2022)

FIGURA 3.18 – CURVA CHAVE IMPOSTA NO MODELO FÍSICO - ESCALA 1:15



FONTE: Ovelar, Dettmer e Takenobu (2022)

As simulações com vazões maiores foram feitas somente com os tempos de recorrência de 100 (4.554 m<sup>3</sup>/s) e 1.000 anos (5.389 m<sup>3</sup>/s). Salienta-se que essas configurações não foram avaliadas neste modelo físico, devido às vazões experimentais

serem elevadas, da ordem de 1,5 m<sup>3</sup>/s (em modelo). Os valores de abertura líquida da comporta (G0) foram determinadas computacionalmente para resultar próximo à elevação 272,00 m no reservatório. Para essas vazões, foi escolhida somente o nível de água de jusante de acordo com o valor da curva chave do empreendimento. Neste cenário, somente a configuração de defletor D3, além do vertedouro sem defletor foram avaliadas.

A Tabela 3.4 apresenta as configurações hidráulicas e geométricas das 18 simulações previstas com vazões mais recorrentes (6 simulações/estrutura), e a Tabela 3.5, as outras 4 simulações para avaliação das vazões maiores (2 simulações/estrutura). Ao todo, foram realizadas 22 simulações (Tabela 3.6), além dos testes preliminares para definir a abertura da comporta para as maiores vazões. A escolha das vazões de 300 e 1.600 m<sup>3</sup>/s foi realizada com base no tempo disponível e na maior diferença de vazão para comparação de resultados.

TABELA 3.4 – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS PARA CADA DEFLETOR

Vazão (m <sup>3</sup> /s)	N.A.J. (m)	G0 (m)
300	247,11	0,473
	250,00	
	250,88	
1.600	251,00	2,749
	254,00	
	257,00	

FONTE: O Autor (2025)

TABELA 3.5 – SIMULAÇÕES SEM DEFLETOR E DEFLETOR D3 - T.R. 100 E 1.000 ANOS

Vazão (m <sup>3</sup> /s)	T.R. (anos)	N.A.J. (m)	G0 (m)
4.554	100	255,25	8,568
5.743	1.000	256,92	10,277/10,577

FONTE: O Autor (2025)

A nomenclatura dos testes foi dividida em dois grupos. O primeiro grupo, com somente números, tem o primeiro algarismo indicando a estrutura do defletor e o segundo, a configuração hidráulica. O segundo grupo, a primeira letra indica a presença ou não do defletor e o número, a condição hidráulica. O objetivo é facilitar a comparação de resultados apresentados no capítulo seguinte (listados na Tabela 3.6).

Os testes preliminares com as vazões de T.R. 100 e 1.000 anos foram realizados com uma malha tridimensional com refinamento somente na abertura e na região do reservatório, para reduzir o custo computacional. Foram utilizados dados de outras configurações hidráulicas em modelo físico para estimar de maneira mais precisa a abertura a ser usada para essas vazões (relação linear da vazão x G0 com nível de água no reservatório na EL. 272,00 m - Figuras 3.19 e 3.20). A equação utilizada para avaliar o desempenho hidráulico está apresentada a seguir:

$$Q = C_d \cdot B \cdot G_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_e} \quad (3.1)$$

onde:

$C_d$  : coeficiente de descarga;

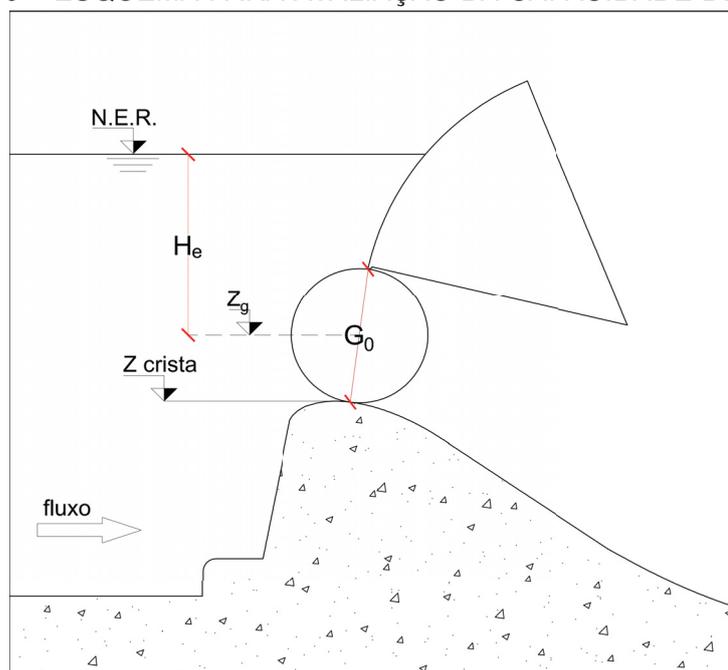
$G_0$  : abertura líquida da comporta;

$Z_g$  : cota do centro da abertura  $G_0$ ;

$N.E.R.$  : nível de energia no reservatório;

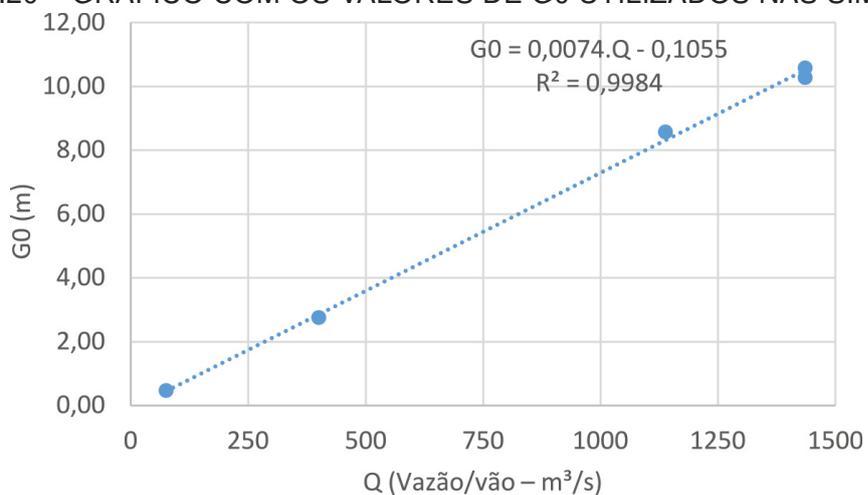
$H_e$  : carga hidráulica da cota do centro do  $G_0$  até a linha de energia.

FIGURA 3.19 – ESQUEMA PARA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE DESCARGA



FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 3.20 – GRÁFICO COM OS VALORES DE  $G_0$  UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES



FONTE: O Autor (2025)

Como observado na Tabela 3.5, os primeiros resultados preliminares indicaram uma mesma abertura para a vazão de T.R. 100 anos ( $Q = 4.554 \text{ m}^3/\text{s}$ ) sem defletor e com o Defletor D3 de 8,568 m. Contudo, para a vazão com tempo de recorrência milenar ( $Q = 5.743 \text{ m}^3/\text{s}$ ), com a estrutura do defletor D3, foi necessário uma abertura de 0,30 m maior (10,577 m). Ou seja, preliminarmente, foi possível observar que houve uma perda do coeficiente de descarga ( $C_d$ ) para a vazão mais elevada comparado com o vertedouro sem a estrutura do defletor. Detalhes serão apresentados no próximo capítulo.

TABELA 3.6 – RESUMO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS REALIZADAS

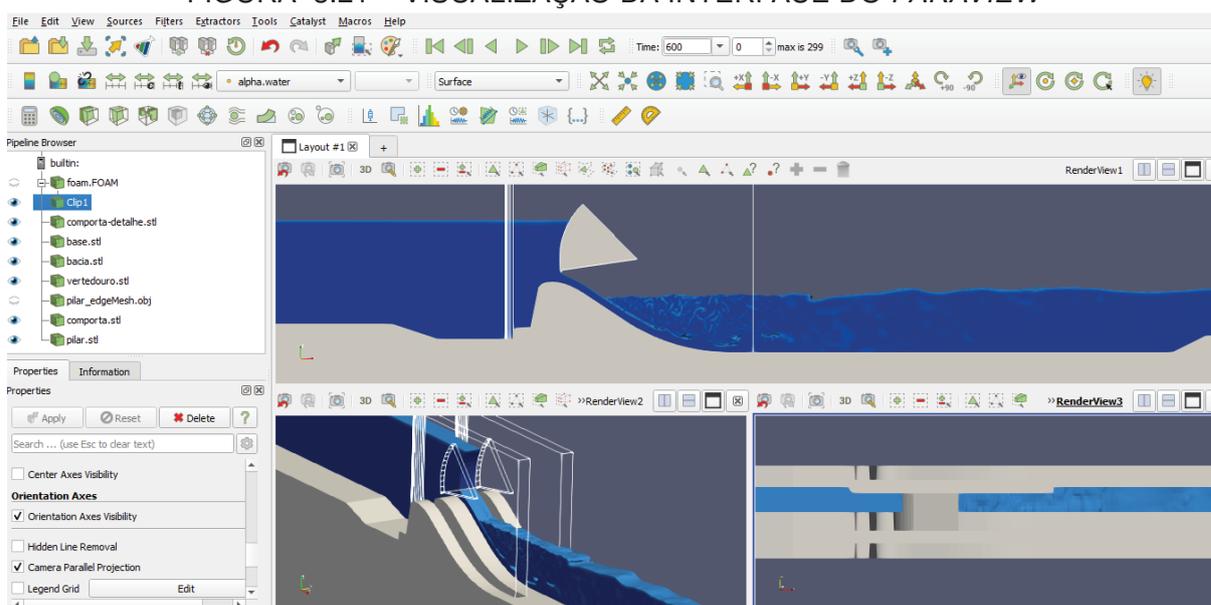
Teste	Defletor	Q total( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Q/vão	N.A.J. (m)
1.1	D1	300	75	247,11
1.2	D1	300	75	250,00
1.3	D1	300	75	252,00
1.4	D1	1.600	400	251,00
1.5	D1	1.600	400	254,00
1.6	D1	1.600	400	257,00
2.1	D2	300	75	247,11
2.2	D2	300	75	250,00
2.3	D2	300	75	252,00
2.4	D2	1.600	400	251,00
2.5	D2	1.600	400	254,00
2.6	D2	1.600	400	257,00
3.1	D3	300	75	247,11
3.2	D3	300	75	250,00
3.3	D3	300	75	252,00
3.4	D3	1.600	400	251,00
3.5	D3	1.600	400	254,00
3.6	D3	1.600	400	257,00
A1	D3	4.554	1.140	255,25
A2	D3	5.743	1.435	256,92
B1	s/ defletor	4.554	1.140	255,25
B2	s/ defletor	5.743	1.435	256,92

FONTE: O Autor (2025)

### 3.3.4 Método para Avaliação dos Resultados

Após o término de cada teste computacional, foram avaliados na etapa de pós-processamento os resultados com o objetivo de verificar a acurácia dos dados.

O pós-processamento pode ser feito de dois modos: a partir de funções pré-existentes no OpenFOAM, definidas no dicionário `controlDict`; ou através do *software paraView* (versão 5.6), que permite a visualização do escoamento e do domínio (Figura 3.21). O *paraView* também disponibiliza ferramentas práticas para a coleta de dados, como níveis d'água, pressões, velocidades, e outros dentro do domínio.

FIGURA 3.21 – VISUALIZAÇÃO DA INTERFACE DO *PARAVIEW*

FONTE: O Autor (2025)

Os principais parâmetros analisados para verificação das condições hidráulicas dos testes computacionais foram a continuidade, perfis de linha d'água, velocidades e a linha piezométrica - quando necessário, para verificação extra.

Durante a execução das simulações com o *interFoam*, foram gerados arquivos contendo informações das vazões de entrada e saída do domínio junto ao tempo de simulação, utilizando funções pré-existentes no *controlDict*. Dessa forma, foi possível estabelecer comparativos entre as duas vazões ao longo do tempo para verificar a equação da continuidade, dado a adoção do regime permanente para as simulações.

A condição de contorno na entrada do domínio, *flowRateInletVelocity*, garante uma vazão fixa ao longo do tempo, enquanto a vazão de saída se ajustou considerando o uso de uma soleira espessa com comprimento e altura estimadas. A estabilização aconteceu quando há pequenas oscilações na vazão de saída em relação a vazão de entrada, não superiores a 2,0% — condição semelhante aos limites dos medidores de vazão no modelo físico reduzido.

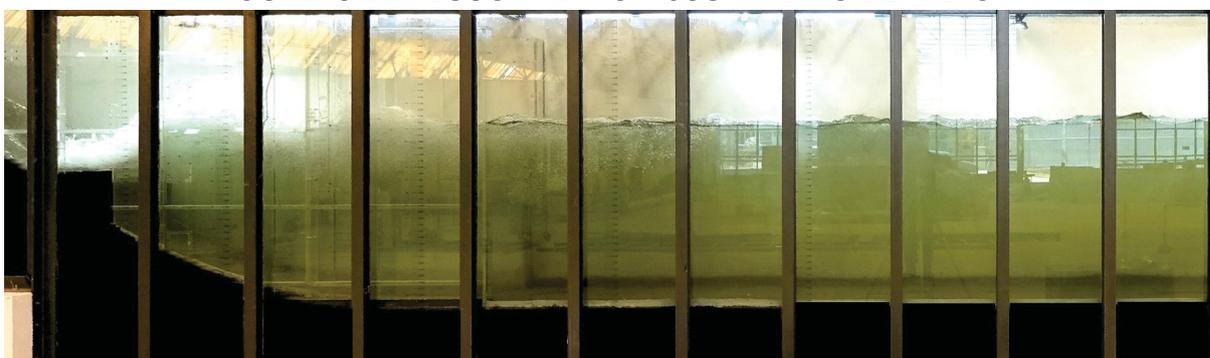
Os perfis médios de linha d'água e as linhas piezométrica foram pós-processados no *software paraView*. A comparação com os dados apresentados adotou como padrão o valor de  $\alpha.\text{water} = 0,5$  para determinação da superfície livre do escoamento – valor adotado também por Witt (2014). A amostragem utilizada foi de 60 s para obtenção dos campos médios.

### 3.3.5 Condição de Verificação

Além das configurações hidráulicas já apresentadas, foi definida uma condição de verificação adicional utilizada somente para verificar a similaridade do modelo computacional com o modelo físico reduzido. A vazão simulada foi de  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $75 \text{ m}^3/\text{s}/\text{vão}$ ) com nível de água de jusante na elevação  $250,88 \text{ m}$  e que resultou no regime de escoamento *Surface Jump*.

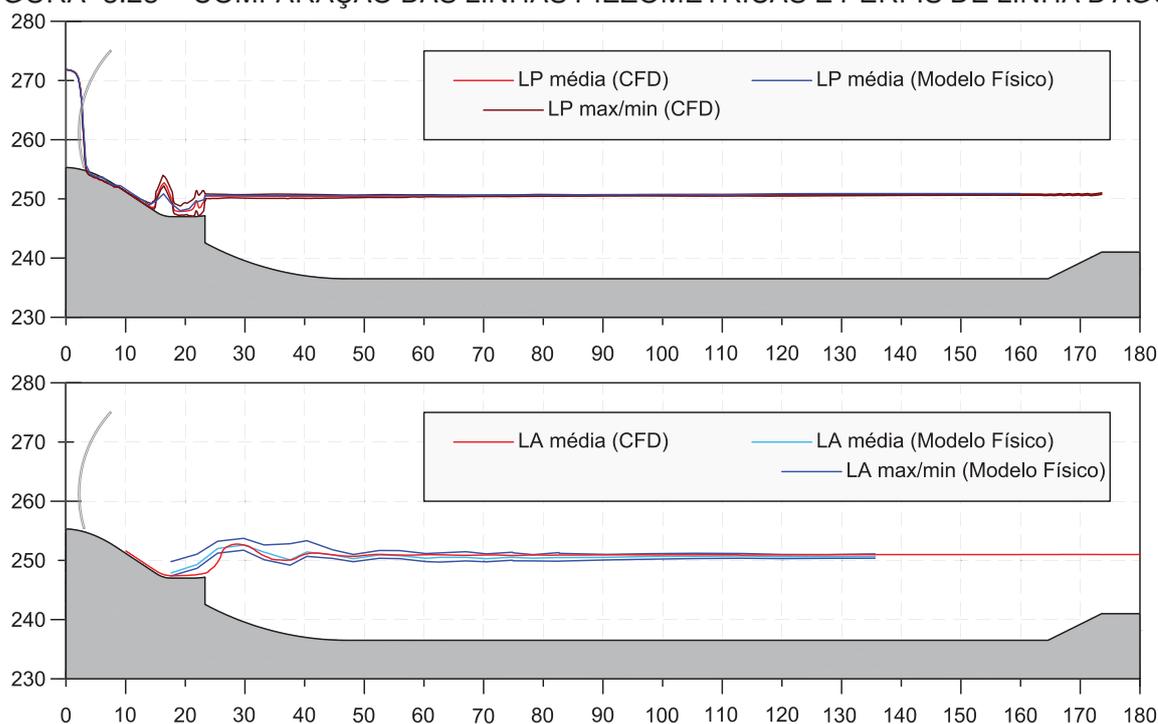
A escolha dessa configuração hidráulica foi baseada na disponibilidade de informações e pela menor presença de bolhas no escoamento a jusante. A Figura 3.22 ilustra a configuração hidráulica no modelo reduzido e as Figuras 3.23 e 3.24 apresentam os resultados obtidos no modelo físico comparado com o modelo computacional.

FIGURA 3.22 – ESCOAMENTO A JUSANTE DO DEFLETOR



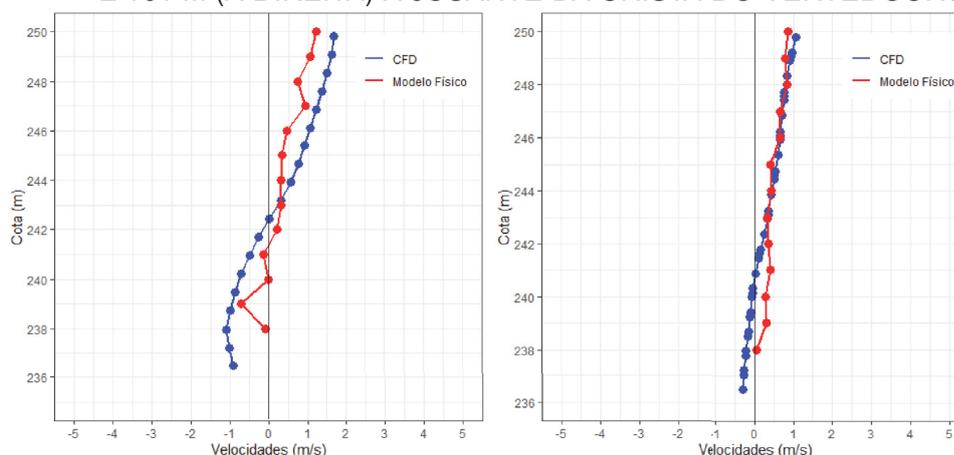
FONTE: Dettmer (2022)

FIGURA 3.23 – COMPARAÇÃO DAS LINHAS PIEZOMÉTRICAS E PERFIS DE LINHA D'ÁGUA



FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 3.24 – CONFRONTO DE VELOCIDADES NAS POSIÇÕES X = 120 M (A ESQUERDA) E 161 M (A DIREITA) A JUSANTE DA CRISTA DO VERTEDOURO



FONTE: O Autor (2025)

### 3.3.6 Configuração de Hardware

Os *hardwares* utilizados para as simulações computacionais no *solver* *interFoam* estão apresentados resumidamente na Tabela 3.7.

TABELA 3.7 – SETUP E CONFIGURAÇÃO DOS HARDWARES UTILIZADOS

Setup	n° cores	Frequência/core	Função
1	6	3,7 GHz	Elaboração de malhas e pós-processamento
2	6	3,4 GHz	Processamento de simulações rápidas
3	64	2,35 GHz	Processamento das simulações principais

FONTE: O Autor (2025)

Os *setup's* 1 e 2 são máquinas de uso cotidiano e corporativo (ambas intel i7) utilizadas para o pós-processamento das simulações, bem como na elaboração do modelo computacional (malha e condições de contorno). Os *setup's* 3 é um *cluster* (AMD EPYC 7452), em que o poder de processamento é maior quando uma tarefa é paralelizada, no caso, as simulações computacionais.

A ordem de grandeza de uma simulação é de *gigabytes* e varia de acordo com o tamanho e as dimensões da malha computacional adotada. Além disso, o intervalo de tempo no qual foram armazenadas as informações dos campos escalares e vetoriais são relevantes para definição. O tempo para cada simulação variou de 2 a 5 dias.

A disponibilidade de memória de acesso aleatório (*RAM*) é pouco demandada, somente no processo de construção de malha. O *setup* 1, por exemplo, onde prevê-se a elaboração das malhas possui 64 GB de *RAM*. Salienta-se também que não é demandado o uso pesado da *GPU* (unidade de processamento gráfico) durante as simulações, exceto para a visualização de resultados. Desse modo, somente os *setup's* 1 e 2 possuem placas de vídeo de dedicação exclusiva.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos, divididos em dois itens. O primeiro possui foco em caracterizar os regimes de escoamento para as vazões de maior frequência e a suas diferenças devido ao comprimento dos defletores estudados. A segunda parte, avalia-se o desempenho hidráulico do uso de defletores em diferentes condições de vazão mais elevada. Neste capítulo, também, apresentam-se as principais análises e comentários ao longo da descrição dos resultados.

### 4.1 EFEITO DO COMPRIMENTO DE DEFLETORES (D1, D2 E D3)

Este item apresenta a caracterização hidráulica das simulações realizadas, com ênfase nos perfis longitudinais da linha d'água e da linha piezométrica média, comparando os efeitos das três configurações de defletores. Devido à quantidade de resultados de velocidades, somente parte das velocidades médias das simulações são apresentadas neste item. As demais estão localizadas no APÊNDICE.

#### 4.1.1 Vazão de 300 m<sup>3</sup>/s

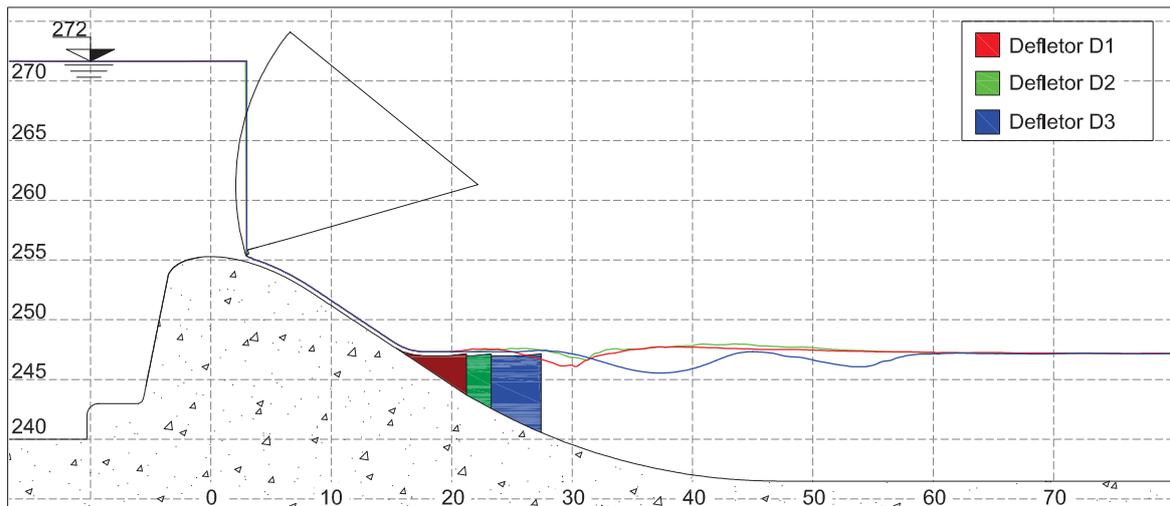
Para uma vazão de 300 m<sup>3</sup>/s, 75 m<sup>3</sup>/s/vão, e nível de água de jusante na elevação 247,11 m, os perfis de linha d'água (Figura 4.1) mostraram comportamentos semelhantes até a posição  $x = 20$  m, independentemente do comprimento dos defletores. Contudo, a posição de mergulho do jato variou conforme o comprimento do defletor: D1, D2 e D3, resultando em valores de 8,98 m, 8,10 m e 10,40 m, respectivamente. Observou-se também que o defletor mais longo gerou uma linha d'água mais ondulada em comparação às demais configurações na região da bacia de dissipação. Após a posição  $x = 60$  m, os perfis tornaram-se novamente semelhantes.

No caso da linha piezométrica (Figura 4.2), as pressões na contracurva dos defletores ( $x = 16$  m) foram praticamente idênticas, na ordem de 3 m.c.a. Um segundo pico de pressão foi detectado no término dos defletores, atingindo cerca de 2,25 m.c.a, devido à breve elevação no término da estrutura. Como já identificado no perfil da linha d'água, o aumento do comprimento do defletor resultou em uma maior distância de mergulho do jato.

Desse modo, partindo do observado também na Figuras A.1, A.2 e A.3 para a mesma configuração hidráulica, o escoamento foi classificado como regime *plunging flow*, mesmo sabendo que o jato não mergulha diretamente na bacia de dissipação até o seu fundo.

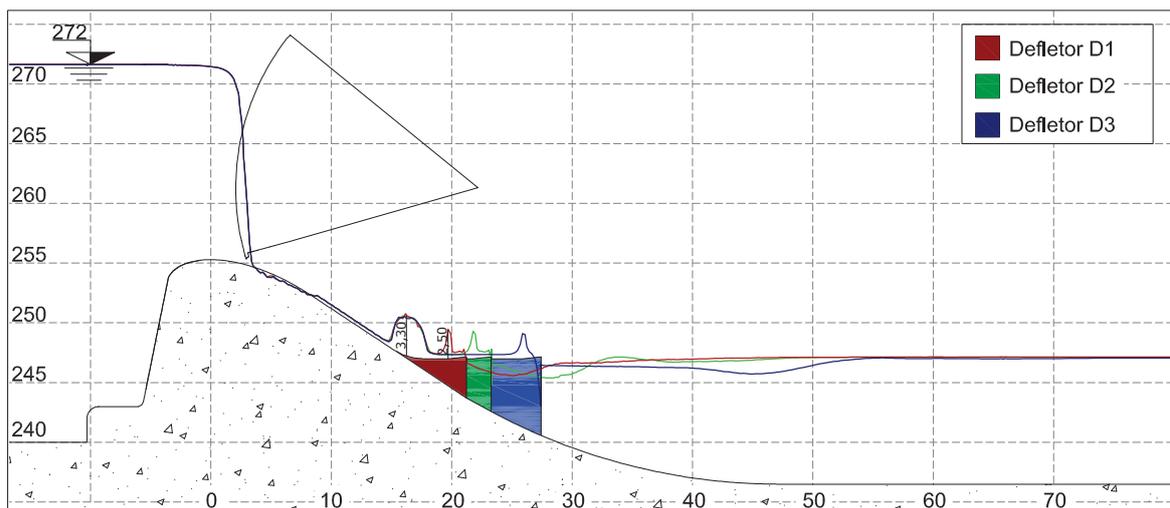
Salienta-se que a condição também foi estudada em modelo físico (DETTMER, 2020), onde foi observada uma intermitência do descolamento do escoamento após o defletor, com predominância do salto do jato (Figura 4.3). Nas simulações, todos os escoamentos predominantemente não descolaram após a passagem pelo defletor. Como essa condição depende da entrada e disponibilidade de ar, foi considerado uma limitação na representação modelo computacional em relação ao modelo físico.

FIGURA 4.1 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 247,11 m



FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.2 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 247,11 m



FONTE: O Autor (2025)

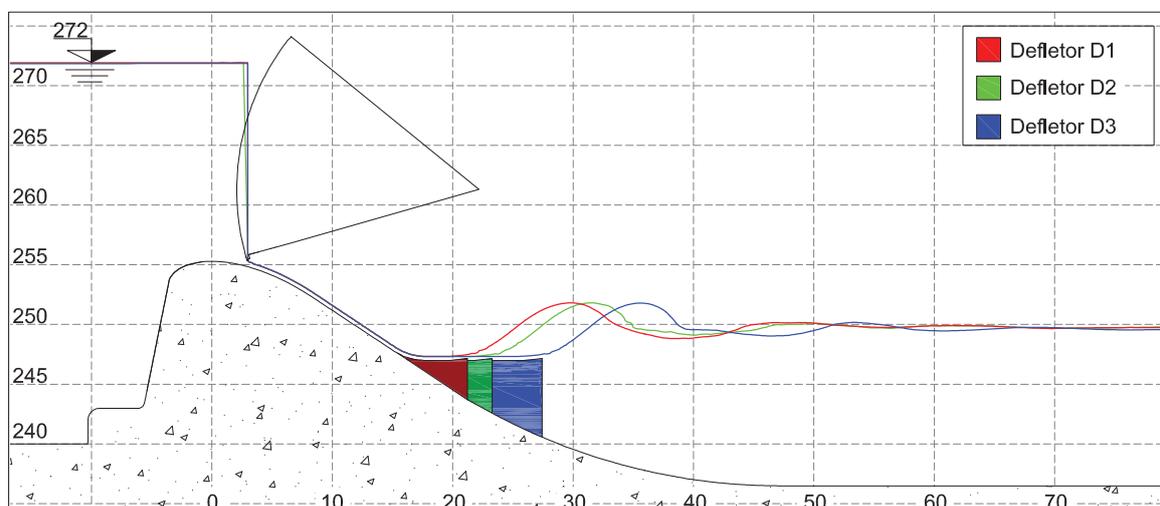
FIGURA 4.3 – MODELO FÍSICO -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 247,11 m

FONTE: Dettmer (2020)

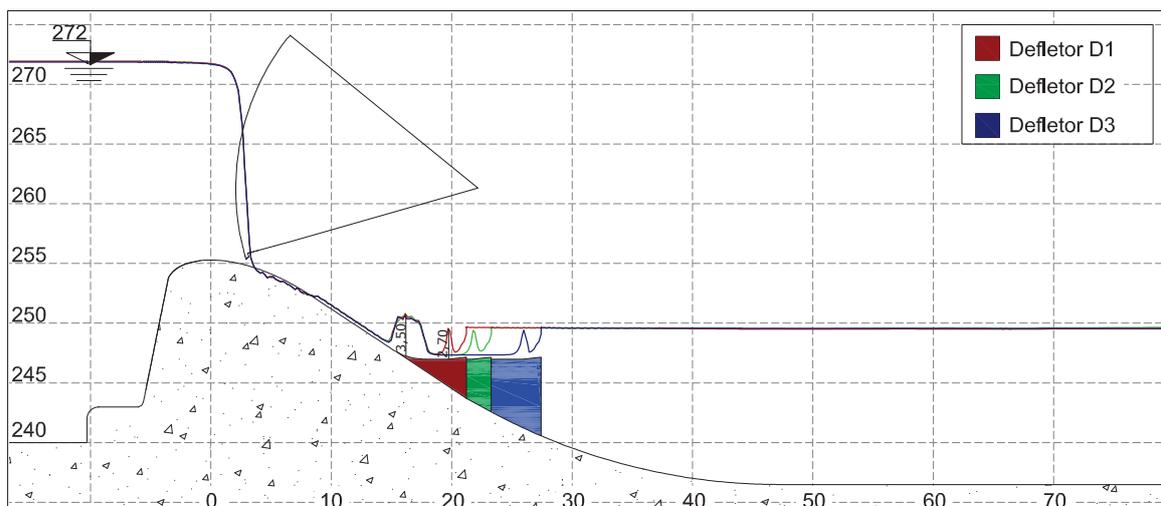
Quando o nível de jusante foi elevado para 250,00 m, os perfis de linha d'água também permaneceram semelhantes até  $x = 20 \text{ m}$  (Figura 4.4). A sobre-elevação atingiu a cota de 251,80 m para todas as configurações, com diferenças nos espaçamentos entre os picos, próximo às diferenças de comprimento dos defletores horizontais (2,2 m e 4,1 m para D1 e D3, respectivamente, em relação ao D2). Após  $x = 60 \text{ m}$ , os perfis voltaram a ser coincidentes.

Na linha piezométrica para esta configuração, o pico inicial na contracurva dos defletores foi de 3,2 m.c.a, sem variações significativas entre os comprimentos. E, no término dos defletores, foi observada uma sobre-elevação de pressão da ordem de 2,5 m.c.a. Após esse ponto, as linhas piezométricas apresentaram comportamentos semelhantes até o fim do modelo (Figura 4.5).

Semelhante à configuração anterior, não houve diferenças significativas na classificação do regime de escoamento como *undular jet* (Figuras A.4, A.5 e A.6).

FIGURA 4.4 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 250,00 m

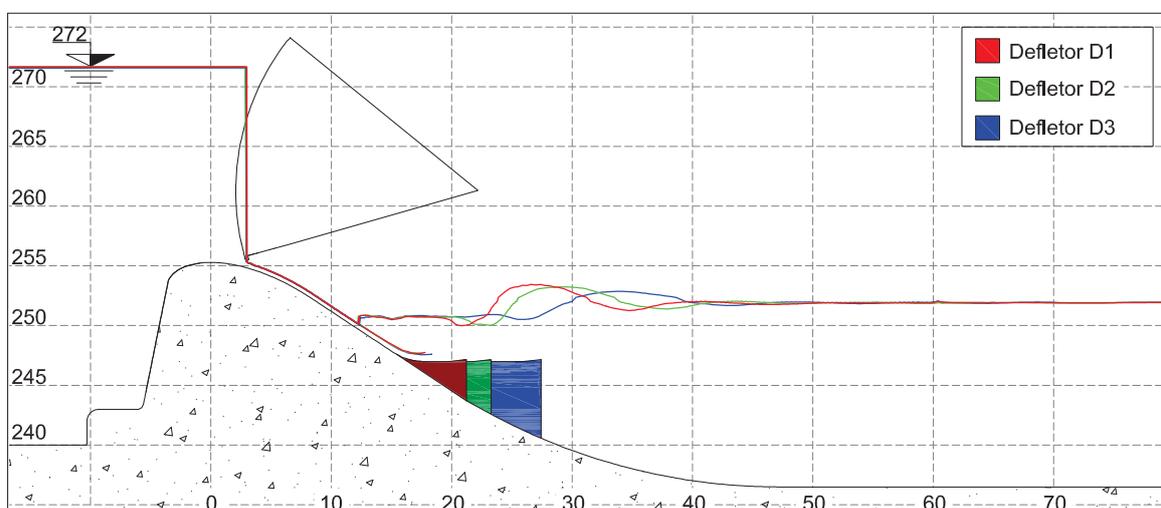
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.5 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 250,00 m

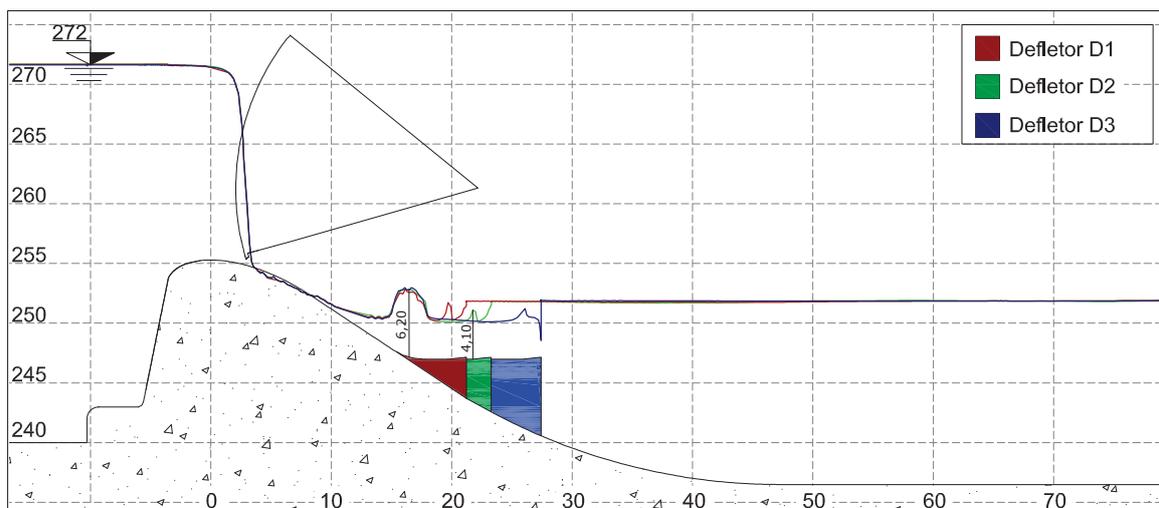
FONTE: O Autor (2025)

Para o nível de água jusante de 252,00 m, os três defletores também produziram regimes de escoamento semelhantes (*surface jump*), sem alterações significativas na linha d'água (Figuras A.7, A.8 e A.9). O comprimento do ressalto hidráulico foi maior com o defletor mais longo (30 m), enquanto D1 e D2 resultaram em valores de 22 m e 25 m, respectivamente. Foi considerado como comprimento do ressalto a distância do início do rolo até a depressão do perfil de linha d'água médio após sobre-elevação do rolo. A partir de  $x = 45 \text{ m}$ , os perfis da linha d'água voltaram a se assemelhar.

Quanto à linha piezométrica, o comportamento foi consistente com as simulações realizadas para o nível de 250,00 m, apresentando um pico de pressão de 5,0 m.c.a na contracurva e uma sobre-elevação adicional próximo ao término dos defletores, com valores máximos de 4,8 m.c.a para D1 e 4,0 m.c.a para D2 e D3.

FIGURA 4.6 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 252,00 m

FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.7 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 252,00 m

FONTE: O Autor (2025)

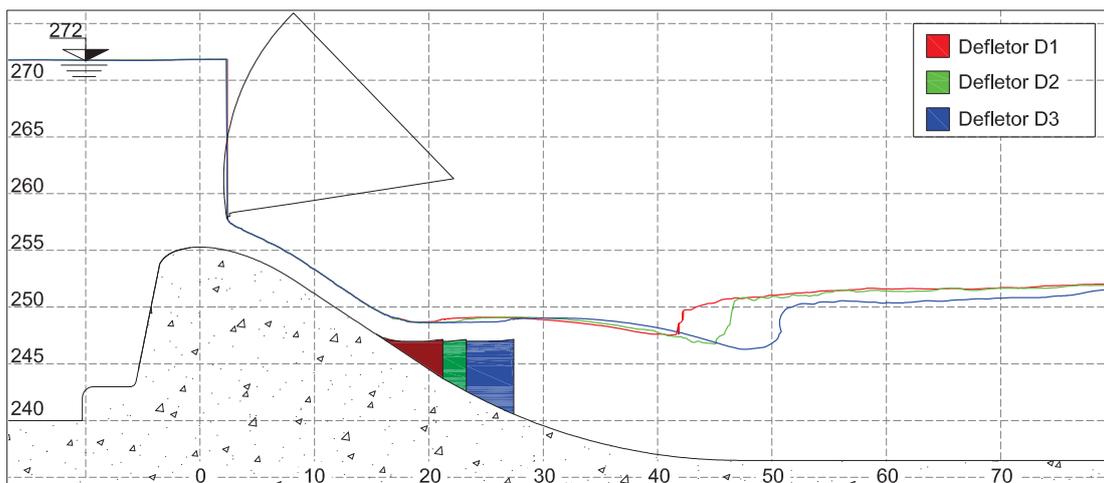
#### 4.1.2 Vazão de $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$

Para a vazão de  $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  e nível de água de jusante na elevação  $251,00 \text{ m}$ , foi identificado o regime de escoamento *plunging flow* para todas as configurações de defletores (Figuras A.10, A.11 e A.12). O aumento do comprimento do defletor resultou em uma profundidade de mergulho maior, variando de  $246,30 \text{ m}$  para o defletor D3 a  $247,60 \text{ m}$  para o defletor D1. Em relação à distância de mergulho, medidas a partir do término dos defletores, os valores foram da ordem de  $4,0 \text{ m}$ . Após a posição  $x = 80 \text{ m}$ , os perfis de linha d'água foram semelhantes entre si (Figura 4.8).

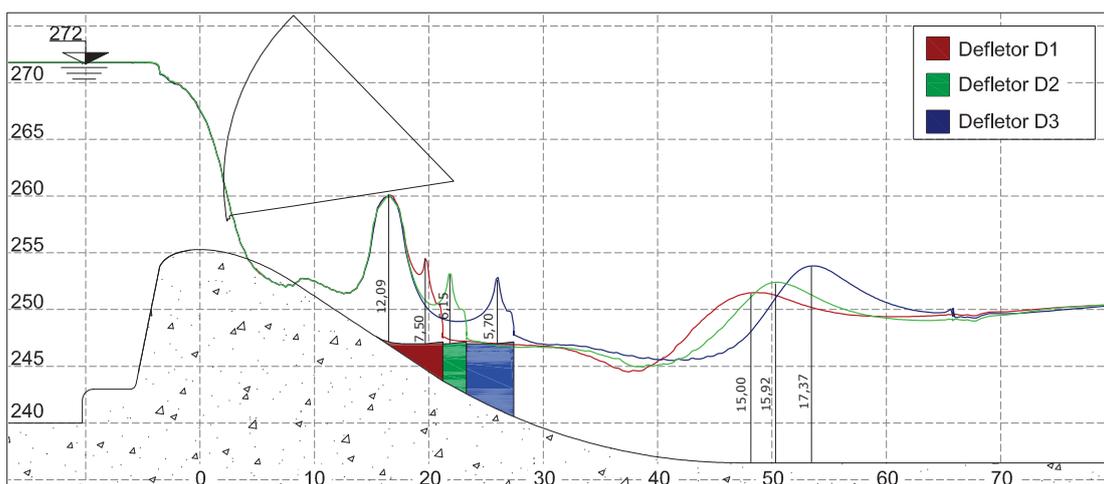
Na linha piezométrica, o aumento da vazão causou um aumento nas pressões, atingindo  $12 \text{ m.c.a}$  para todas as configurações na contracurva dos defletores (Figura 4.9). Além disso, no término dos defletores, a redução no comprimento aumentou o pico de pressão, sendo registrados  $7,3$ ,  $6,1$  e  $5,7 \text{ m.c.a}$  para os defletores D1, D2 e D3, respectivamente. O comprimento maior do defletor também influenciou as pressões de pico na bacia de dissipação, com valores de  $15$  a  $17 \text{ m.c.a}$ , a uma distância de aproximadamente  $25 \text{ m}$  do término de cada defletor (ou próximo da posição  $x = 50 \text{ m}$ ).

Quando o nível de jusante foi elevado para  $254,00 \text{ m}$ , o regime de escoamento observado foi *undular jet* (Figuras A.13, A.14 e A.15), caracterizado pela sobre-elevação do escoamento, atingindo uma cota máxima de  $254,40 \text{ m}$  na posição próxima à  $x = 50 \text{ m}$ . Não foram observadas diferenças significativas na distância da sobre-elevação a partir do término dos defletores (Figura 4.10).

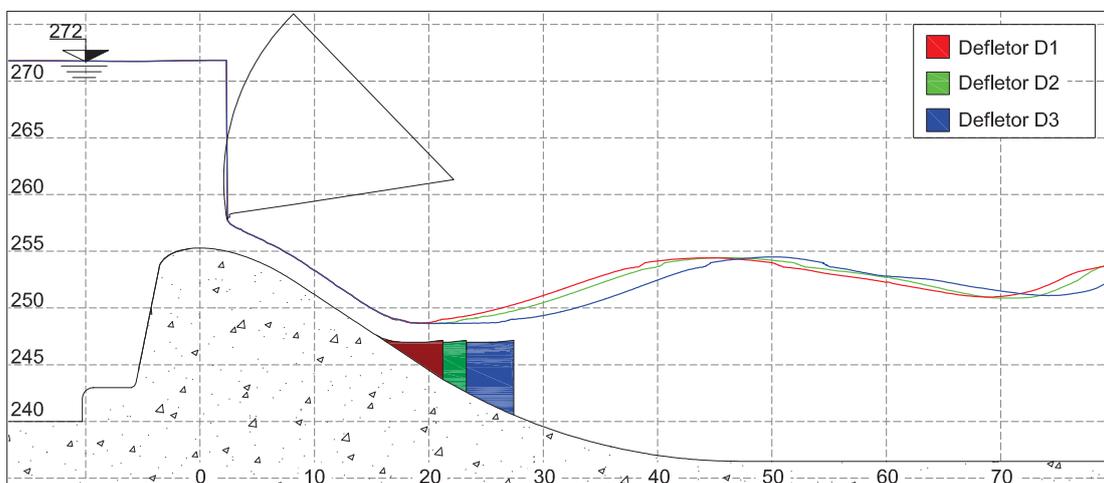
A linha piezométrica manteve o comportamento do nível de água anterior, com picos de pressão de  $13 \text{ m.c.a}$  após a contracurva do defletor para todos os defletores (Figura 4.11).

FIGURA 4.8 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - Q = 1.600 m<sup>3</sup>/s NAJ = 251,00 m

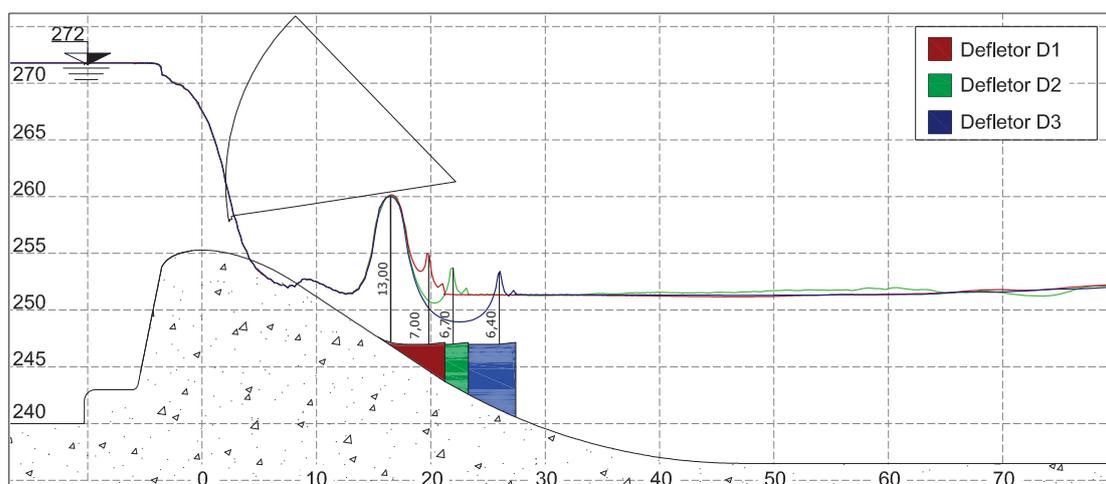
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.9 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS - Q = 1.600 m<sup>3</sup>/s NAJ = 251,00 m

FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.10 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA - Q = 1.600 m<sup>3</sup>/s NAJ = 254,00 m

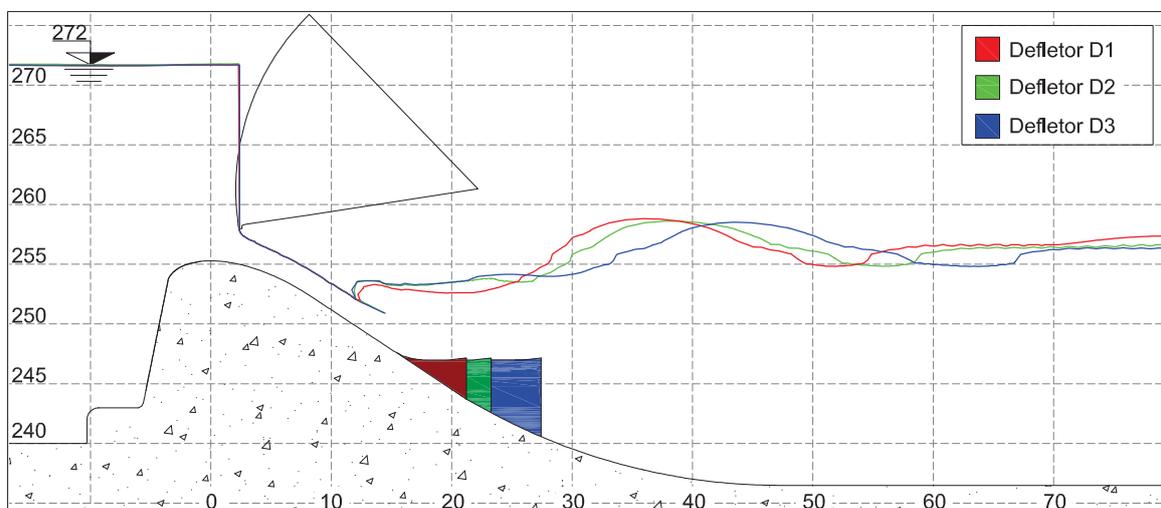
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.11 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS -  $Q = 1.600 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 254,00 m

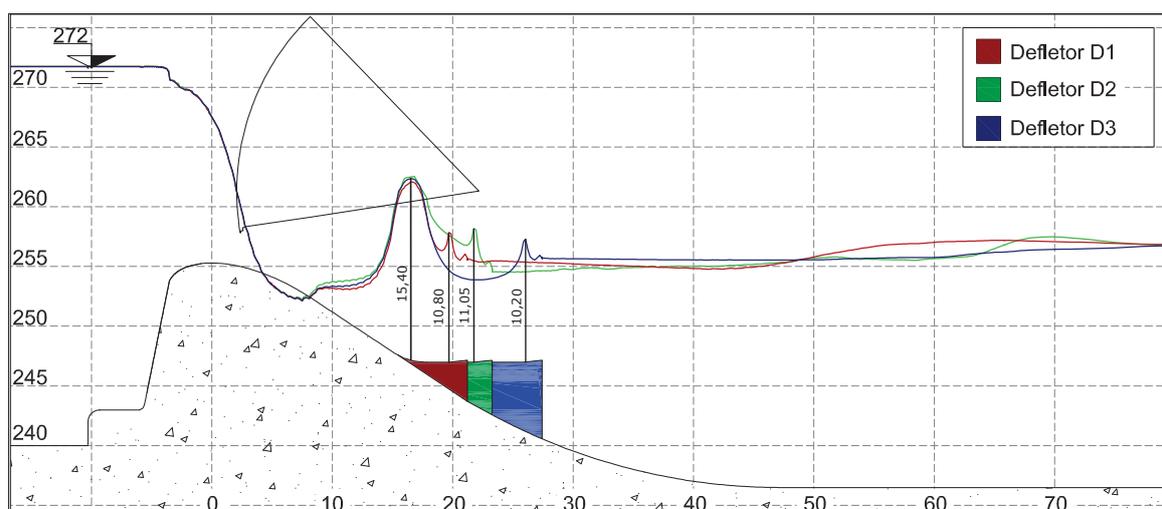
FONTE: O Autor (2025)

Com o nível de jusante elevado para 257,00 m, o regime de escoamento identificado foi *surface jump*, sem diferenças significativa entre os defletores. Considerando a definição de comprimento do ressalto hidráulico, o aumento do defletor resultou em valores maiores, sendo 50 m para D3, 43 m para D2 e 40 m para D1. A partir da posição  $x = 110 \text{ m}$  (Figura 4.12), os perfis de linha d'água voltaram a se assemelhar até o término do modelo.

Quanto à linha piezométrica, o comportamento foi similar ao observado nas configurações anteriores, com um pico de pressão na contracurva dos defletores de 15 m.c.a. No término dos defletores, registrou-se uma segunda sobre-elevação de pressão, com valores de 11,05 m.c.a (Figura 4.13) para o defletor D2 e de 10,8 e 10,2 m.c.a para os defletores D1 e D3, respectivamente.

FIGURA 4.12 – PERFIS DE LINHA D'ÁGUA -  $Q = 1.600 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 257,00 m

FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.13 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS -  $Q = 1.600 \text{ m}^3/\text{s}$  NAJ = 257,00 m

FONTE: O Autor (2025)

#### 4.1.3 Avaliação dos regimes de escoamento na curva de performance

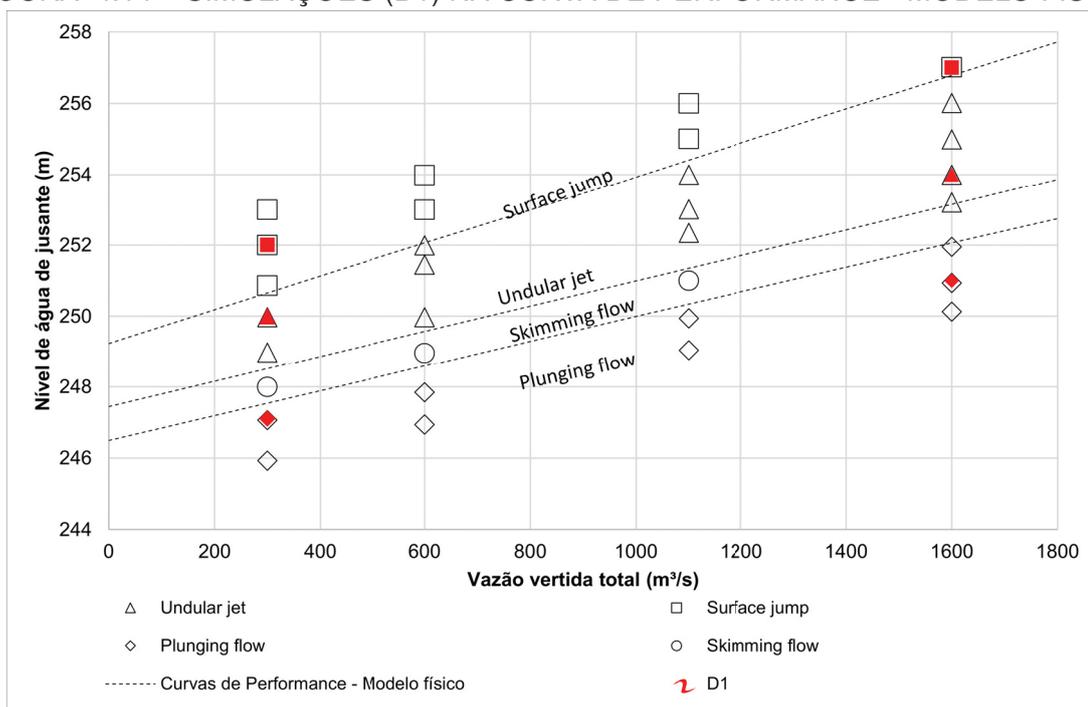
A Tabela 4.1 apresenta para todas as configurações hidráulicas avaliadas, o regime de escoamento resultante das simulações computacionais descritas nos itens anteriores. As Figuras 4.14 a 4.16 apresentam as curvas de performance do modelo físico com os dados das simulações.

TABELA 4.1 – RESUMO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES

Teste	Defletor	Q total( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Q/vão	N.A.J. (m)	Regime
1.1	D1	300	75	247,11	Plunging F.
1.2	D1	300	75	250,00	Undular J.
1.3	D1	300	75	252,00	Surface J.
1.4	D1	1.600	400	251,00	Plunging F.
1.5	D1	1.600	400	254,00	Undular J.
1.6	D1	1.600	400	257,00	Surface J.
2.1	D2	300	75	247,11	Plunging F.
2.2	D2	300	75	250,00	Undular J.
2.3	D2	300	75	252,00	Surface J.
2.4	D2	1.600	400	251,00	Plunging F.
2.5	D2	1.600	400	254,00	Undular J.
2.6	D2	1.600	400	257,00	Surface J.
3.1	D3	300	75	247,11	Plunging/Skim.
3.2	D3	300	75	250,00	Undular J.
3.3	D3	300	75	252,00	Surface J.
3.4	D3	1.600	400	251,00	Plunging F.
3.5	D3	1.600	400	254,00	Undular J.
3.6	D3	1.600	400	257,00	Surface J.

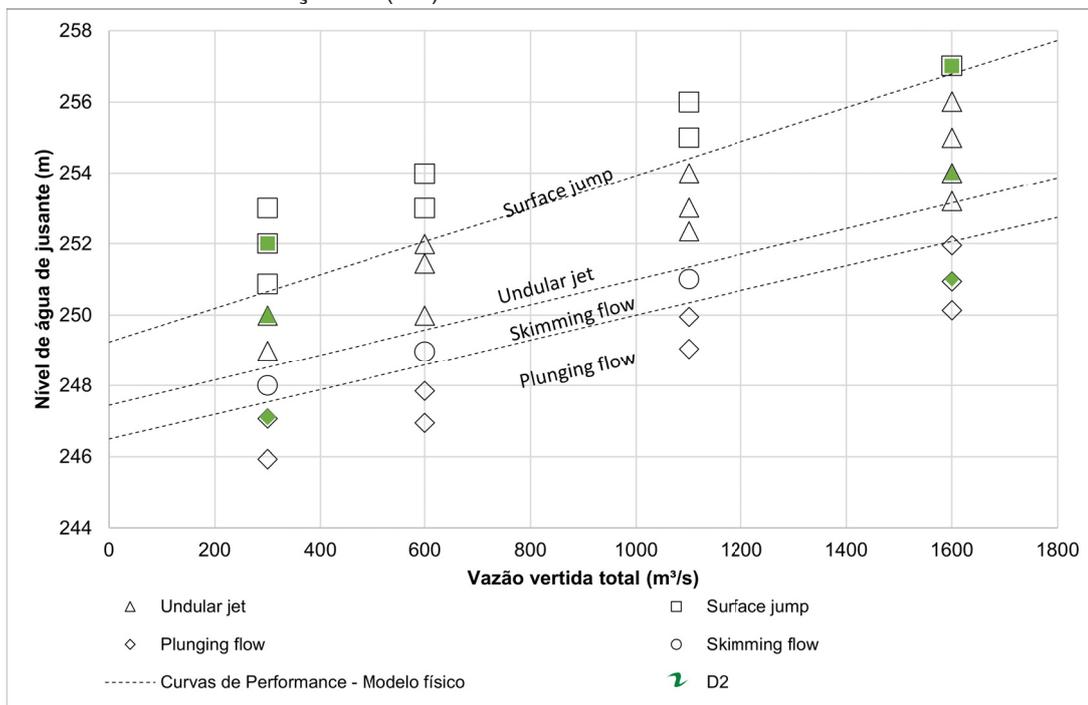
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.14 – SIMULAÇÕES (D1) NA CURVA DE PERFORMANCE - MODELO FÍSICO



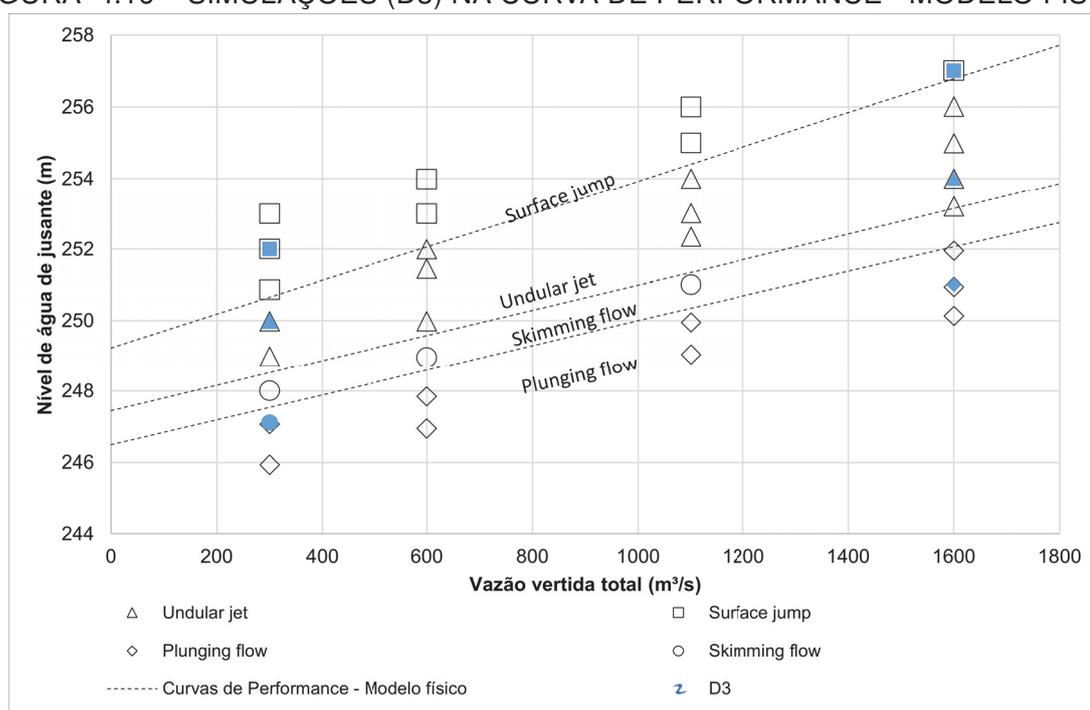
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.15 – SIMULAÇÕES (D2) NA CURVA DE PERFORMANCE - MODELO FÍSICO



FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.16 – SIMULAÇÕES (D3) NA CURVA DE PERFORMANCE - MODELO FÍSICO



FONTE: O Autor (2025)

Nota-se que com exceção do teste 3.1 ( $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  e N.A.J. = 247,11 m e defletor D3), todas as demais simulações resultaram em regimes de escoamento conforme previsto em estudos de modelo físico. A condição do teste 3.1 resultou em uma intermitência entre regimes *skimming flow* e *plunging flow*.

Desse modo, foi observado pelas simulações computacionais que o comprimento dos defletores teve impacto pouco significativo na alteração das curvas de performance dos regimes de escoamento.

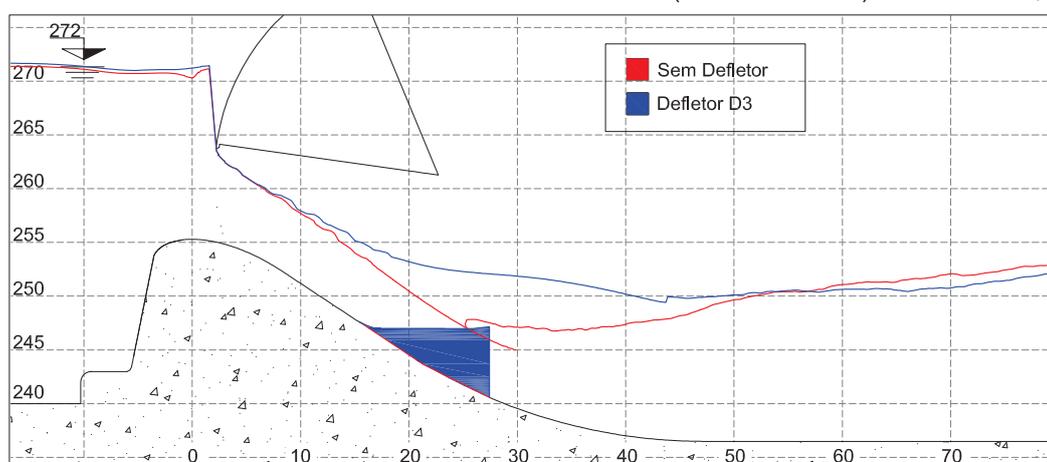
Destaca-se novamente a limitação existente do modelo computacional na representação de escoamentos multifásicos com uma fase dispersa na outra, uma vez que a aeração na face de jusante do defletor poderia ser responsável pelo descolamento do fluxo em função do grau de refinamento local dos elementos. Desse modo, o refinamento mostra-se como uma possível solução para aproximar os resultados do modelo físico e computacional.

#### 4.2 EFEITO DO DEFLETOR SOBRE O ESCOAMENTO PARA VAZÕES ELEVADAS — T.R. 100 E 1.000 ANOS

Para a vazão de T.R. 100 anos, o escoamento depois de passar pelo defletor D3 mergulhou na bacia de dissipação - *plunging flow* (Figura 4.17). Em relação às condições hidráulicas anteriores, foi identificado um rebaixamento do nível de água a montante da comporta, possivelmente causado pelo arraste de ar.

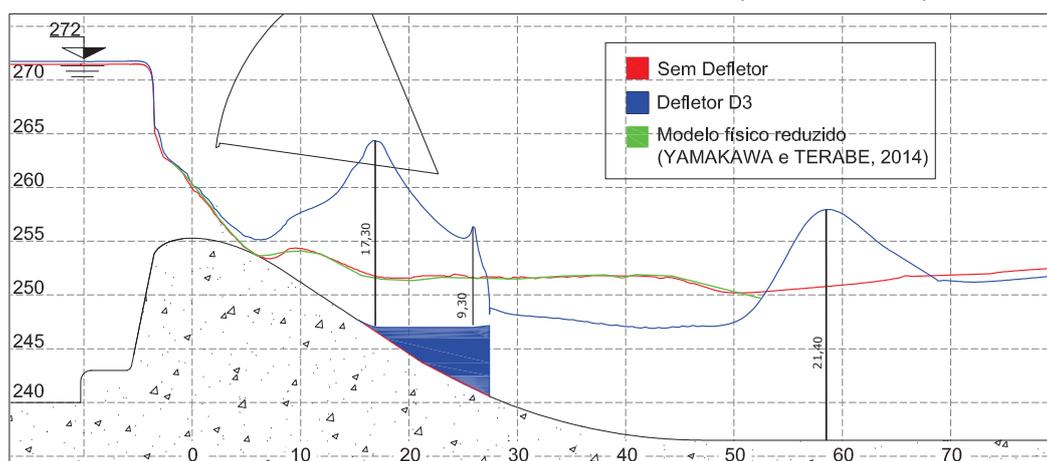
Na linha piezométrica, os resultados indicaram boa correspondência com dados obtidos em um modelo físico para a configuração sem defletor, validando os cálculos computacionais sob condições hidráulicas semelhantes (YAMAKAWA; TERABE, 2014). A pressão de pico na contracurva do defletor atingiu 17 m.c.a, com uma propagação significativa até a posição  $x = 2,0$  m, sugerindo um possível impacto na capacidade de descarga para níveis mais elevados de jusante (Figura 4.18). Na configuração com defletor, foi identificado um pico de pressão de 21 m.c.a na bacia de dissipação ( $x = 60$  m), devido ao efeito de mergulho do escoamento (*plunging flow*).

FIGURA 4.17 – LINHAS D'ÁGUA -  $Q = 4.554 \text{ m}^3/\text{s}$  (T.R. 100 anos) - NAJ = 255,25 m



FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.18 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS -  $Q = 4.554 \text{ m}^3/\text{s}$  (T.R. 100 anos) - NAJ = 255,25 m



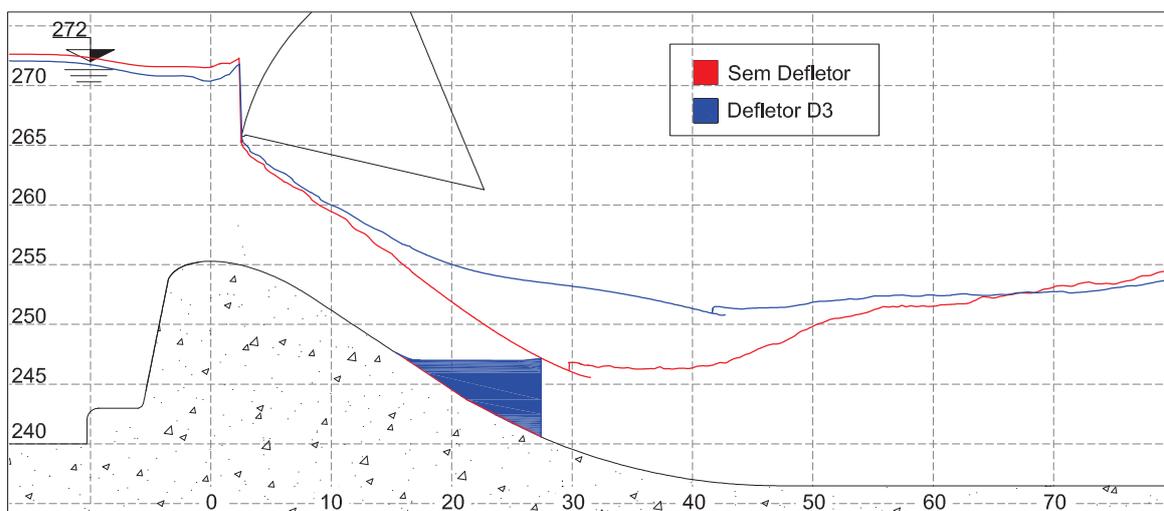
FONTE: O Autor (2025)

Para a vazão associada ao T.R. 1.000 anos ( $Q = 5.743 \text{ m}^3/\text{s}$ ), o escoamento sobre o defletor D3 também apresentou o regime *plunging flow*, mantendo o comportamento esperado pela Figura 3.17 — extrapolando os valores. Não houve diferenças significativas em relação à condição de TR 100 anos, exceto por um rebaixamento

ainda mais acentuado do nível de água próximo à comporta, devido ao aumento na intensidade do escoamento de aproximação (Figura 4.19).

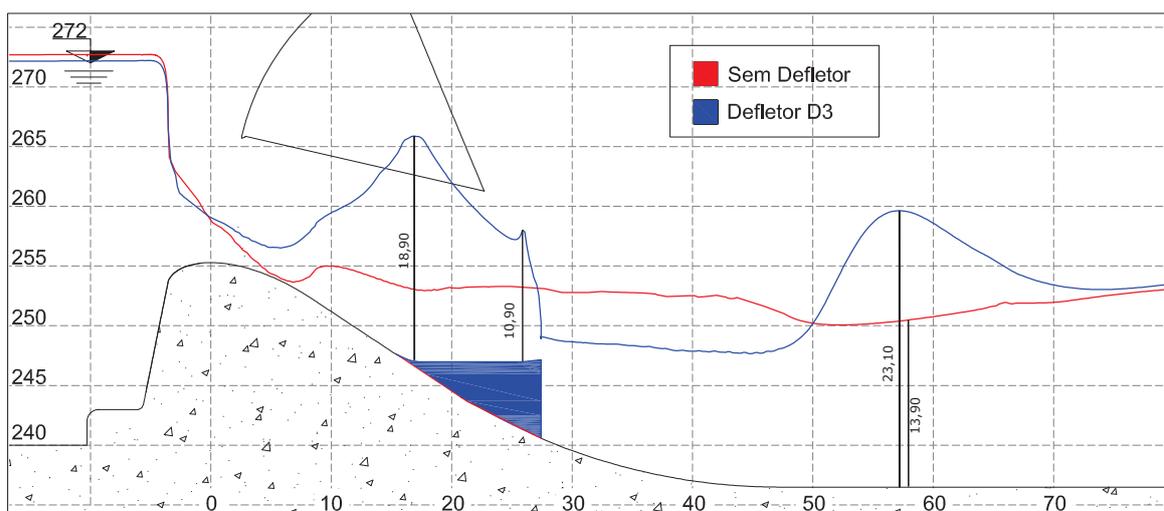
Na linha piezométrica para TR 1.000 anos, a pressão de pico na contracurva do defletor aumentou para 19 m.c.a e foi a única configuração em que a propagação do efeito alcançou a região a montante da crista — o que justificou a necessidade de ajustes na abertura da comporta conforme já comentado. Na configuração com defletor, foi observado um pico de pressão de 23 m.c.a na região da bacia de dissipação, entre as posições  $x = 50$  m e  $x = 60$  m (Figura 4.20).

FIGURA 4.19 – LINHAS D'ÁGUA -  $Q = 5.743 \text{ m}^3/\text{s}$  (T.R. 1.000 anos) - NAJ = 256,92 m



FONTE: O Autor (2025)

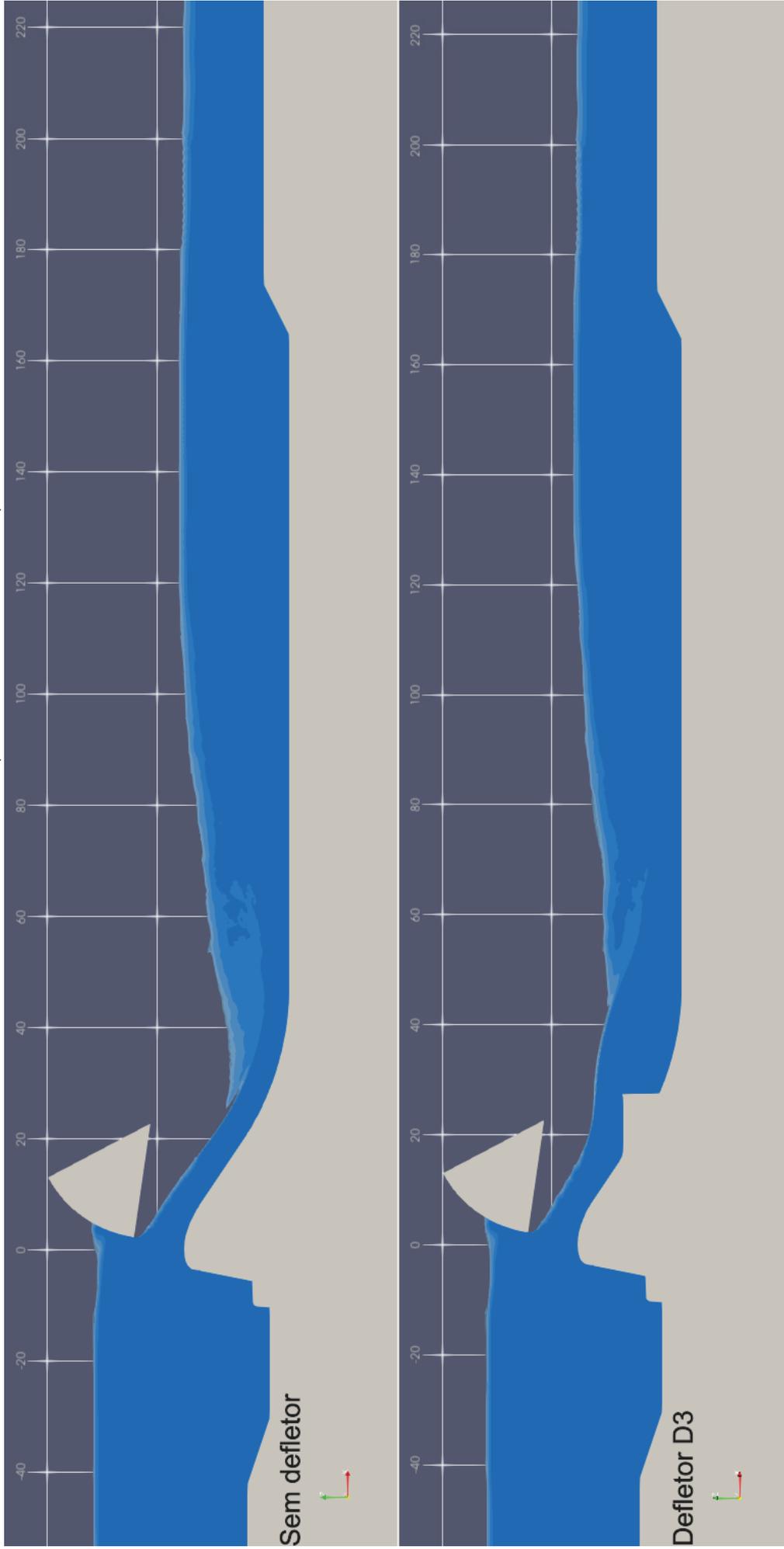
FIGURA 4.20 – LINHAS PIEZOMÉTRICAS -  $Q = 5.743 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 256,92 m



FONTE: O Autor (2025)

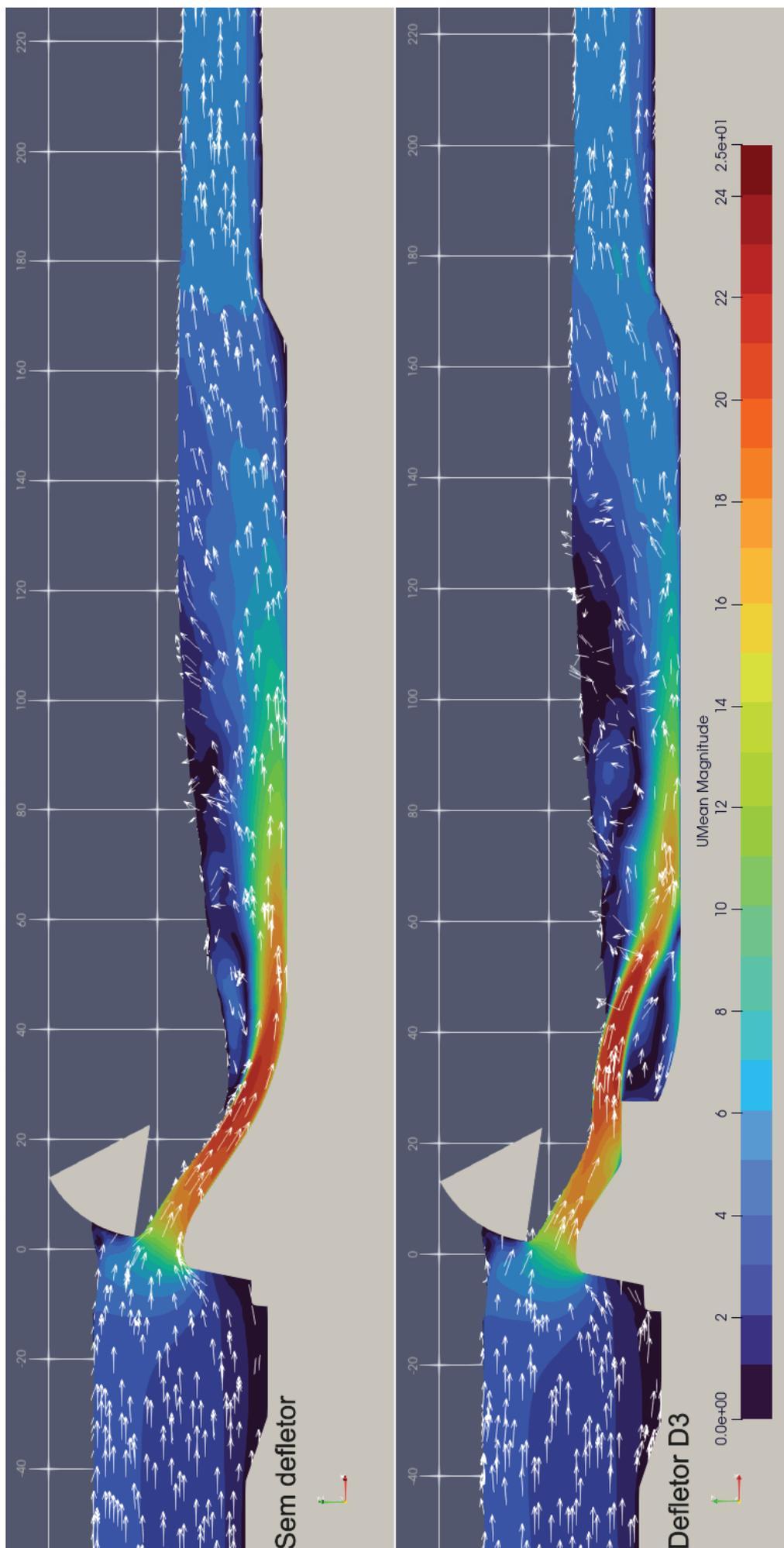
As Figuras 4.21 a 4.24 ilustram os escoamentos (velocidades e campo  $\alpha \cdot \text{water}$ ) para as vazões supracitadas de T.R. 100 e 1.000 anos.

FIGURA 4.21 – COMPARATIVO DO ESCOAMENTO (CAMPO ALPHA.WATER) - T.R. 100 ANOS



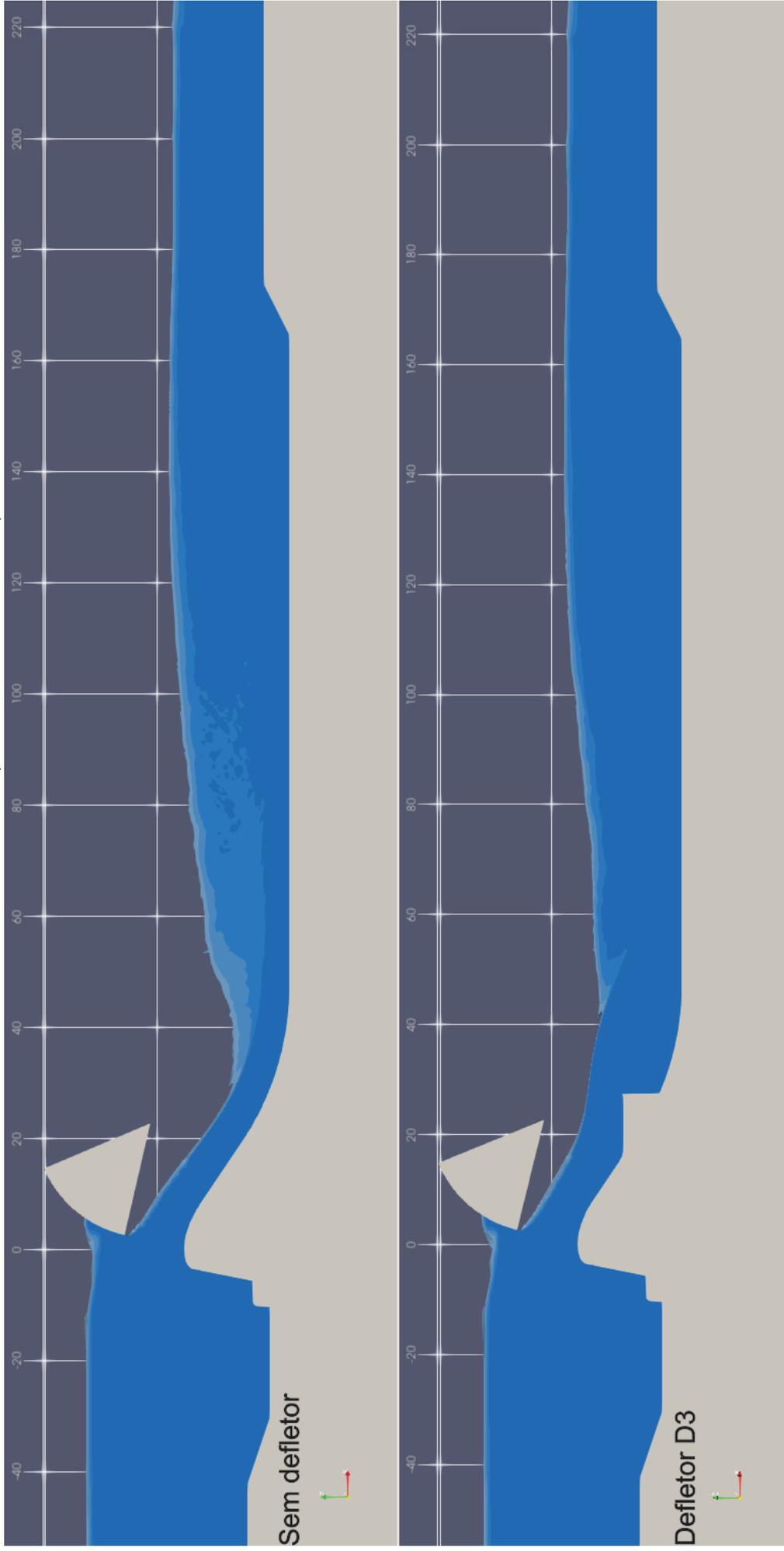
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.22 – COMPARATIVO DE CAMPOS DE VELOCIDADES - T.R: 100 ANOS



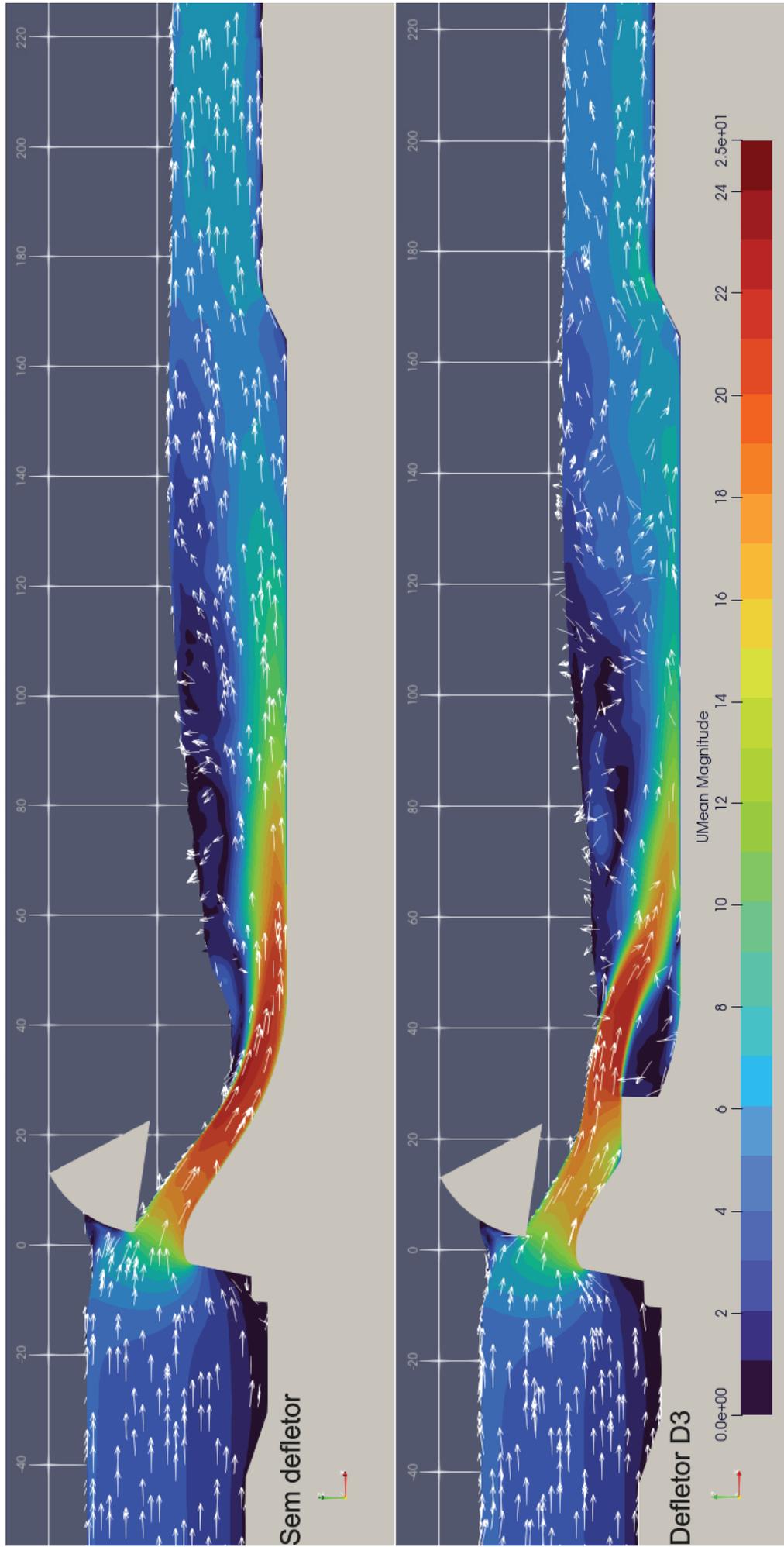
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.23 – COMPARATIVO DO ESCOAMENTO (CAMPO ALPHA.WATER) - T.R. 1.000 ANOS



FONTE: O Autor (2025)

FIGURA 4.24 – COMPARATIVO DE CAMPOS DE VELOCIDADES - T.R. 1.000 ANOS



FONTE: O Autor (2025)

### 4.3 CAPACIDADE DE DESCARGA

Nas simulações computacionais realizadas, a vazão do vertedouro controlado por comporta não apresentou redução do coeficiente de descarga pelos diferentes comprimentos de defletor para vazões mais recorrentes. No cenário com a vazão de T.R. 100 anos ( $Q = 4.554 \text{ m}^3/\text{s}$ ), o vertedouro sem defletor (SDF) também utilizou a mesma abertura  $G_0$  da estrutura com defletor (D3). Contudo, para vazão correspondente à T.R. 1.000 anos ( $Q = 5.743 \text{ m}^3/\text{s}$ ), houve uma redução da capacidade de descarga, por conta do aumento da pressão a montante do defletor D3, em direção à crista. Nessa configuração com defletor, houve a necessidade de aumentar o valor da abertura  $G_0$ .

A Tabela 4.2 reapresenta os valores de  $G_0$  utilizados e os coeficientes de descarga, com o nível de energia no reservatório na elevação 272,00 m. Nota-se que o defletor pode reduzir a capacidade de descarga do vertedouro, conforme observado nas simulações. Portanto, ao acrescentar um defletor é necessário reavaliar a curva de descarga do extravasor. Salienta-se que as variáveis apresentadas na Tabela 4.2 foram ilustradas na Figura 3.1.

TABELA 4.2 – COEFICIENTE DE DESCARGA DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS

$Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$Q/v\tilde{a}o$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$G_0$ (m)	$Z_g$ (m)	$H_e$ (m)	$C_d$
300	75,00	0,473	255,12	16,88	0,6887
1.600	400,00	2,749	256,46	15,54	0,7200
4.554	1138,50	8,568	259,47	12,53	0,7079
5.743 (D3)	1435,75	10,577	260,46	11,54	0,6651
5.743 (SDF)	1435,75	10,277	260,32	11,68	0,6502

Fonte: O Autor (2025)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou o comportamento hidráulico do efeito do comprimento de defletores horizontais, utilizados para a redução de TDG, em vertedouro com bacia de dissipação. Esse tipo de defletor é construído na calha do vertedouro, em concreto, e tem como objetivo alterar as condições de escoamento para reduzir a supersaturação de gases na água — condição comumente nociva para a ictiofauna.

A curva de performance, gráfico que relaciona as condições hidráulicas (vazão e nível de água de jusante) com os regimes de escoamento, é desenvolvido de acordo com a hidrologia local e geometria do defletor avaliado. Assim, este trabalho avaliou de forma sistemática o possível efeito que o comprimento dessas estruturas poderia implicar na curva de performance e efeitos hidráulicos a jusante, como maiores velocidades e pressões a jusante da descarga do vertedouro.

Desse modo, no presente estudo, o modelo computacional conseguiu representar de maneira adequada e aderente os resultados do modelo físico reduzido, com medições de níveis de água, pressão e regime de escoamento semelhantes ao observado no canal experimental.

Nos testes com vazões menores ( $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $1.600 \text{ m}^3/\text{s}$ ) não houve alteração significativa na hidrodinâmica do escoamento (campos de pressão, velocidade e perfil de linha de água médio) sob alteração do comprimento dos defletores. Observou-se um deslocamento horizontal desses campos, porém não necessariamente seguindo o mesmo valor de variação do comprimento dos defletores avaliados. Desse modo, o comprimento do defletor mostrou-se pouco relevante em alterações de regime de escoamento — condição não estudada anteriormente de maneira sistemática.

No cenário de vazões mais elevadas (T.R. 100 e 1.000 anos), a presença do defletor resultou em picos de pressão, com valores próximos a 20 m.c.a na região da contracurva do defletor — o que deve ser verificado e previsto estruturalmente sempre que for adotado esse tipo de solução. Além disso, deve-se atentar às condições hidráulicas a jusante, uma vez que no caso avaliado, o regime *plunging flow* produziu pressões mais elevadas na bacia de dissipação em relação a configuração sem defletor. Conforme ilustrado na Figura 4.20, os resultados computacionais para a vazão de T.R. 1.000 anos indicaram um aumento de quase 50% da pressão na região de mergulho do escoamento (de 14 m.c.a para 25 m.c.a). Neste contexto, a presença de bolhas e uma região de alta pressão aumentam a supersaturação de TDG.

As velocidades para as vazões mais elevadas, em especial a T.R. 1.000 anos, não tiveram uma alteração significativa em ordem de grandeza, principalmente

comparado ao final da região da bacia de dissipação. Contudo, neste mesmo cenário observou-se uma perda da capacidade de descarga, uma vez que foi necessário aumentar a abertura da comporta (G0) para manter o mesmo nível de energia no reservatório.

Como sugestão de estudos futuros, sugere-se avaliar de maneira sistemática o efeito do posicionamento vertical de uma mesma geometria de defletor, a fim de corroborar ou não a sua maior influência na curva de performance sob diferentes configurações de malhas computacionais.

Além disso, sugere-se avaliar o uso de outros modelos computacionais que representem de maneira adequada o comportamento físico de bolhas dispersas na água. O uso de ferramentas que utilizem o método VoF comumente são limitadas ao tamanho da grade computacional utilizada para poderem representar a níveis aceitáveis a interação entre esses dois fluidos.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSSON, B. et al. **Computational fluid dynamics for engineers**. [S.l.: s.n.], 2012. 189 p. ISBN 9781139093590. Citado 9 vezes nas páginas 31, 32, 33, 35, 36, 40, 41, 42 e 43.
- BACCHIEGA, J. D.; FATTOR, C. A. Yacyretá Dam: spillways modification to reduce total dissolved gases concentrations downstream of the dam. **Hydraulics of Dams and River Structures**, n. September, p. 77–84, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.
- 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 43.
- COLT, J. E. The computation and reporting of dissolved gas levels. **Water Research**, v. 17, n. 8, p. 841–849, 1983. ISSN 00431354. Citado na página 21.
- DETTMER, P. H. C. **Relatório Técnico Final: Etapa 4**. Curitiba, 2022. Citado 8 vezes nas páginas 44, 46, 47, 48, 49, 50, 59 e 64.
- DETTMER, P. H. C. L. **ESTUDOS HIDRÁULICOS EM MODELO REDUZIDO DO VERTEDOURO DA UHE COLÍDER**. Curitiba, 2020. 108 p. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 68.
- EBEL, W. J. Supersaturation of Nitrogen in the Columbia River and Its Effect on Salmon and Steelhead Trout Bureau of Commercial Fisheries Biological Laboratory. **Fishery Bulletin - Bureau of Commercial Fisheries Biological Laboratory - Seattle**, v. 68, n. 1, p. 1–11, 1969. Citado na página 22.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 34. 34–1568–34–1568 p. ISSN 0009-4978. ISBN 964-7445-88-1. Citado 6 vezes nas páginas 30, 32, 33, 34, 36 e 38.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Mecânica dos Fluidos**. 5 ed.. ed. LTC, 2001. 520 p. ISBN 8576051826. Disponível em: <<https://books.google.com/books?id=QDiQPgAACAAJ&pgis=1>>. Citado na página 28.
- FREIRE, A. P. S.; COLACO, M. J.; ILHA, A. **Turbulência**. 2006. Citado na página 36.
- FRENCH, R. H. **Open Channel Hydraulic**. [S.l.: s.n.], 1986. Citado na página 31.
- GREENSHIELDS, C. J. **OpenFOAM User's Guide**. [S.l.: s.n.], 2019. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 57.
- HENDERSON, F. M. **Open Channel Flow**. New York: Collier MacMillan, 1966. 273 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796. Citado na página 28.
- HUANG, J. et al. Numerical study on the cumulative effect of supersaturated TDG through the spillway. **Ecohydrology and Hydrobiology**, Elsevier B.V., v. 21, n. 2, p. 292–298, 2021. ISSN 20803397. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.01.003>>. Citado na página 52.

- JASAK, H. Turbulence Modelling for CFD. In: **Turbulence Modeling for CFD**. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 0-9636051-0-0. Citado na página 33.
- MESA, M. G.; WEILAND, L. K.; MAULE, A. G. Progression and Severity of Gas Bubble Trauma in Juvenile Salmonids. **Transactions of the American Fisheries Society**, v. 129, n. 1, p. 174–185, 2004. ISSN 0002-8487. Citado na página 22.
- MYERS, R.; PARKINSON, S. E. **Hells Canyon Complex Total Dissolved Gas Study**. Idaho, 2003. 61 p. Citado na página 20.
- NETO, A. d. S. Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos. **Turbulência**, n. 1, p. 159–188, 2002. Citado na página 36.
- NOVAK, P. et al. **Hydraulic Modelling – an Introduction**. [S.l.: s.n.], 2010. v. 48. 614 p. ISSN 0022-1686. ISBN 9780419250104. Citado na página 28.
- VELAR, C. O. S.; DETTMER, P. H. C.; TAKENOBU, M. Y. M. **Relatório Técnico Final: Etapa 1**. Curitiba, 2020. Citado na página 21.
- VELAR, C. O. S.; DETTMER, P. H. C.; TAKENOBU, M. Y. M. **Relatório Técnico Final: Etapa 7**. Curitiba, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 57, 58 e 59.
- POLITANO, M. S. et al. Prediction of the total dissolved gas downstream of spillways using a two-phase flow model. 2004. Citado na página 18.
- POLITANO, M. S.; CARRICA, P. M.; WEBER, L. J. 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 na página 18.
- POLITANO, M. S.; LAUGHERY, R. A two-phase flow model to evaluate the effect of fish passage structures on the hydrodynamics and TDG downstream of McNary Dam. In: CONSTANTINESCU, G.; GARCIA, M.; HANES, D. (Ed.). **Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics - River Flow 2016**. St. Louis: [s.n.], 2016. p. 1–3. ISBN 9781138029132. Citado na página 27.
- POLITANO, M. S. et al. Spillway Deflector Design Using Physical and Numerical Models. **6th International Symposium on Hydraulic Structures**, n. June, p. 27–30, 2016. Disponível em: <<http://digitalcommons.usu.edu/ishs/2016/Session5/2/>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 21 e 23.
- RULIFSON, R. L.; ABEL, G. Nitrogen Supersaturation in the Columbia and Snake Rivers. **Environmental Protection Agency Office of Water Programs Seattle, Washington Region X**, 1971. Citado na página 22.
- RUSCHE, H. **Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-Phase Flows at High Phase Fractions**. Tese (Doutorado), 2002. Citado na página 42.
- SAGAUT, P.; DECK, S.; TERRACOL, M. **Multiscale and Multiresolution Approaches in Turbulence**. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 186094650X. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

SCHASKOS, A. L. **Concretagem do bloco defletor do Vão 03 - UHE Colider (300MW)**. 2021. Disponível em: <[https://media-exp1.licdn.com/dms/image/C4E22AQEtiUKqbjzWTw/feedshare-shrink\\_1280/0/1637844548416?e=1667433600&v=beta&t=eSS8HMHSkc0KGyZINyZXtirAnB7qCW4zzzm0TT2xk3g](https://media-exp1.licdn.com/dms/image/C4E22AQEtiUKqbjzWTw/feedshare-shrink_1280/0/1637844548416?e=1667433600&v=beta&t=eSS8HMHSkc0KGyZINyZXtirAnB7qCW4zzzm0TT2xk3g)>. Citado na página 46.

SCHNEIDER, M. L.; WILHELMS, S. C. Ice Harbor Spillway Dissolved Gas Field Studies : Before and After Spillway Deflectors Coastal and Hydraulics Laboratory. **USACE - US Army Corps of Engineers - Coastal and Hydraulics Laboratory**, n. July, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 18, 24, 25 e 26.

SENSE. **Manual de instrução MICROSONIC**. 2009. 3 p. Disponível em: <<https://www.sense.com.br/arquivos/produtos/arq2/EA3000819.pdf>>. Citado na página 49.

SHUR, M. et al. Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack. **Engineering Turbulence Modelling and Experiments 4**, Woodhead Publishing Limited, p. 669–678, 1999. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-008043328-8/50064-3>>. Citado na página 38.

SOUZA, H. de. **MPE quer que usina pague 1,3 milhão de reais por morte de peixes no Teles Pires no Nortão**. 2019. Disponível em: <<https://www.sonoticias.com.br/geral/mpe-quer-que-usina-pague-r-13-milhao-por-morte-de-peixes-no-teles-pires-no-nortao/>>. Citado na página 46.

SOUZA, J. F. A. et al. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, n. 1, p. 21–41, 2011. ISSN 0102261X. Citado 4 vezes nas páginas 31, 34, 35 e 36.

TAKENOBU, M. Y. M. et al. Physical and Numerical Hydraulic Modeling of a Spillway with Horizontal Deflectors. **Proceeding of 39th IAHR World Congress: From snow to sea**, n. July, p. 1–23, 2022. Citado na página 53.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Parallel Computational Fluid Dynamics**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 6. 78–78 p. ISSN 1092-3063. ISBN 9780131274983. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.

WANG, Y. **Development of a Numerical Tool to Predict Hydrodynamics, Temperature and TDG in Hydropower Flows**. 194 p. Tese (Doutorado) — University of Iowa, 2013. Citado na página 18.

WANG, Y. et al. Model development in OpenFOAM to predict spillway jet regimes. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, v. 3, n. 2, p. 80–94, 2015. ISSN 2324-9676. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23249676.2015.1025442>>. Citado na página 23.

WANG, Y.; POLITANO, M. S.; WEBER, L. J. Spillway jet regime and total dissolved gas prediction with a multiphase flow model. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 1, p. 26–38, 2018. ISSN 00221686. Citado na página 53.

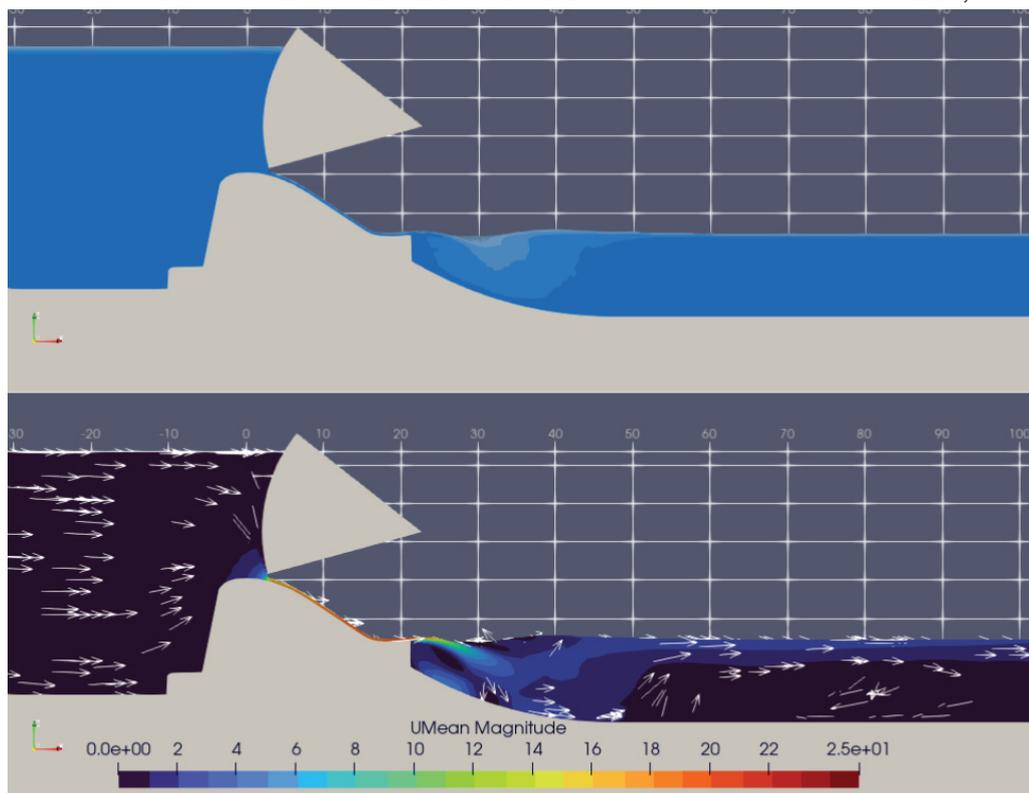
WEITKAMP, D. Total Dissolved Gas Supersaturation Biological Effects , Review of Literature 1980-2007. **Review Literature And Arts Of The Americas**, p. 60, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 18, 21, 22 e 23.

WILCOX, D. C. **Turbulence Modelling for CFD 3rd Edition**. [s.n.], 2006. ISBN 9781928729082. Disponível em: <<http://www.dwindustries.com>>. Citado na página 39.

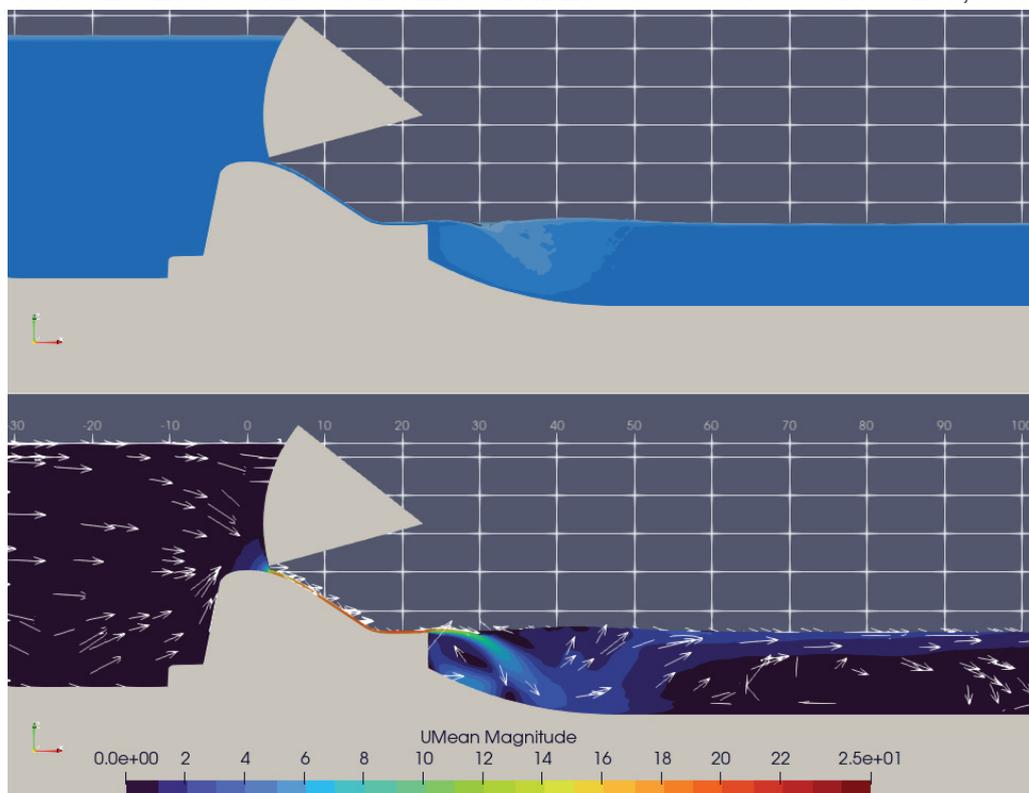
WITT, A. M. Analytical and Numerical Investigation of An Air Entraining Hydraulic Jump. n. October, p. 153, 2014. Citado na página 63.

YAMAKAWA, F.; TERABE, F. **ESTUDOS HIDRÁULICOS EM MODELO REDUZIDO DA USINA HIDRELÉTRICA COLÍDER**. Curitiba, 2014. 1–203 p. Citado na página 76.

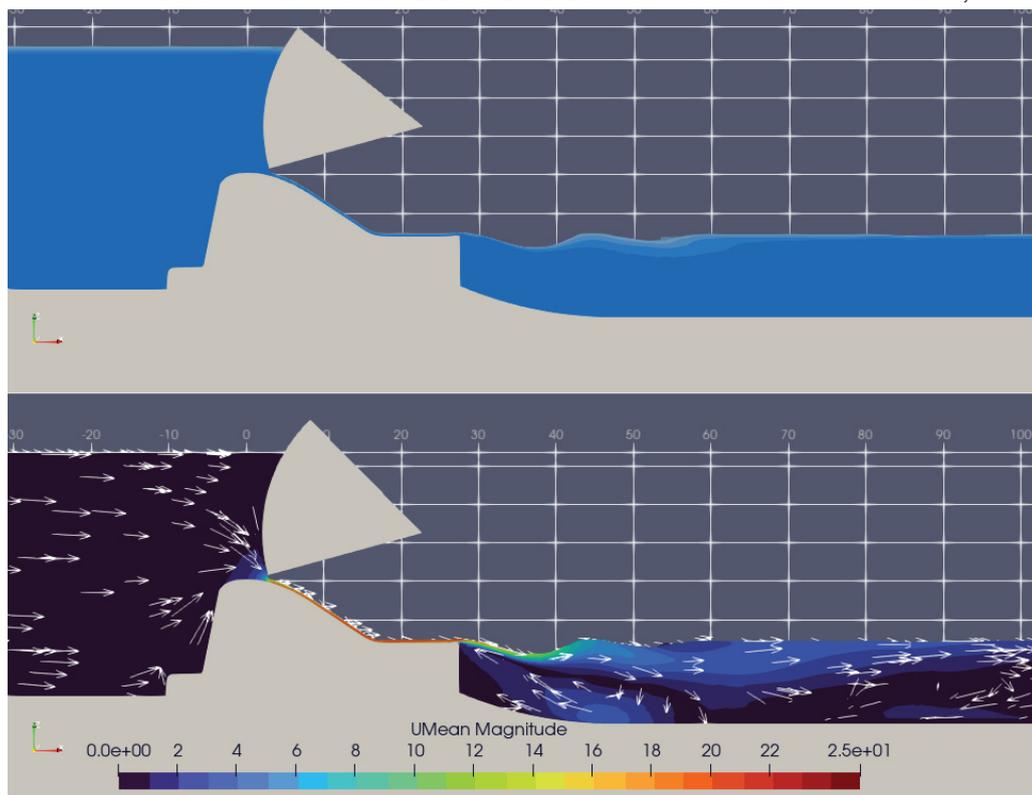
## APÊNDICE

FIGURA A.1 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  -  $NAJ = 247,11 \text{ m}$  (D1)

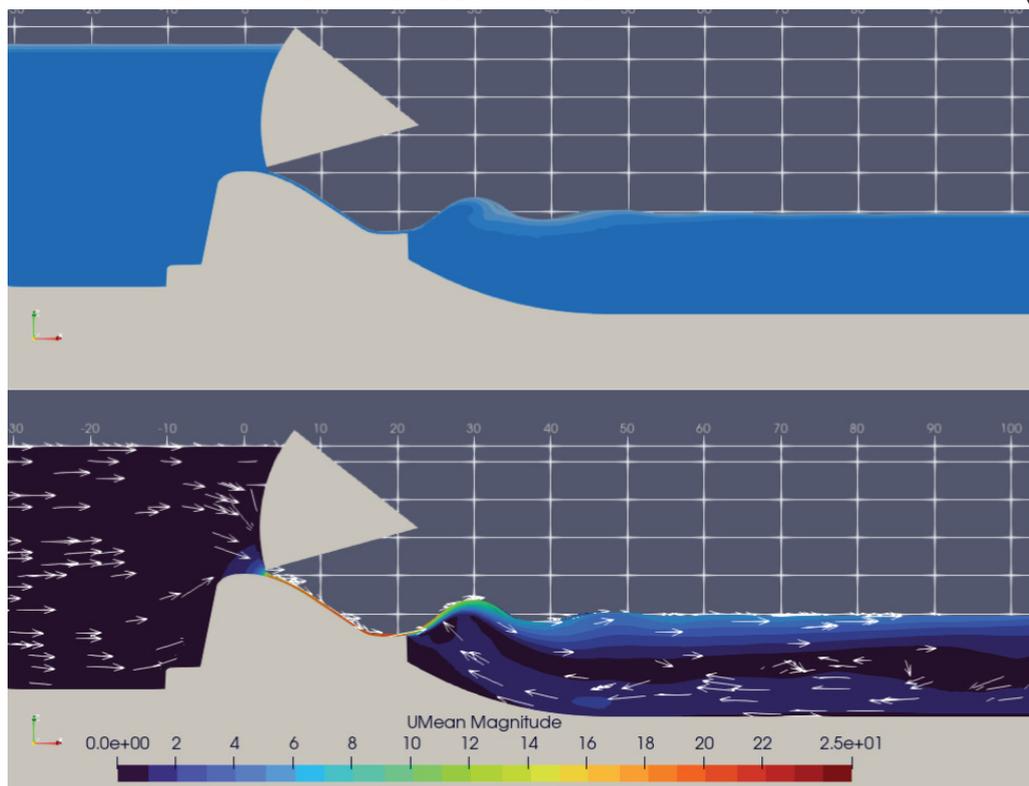
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.2 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  -  $NAJ = 247,11 \text{ m}$  (D2)

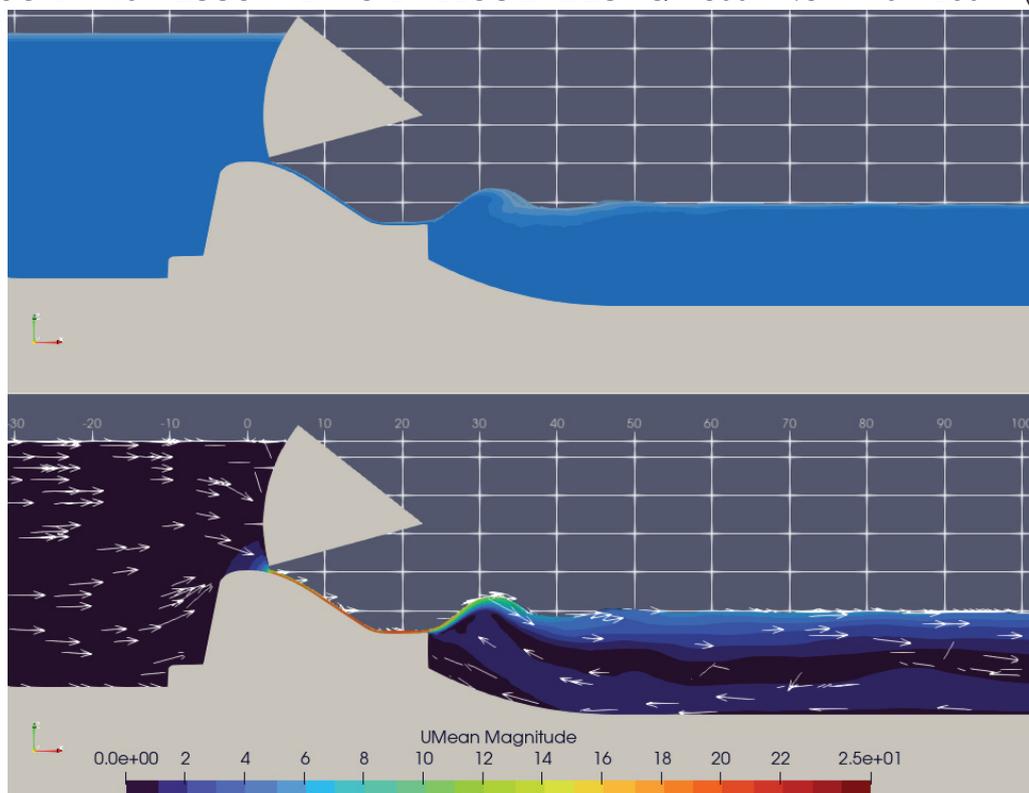
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.3 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  -  $NAJ = 247,11 \text{ m}$  (D3)

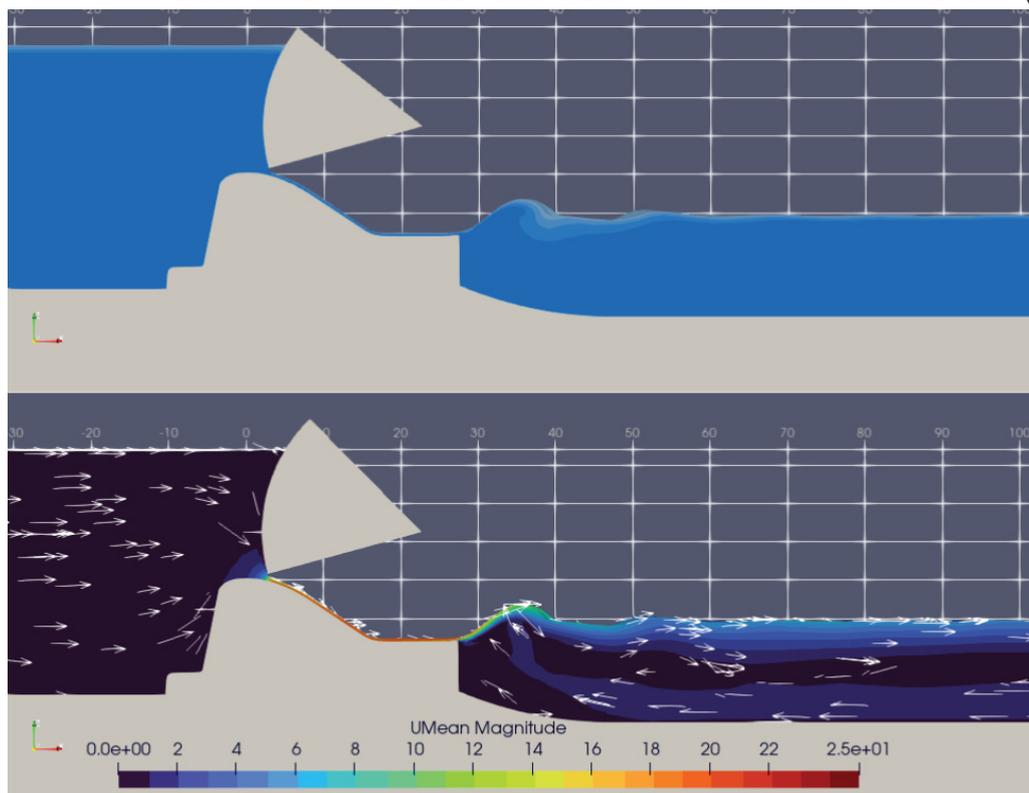
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.4 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 250 m (D1)

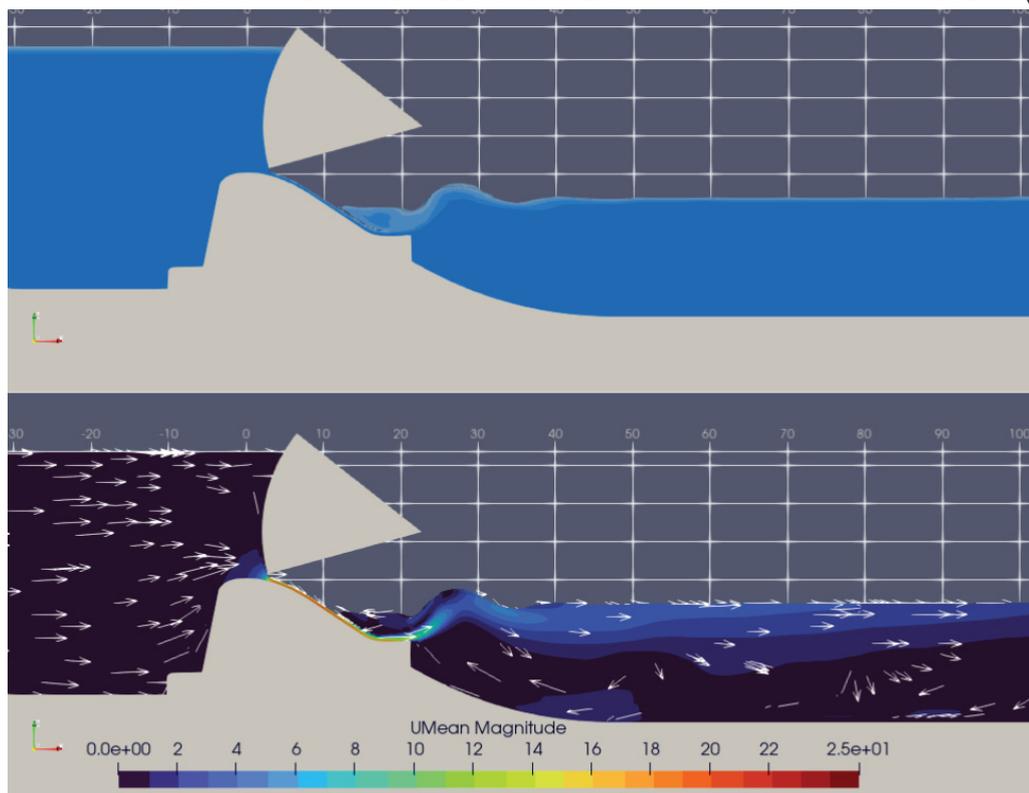
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.5 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 250 m (D2)

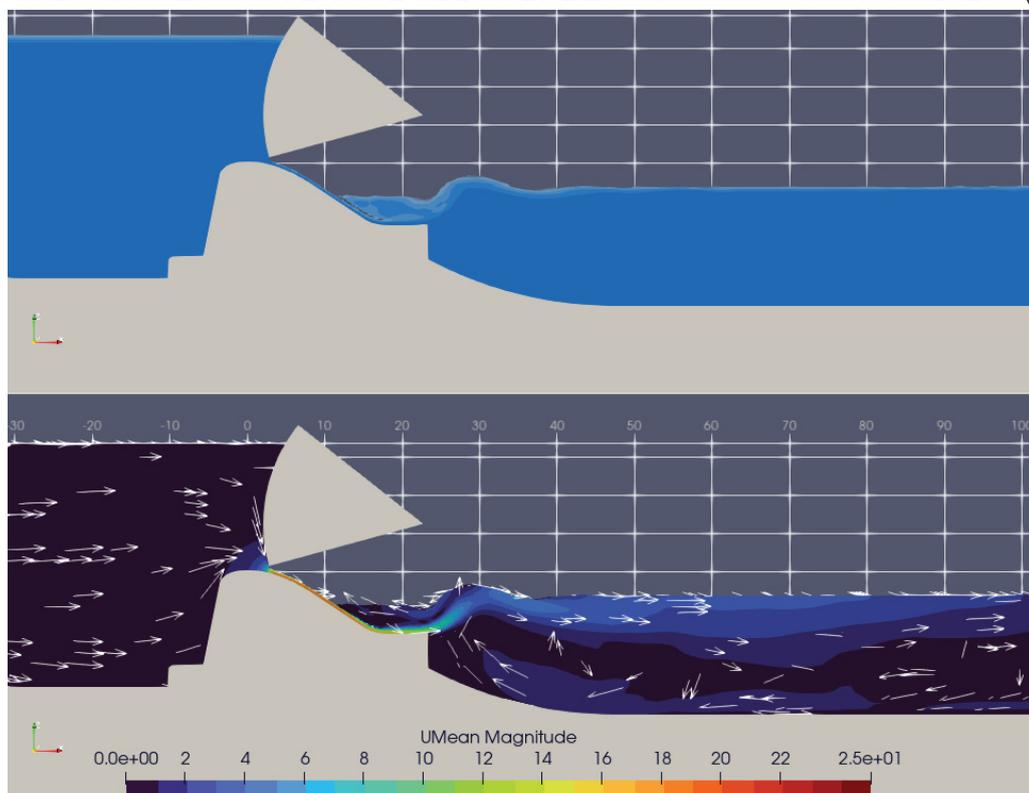
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.6 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 250 m (D3)

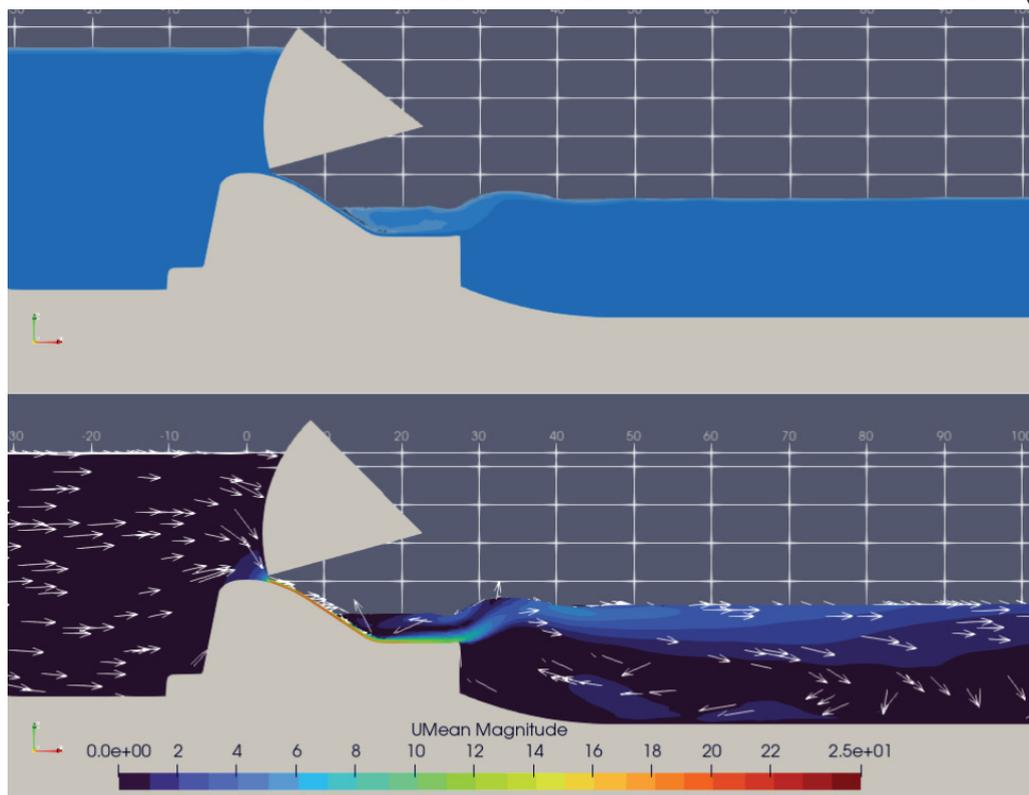
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.7 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 252 m (D1)

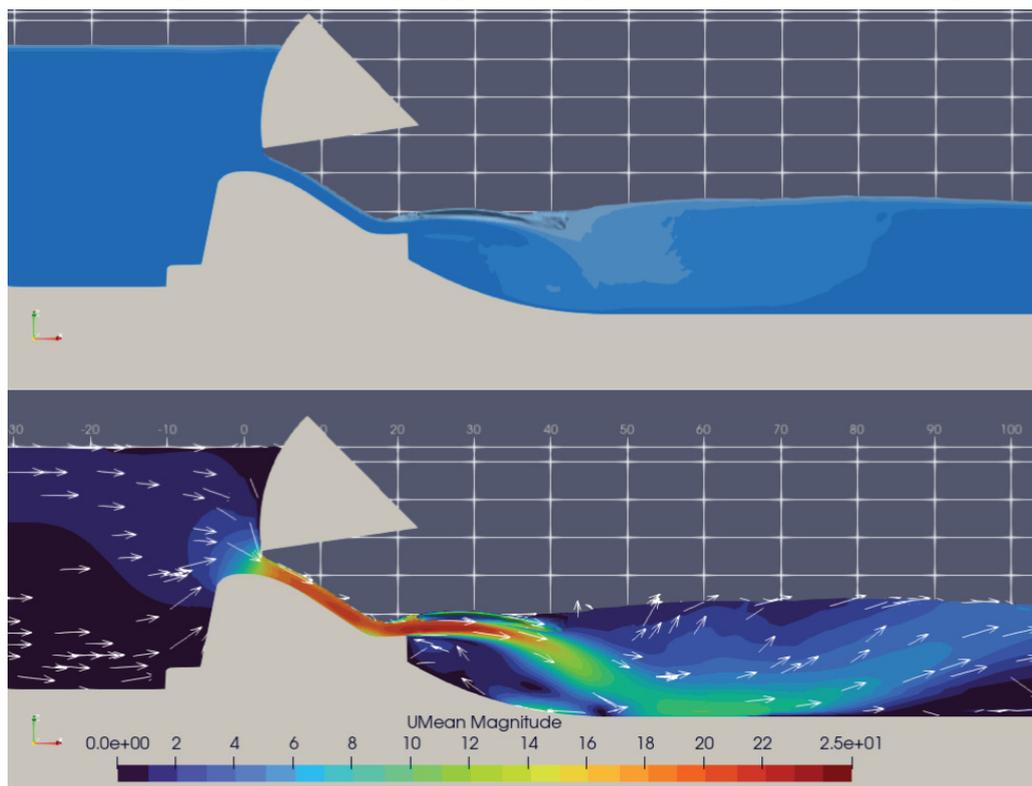
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.8 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 252 m (D2)

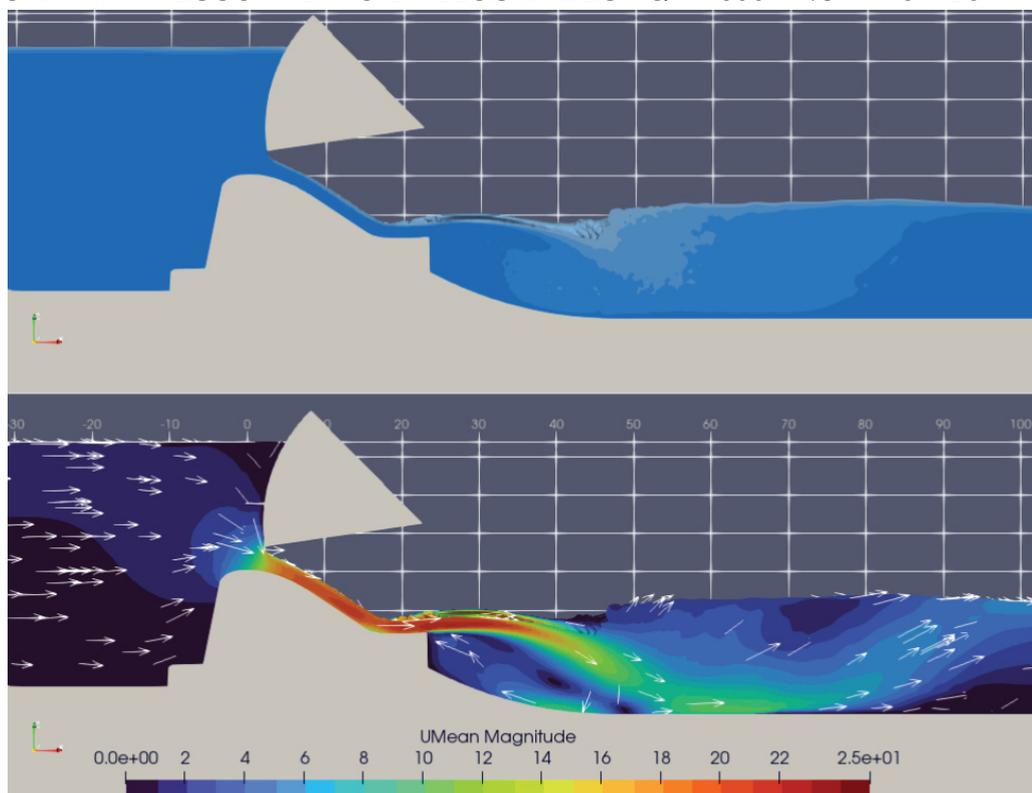
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.9 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 252 m (D3)

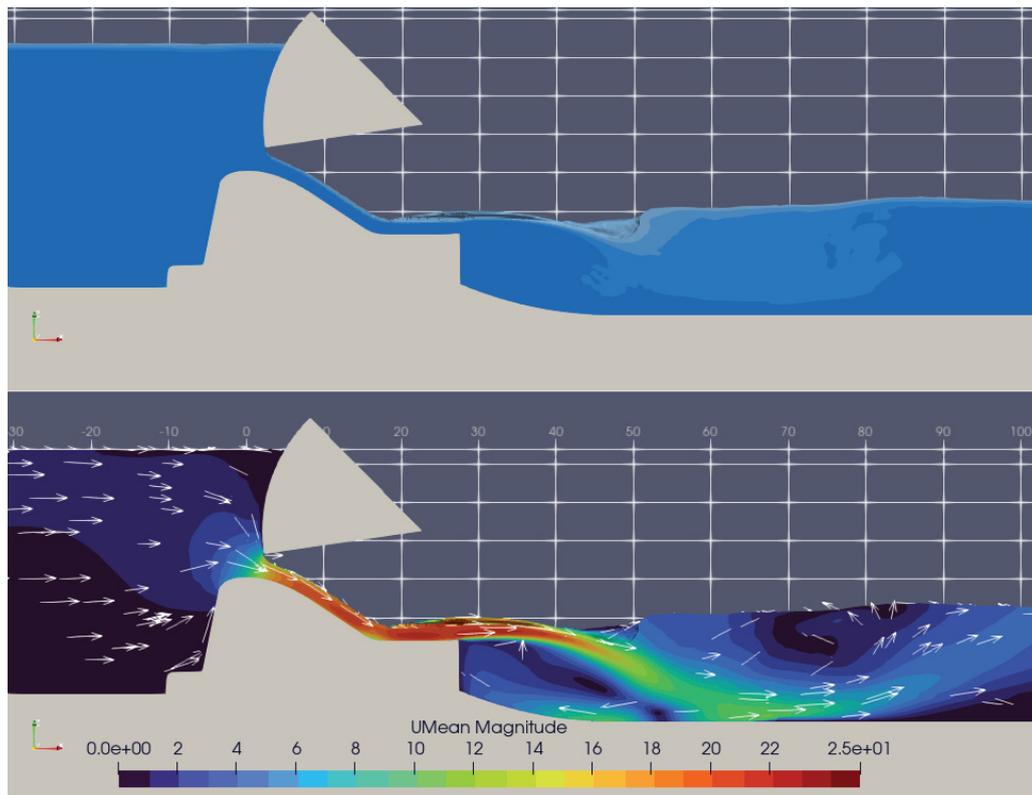
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.10 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 251 m (D1)

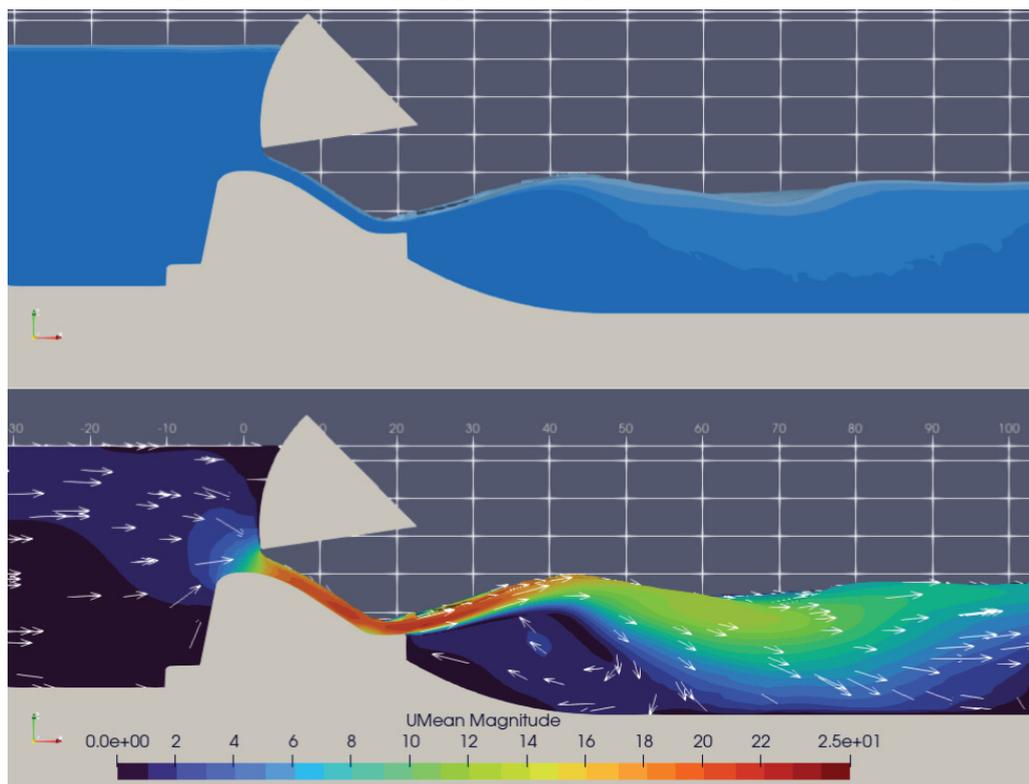
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.11 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 251 m (D2)

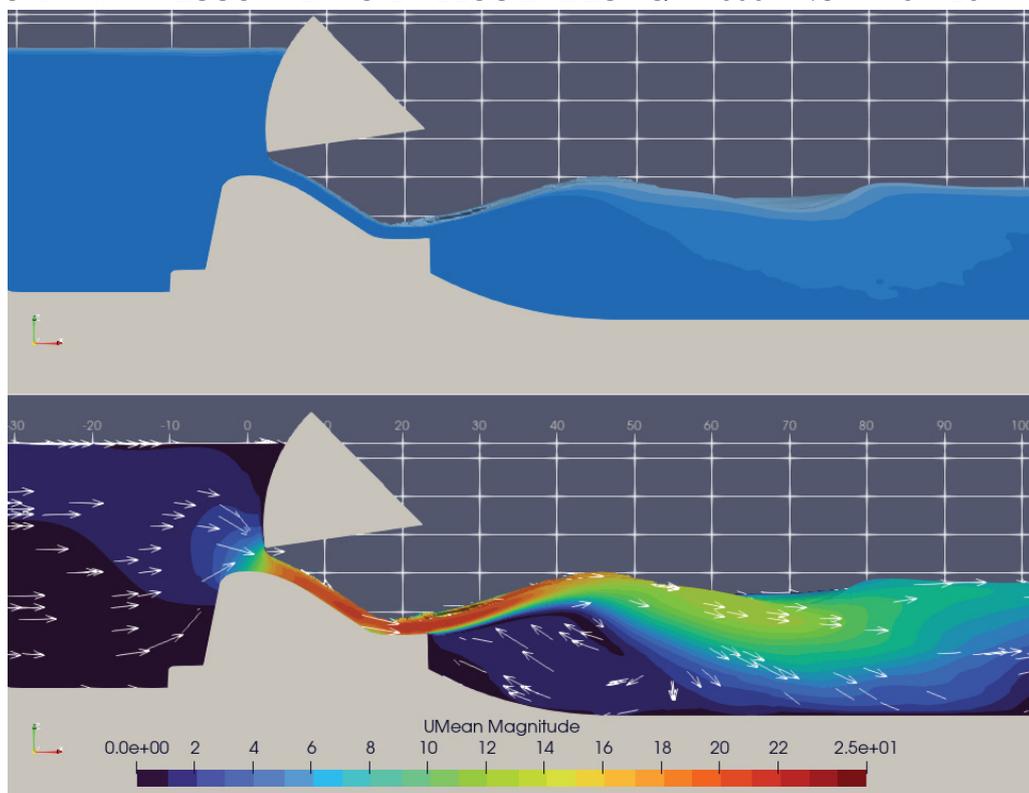
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.12 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 251 m (D3)

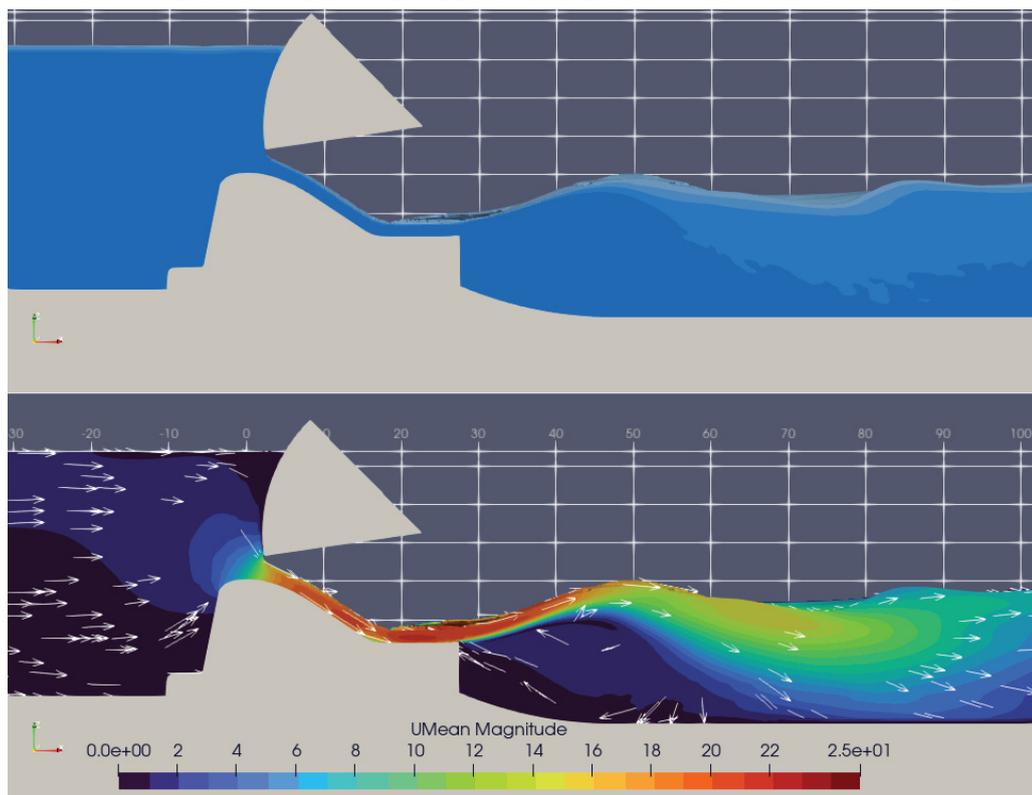
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.13 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 254 m (D1)

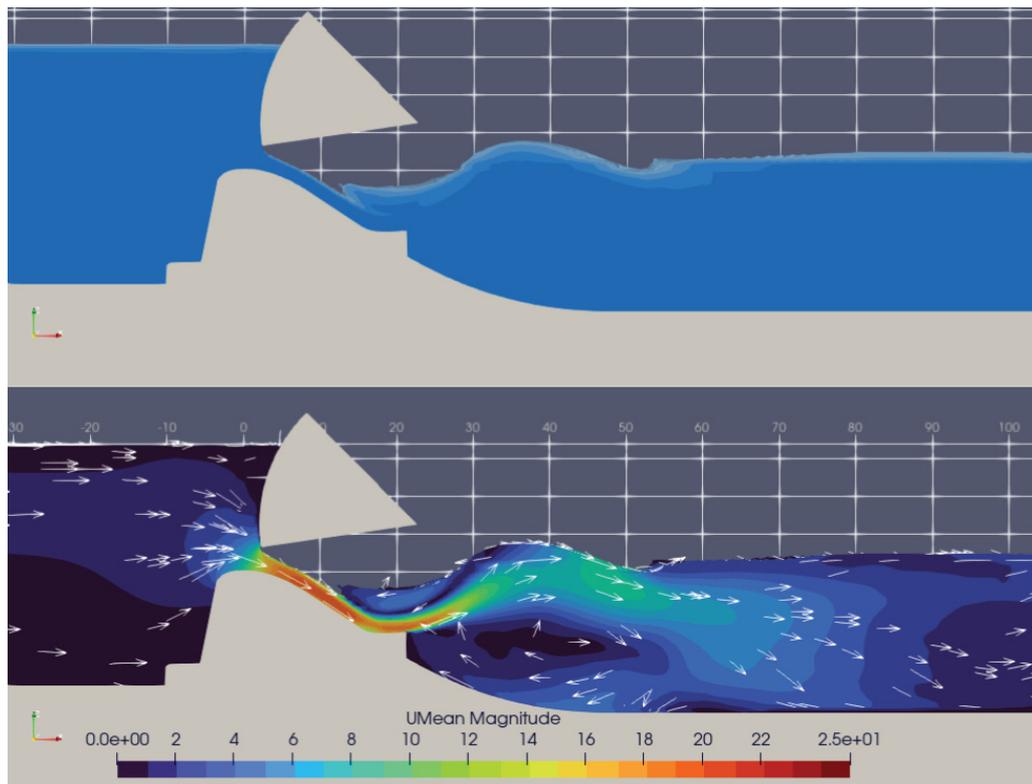
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.14 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 254 m (D2)

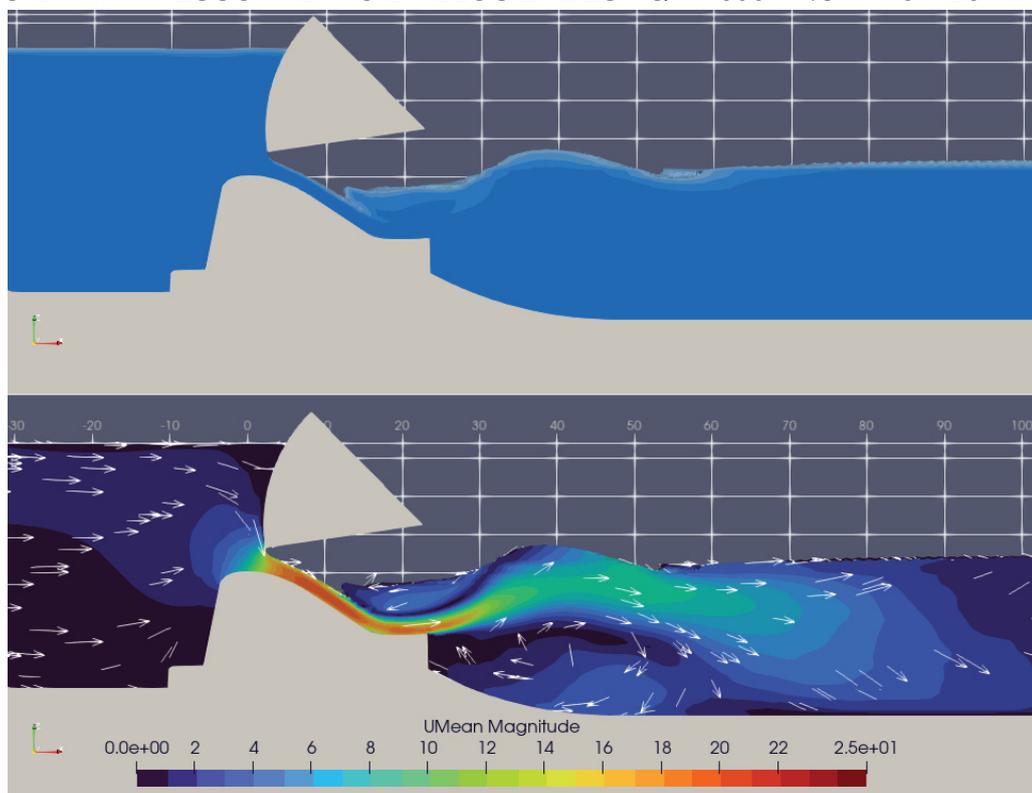
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.15 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 254 m (D3)

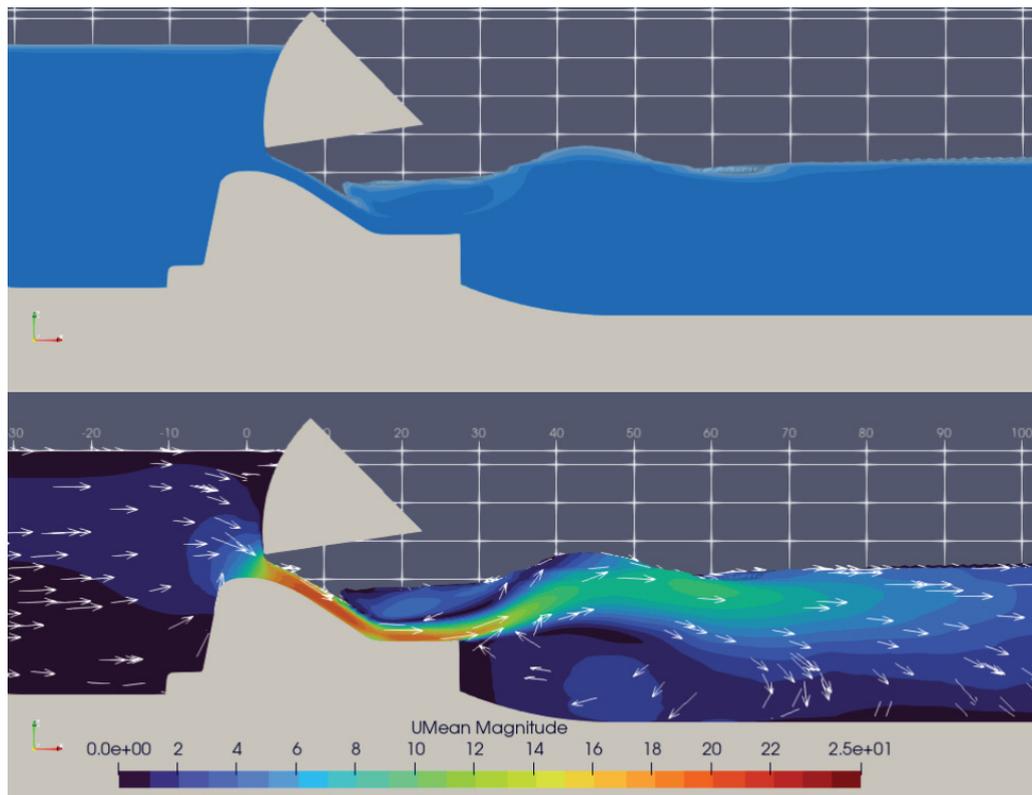
FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.16 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 257 m (D1)

FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.17 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 257 m (D2)

FONTE: O Autor (2025)

FIGURA A.18 – ESCOAMENTO E VELOCIDADES -  $Q = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$  - NAJ = 257 m (D3)

FONTE: O Autor (2025)