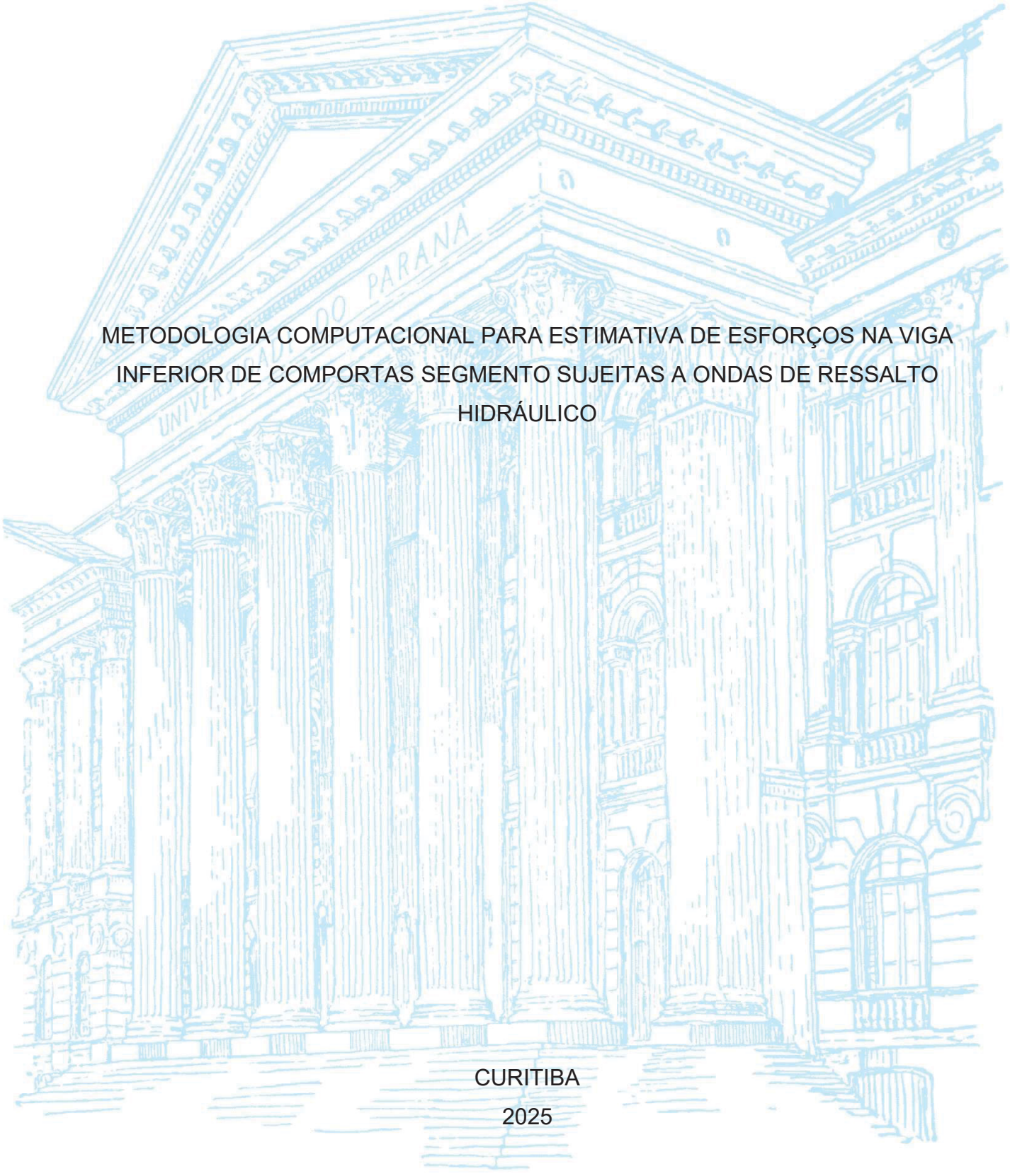
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JENNIFER PEREIRA DA CRUZ



METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DE ESFORÇOS NA VIGA INFERIOR DE COMPORTAS SEGMENTO SUJEITAS A ONDAS DE RESSALTO HIDRÁULICO

CURITIBA

2025

JENNIFER PEREIRA DA CRUZ

METODOLOGIA COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DE ESFORÇOS NA VIGA INFERIOR DE COMPORTAS SEGMENTO SUJEITAS A ONDAS DE RESSALTO HIDRÁULICO

Dissertação apresentada ao curso 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. Dr. José Junji Ota

Coorientador: Prof. Fernando Oliveira Andrade (*in memoriam*)

CURITIBA

2025

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

Cruz, Jennifer Pereira da
Metodologia computacional para estimativa de esforços na viga inferior de comportas segmento sujeitas a ondas de ressalto hidráulico. / Jennifer Pereira da Cruz. – 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: Prof. Dr. José Junji Ota
Coorientador: Prof. Fernando Oliveira Andrade (in memoriam)

1. Vigas. 2. Estruturas hidráulicas. 3. Ressalto hidráulico. 4. Métodos Computacionais em Sistemas e Software. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. III. Ota, José Junji. IV. Andrade, Fernando Oliveira V. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

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 **JENNIFER PEREIRA DA CRUZ**, intitulada: **Metodologia computacional para estimativa de esforços na viga inferior de comportas segmento sujeitas a ondas de ressalto hidráulico**, sob orientação do Prof. Dr. JOSÉ JUNJI OTA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra 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, 30 de Maio de 2025.

Assinatura Eletrônica
22/06/2025 22:26:11.0
JOSÉ JUNJI OTA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
01/06/2025 09:06:02.0
ANDRE LUIZ TONSO FABIANI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
02/06/2025 13:00:37.0
BRUNO VICTOR VEIGA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - DEP. DE HIDRÁULICA)

Assinatura Eletrônica
02/06/2025 08:58:36.0
MARCOS CRISTIANO PALU
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por sua infinita bondade e graça derramada sobre minha vida.

À minha família, dedico minha profunda gratidão, vocês foram a base sólida que me permitiu enfrentar momentos difíceis.

Aos meus colegas de trabalho, que colaboraram diretamente no desenvolvimento do projeto de pesquisa e contribuíram para a concretização deste estudo, agradeço imensamente. Em especial, ao Renato Grube e Danusa Haick Tavares, cuja dedicação, competência e humildade sempre foram para mim uma grande fonte de inspiração.

À Intertechne, pela oportunidade de integrar este projeto, pelo incentivo constante ao meu desenvolvimento profissional e pela chance de conviver e aprender diariamente com profissionais brilhantes.

À equipe da Copel, expresso meus agradecimentos pela oportunidade concedida de aprendizado e crescimento.

Ao LACTEC e a todos os profissionais envolvidos no projeto de pesquisa, agradeço pela dedicação e pela excelência demonstrados ao longo de todo o trabalho. Registro, em especial, minha gratidão ao Márcio Froelich, que compartilhou seus conhecimentos em OpenFOAM® com muita excelência, contribuindo para o enriquecimento deste estudo.

Ao professor José Junji Ota, meu orientador, expresso minha profunda gratidão pela orientação e pelo apoio constante durante a elaboração deste trabalho. Agradeço também pelas aulas inspiradoras, enriquecidas por uma dose de humor.

Presto minha homenagem ao professor Fernando Oliveira Andrade, que, embora não esteja mais entre nós, deixou uma contribuição fundamental à mecânica dos fluidos computacional, essencial para este trabalho, e cuja memória permanece viva em nossa trajetória acadêmica.

Por fim, agradeço aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições e pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu.”

Eclesiastes 3:1

RESUMO

Os cenários atuais indicam que, no Brasil, será cada vez mais comum a construção de usinas hidrelétricas de baixa queda, caracterizadas por vertedouros com alto grau de submergência. Essa condição ocorre devido aos elevados níveis de água de jusante, que tendem a forçar o ressalto hidráulico contra a comporta segmento. A compreensão desses esforços hidrodinâmicos atuantes sobre a viga inferior das comportas segmento, não é amplamente abrangida na bibliografia consagrada. Visto isso, o presente trabalho propõe aprimorar o conhecimento existente neste tema, por meio do desenvolvimento de uma metodologia computacional capaz de estimar esses esforços. Para isso, serão aplicadas técnicas de modelagem computacional que possibilitem a determinação desses esforços, com o objetivo de minimizar as incertezas existentes nas etapas de projeto ou verificação desse tipo de comporta. Este trabalho apresenta parte dos resultados do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), identificado pelo código PD-06491-0445/2017 e intitulado "Critério Empírico e Metodologia Computacional para a estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico", no que diz respeito a metodologia computacional desenvolvida no âmbito desse projeto de pesquisa. O projeto foi desenvolvido pelas empresas executoras Lactec - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento e Intertechne Consultores S.A, e financiado pela Copel Geração e Transmissão S.A.

Palavras-chave: Ressalto hidráulico; esforços hidrodinâmicos; Viga inferior; Comporta segmento; Metodologia computacional.

ABSTRACT

The currrent scenarios indicate that, in Brazil, it will become increasingly common to construct low-head plants, characterized by spillways with a high degree of submergence. This condition occurs due to high downstream water levels, which tend to push the hydraulic jump against the segment gate. The understanding of the hydrodynamic forces acting on the inferior beam of segment gates is not widely covered in the established literature. Given this, the present work aims to enhance the existing knowledge on this subject through the development of a computational methodology capable of estimating these forces. For this purpose, computational modeling techniques will be applied to determine these forces, with the objective of minimizing uncertainties during the design or verification phases of this gate's type. This work presents part of the results of the Electric Sector's Research and development program, regulated by National Agency of Electric Energy (ANEEL), identified by code PD-06491-0445/2017 and entitled "Empirical Criterion and Computational Methodology for the Estimation of Efforts in the Lower Beam of Segment Gates Subject to Hydraulic Jump Waves" ("Critério Empírico e Metodologia Computacional para a estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico", in Portuguese) specifically regarding the computational methodology developed as part of this research project. The was carried out by the executing companies Lactec Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento and Intertechne Consultores S.A., and financed by the Copel Geração e Transmissão S.A.

Keywords: Hydraulic jump; Hydrodynamic forces; Inferior beam; Segment gate; Computational methodology.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – COMPORTAS DA BARRAGEM DE HORSESHOE – ARIZONA.....26
FIGURA 2.2 – COMPORTA SEGMENTO.....27
FIGURA 2.3 – UHE SANTO ANTÔNIO – SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOURO.....29
FIGURA 2.4 – UHE SANTO ANTÔNIO – VERTEDOURO AUXILIAR 30
FIGURA 2.5 – UHE JIRAU – SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOURO.....31
FIGURA 2.6 – UHE JIRAU – VERTEDOURO.....32
FIGURA 2.7 – UHE BELO MONTE (SÍTIO PIMENTAL) – SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOURO 33
FIGURA 2.8 – UHE BELO MONTE (SÍTIO PIMENTAL) – VERTEDOURO 34
FIGURA 2.9 – RESSALTO HIDRÁULICO.....38
FIGURA 2.10 – CONFIGURAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO 39
FIGURA 2.11 – TIPOS DE RESSALTO HIDRÁULICO DE ACORDO COM O NÚMERO DE FROUDE 40
FIGURA 2.12 – RESSALTO FORTE – Fr > 9.....41
FIGURA 2.13 – VOLUME DE CONTROLE DIFERENCIAL PARA CONSERVAÇÃO DE MASSA.....43
FIGURA 2.14 – COMPONENTES DE TENSÃO VISCOSA NAS TRÊS FACES DO ELEMENTO DE FLUIDO 46
FIGURA 2.15 – COMPONENTES DE TENSÃO NA DIREÇÃO X.....47
FIGURA 2.16 – NAVIER-STOKES.....49
FIGURA 2.17– PROCESSO DE DISCRETIZAÇÃO.....54
FIGURA 2.18 – DISCRETIZAÇÃO GEOMÉTRICA E FÍSICA DO DOMÍNIO.....55
FIGURA 2.19 – COMPONENTES DA MALHA – VÉRTICES, FACES E ELEMENTOS 56
FIGURA 2.20 – TIPOS DE INTEGRAÇÃO AO LONGO DAS FACES DOS ELEMENTOS.....60
FIGURA 2.21 – DISCRETIZAÇÃO BASEADA NOS ELEMENTOS E NOS NÓS 61
FIGURA 2.22 – MÉTODO DO VOLUME DE FLUIDO (VOF).....65
FIGURA 2.23 – VISÃO GERAL DA ESTRUTURA DO OPENFOAM® 67
FIGURA 2.24 – ILUSTRAÇÃO DE DA VINCI – FLUXO TURBULENTO 75
FIGURA 2.25 – TURBULÊNCIA DE PAREDE.....77

FIGURA 2.26 – EXPERIÊNCIA DE REYNOLDS 78
FIGURA 2.27 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA VELOCIDADE DO FLUIDO 79
FIGURA 2.28 – SEPARAÇÃO DA VELOCIDADE INSTANTÂNEA EM COMPONENTES: MÉDIA (u) E FLUTUAÇÃO (u') 82
FIGURA 2.29 – MÉDIA DA FLUTUAÇÃO E MÉDIA DO QUADRADO DA FLUTUAÇÃO 83
FIGURA 2.30 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CASCATA DE ENERGIA 85
FIGURA 2.31 – ESCALAS DE COMPRIMENTO E FAIXAS (ℓ) DOS VÓRTICES EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS 87
FIGURA 2.32 – ESPECTRO DE ENERGIA – ESCOAMENTO TURBULENTO 90
FIGURA 2.33 – SOLUÇÃO DO ESCOAMENTO UTILIZANDO MODELO DES 92
FIGURA 3.1 – PERFIL DO VERTEDOURO – ALTERNATIVA INICIAL 95
FIGURA 3.2 – CURVA DE DESCARGA TEÓRICA DO VERTEDOURO 96
FIGURA 3.3 – REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA PRODUZIDA PELA SUBMERGÊNCIA POR JUSANTE 97
FIGURA 3.4 – CONDIÇÕES DE RETENÇÃO DO RESSALTO 98
FIGURA 3.5 – MODELO FÍSICO IMPLANTADO NO CANAL EXPERIMENTAL 100
FIGURA 3.6 – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA TOTAL DAS COMPORTAS 103
FIGURA 3.7 – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA PARCIAL DAS COMPORTAS 104
FIGURA 4.1 – CONSTRUÇÃO DO CANAL EXPERIMENTAL 106
FIGURA 4.2 – PROJETO CONSTRUTIVO DO CANAL – PLANTA, CORTE E ELEVAÇÃO (DIMENSÕES EM ESCALA DE MODELO) 107
FIGURA 4.3 – PROJETO DO VERTEDOURO – CORTE LONGITUDINAL (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO) 108
FIGURA 4.4 – SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO) 110
FIGURA 4.5 – BACIA DE DISSIPAÇÃO E SISTEMA DE RESTITUIÇÃO (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO) 112
FIGURA 4.6 – GEOMETRIA DA COMPORTA SEGMENTO COM DETALHE DA VIGA HORIZONTAL (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO) 114

FIGURA 4.7 – PROJETO DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR INSTRUMENTADA COM TRANSMISSORES ELETRÔNICOS DE PRESSÃO 116
FIGURA 4.8 – PROCESSO DE INSTALAÇÃO DA COMPORTA INSTRUMENTADA COM TRANSMISSORES ELETRÔNICOS DE PRESSÃO 117
FIGURA 4.9 – PROCESSO DE INSTALAÇÃO DA COMPORTA INSTRUMENTADA COM CÉLULAS DE CARGA 119
FIGURA 4.10 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – PROJETO PILOTO (DIMENSÕES EM PROTÓTIPO) 120
FIGURA 4.11 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 1 (DIMENSÕES EM PROTÓTIPO) 121
FIGURA 4.12 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 2 (DIMENSÕES EM PROTÓTIPO) 121
FIGURA 4.13 – SENSORES ELETROMAGNÉTICOS DE VAZÃO E CONVERSORES DE SINAIS 122
FIGURA 4.14 – SENSORES ULTRASSÔNICOS - SISTEMA DE POSICIONAMENTO 123
FIGURA 4.15 – POSICIONAMENTO DOS PIEZÔMETROS 125
FIGURA 4.16 – PAINEL GRADUADO PARA LEITURA PIEZOMÉTRICA 126
FIGURA 4.17 – POSICIONAMENTO DAS TOMADAS DE PRESSÃO INSTANTÂNEA 127
FIGURA 4.18 – TRANSMISSORES ELETRÔNICOS DE PRESSÃO 128
FIGURA 4.19 – CÉLULA DE CARGA DO FABRICANTE HBM S2M 130
FIGURA 4.20 – TRECHOS DA VIGA INFERIOR DA COMPORTA SEGMENTO 131
FIGURA 4.21 – REPRESENTAÇÃO DA GEOMETRIA DA COMPORTA SEGMENTO - PARAVIEW 135
FIGURA 4.22 – REPRESENTAÇÃO DA GEOMETRIA DO VERTEDOURO - PARAVIEW 135
FIGURA 4.23 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – PROJETO PILOTO 137
FIGURA 4.24 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 1 137
FIGURA 4.25 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 2 138
FIGURA 4.26 – *BAFFLES* 139
FIGURA 4.27 – ASPECTO DO ESCOAMENTO – MODELOS DE TURBULÊNCIA 141

FIGURA 4.28 – MALHAS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MALHA.....143
FIGURA 4.29 – RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MALHA.....144
FIGURA 4.30 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA – PROJETO PILOTO – ABERTURA DE 2 M.....147
FIGURA 4.31 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA – ALTERNATIVA 1 – ABERTURA DE 2 M.....148
FIGURA 4.32 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA – ALTERNATIVA 2 – ABERTURA DE 2 M.....149
FIGURA 4.33 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL.....150
FIGURA 4.34 – MENSAGEM DE SAIDA DO *CHECKMESH*.....152
FIGURA 4.35 – CONDIÇÕES DE CONTORNO.....154
FIGURA 4.36 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE AQUISIÇÃO DE NIVEL DE ÁGUA.....159
FIGURA 4.37 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE AQUISIÇÃO DE PRESSÃO.....160
FIGURA 4.38 – POSICIONAMENTO DAS REGIÕES DE AQUISIÇÃO DE ESFORÇOS.....161
FIGURA 5.1 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – PROJETO PILOTO – 1M.....165
FIGURA 5.2 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS – PROJETO PILOTO – 1M.....166
FIGURA 5.3 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES INSTANTÂNEAS – PROJETO PILOTO – 1M.....167
FIGURA 5.4 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO – 1M.....168
FIGURA 5.5 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO – 1M.....169
FIGURA 5.6 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 1 – 1M.....172
FIGURA 5.7 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS – ALTERNATIVA 1 – 1M.....173

FIGURA 5.8 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES INSTANTÂNEAS – ALTERNATIVA 1 – 1M.....174
FIGURA 5.9 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 1 – 1M.....175
FIGURA 5.10 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 1 – 1M.....176
FIGURA 5.11 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 2 – 1M.....179
FIGURA 5.12 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2 – 1M.....180
FIGURA 5.13 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2 – 1M.....181
FIGURA 5.14 – SIMPLIFICAÇÃO ADOTADA NA COMPORTA SEGMENTO.....186
FIGURA 5.15 – ABERTURAS DA COMPORTA SEGMENTO – PROJETO PILOTO 187
FIGURA 5.16 – ABERTURAS DA COMPORTA SEGMENTO – ALTERNATIVA 1.187
FIGURA 5.17 – ABERTURAS DA COMPORTA SEGMENTO – ALTERNATIVA 2.188
FIGURA 5.18 – TIPOS DE ALIMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL.....189
FIGURA 5.19 – EXEMPLO DE ÁGUA ACUMULADA NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA SEGMENTO.....192
FIGURA 5.20 – DOMINIO COMPUTACIONAL COM DIFERENTES LARGURAS .194
FIGURA 5.21 – VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS (ASCENDENTES E DESCENDENTES) EM FUNÇÃO DA LARGURA DO MODELO.....196
FIGURA 5.22 – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA LARGURA DO MODELO.....197
FIGURA 5.23 – METODOLOGIA COMPUTACIONAL.....200

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – PROCESSOS E LEIS FUNDAMENTAIS DO MOVIMENTO 42
QUADRO 2.2 – SOLUCIONADORES LINEARES 63
QUADRO 3.1 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS COMPORTAS SEGMENTO 101

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – ESCALAS DE KOLMOGOROV 87
TABELA 3.1 – ESFORÇOS PARA ABERTURA DA COMPORTA 101
TABELA 3.2 – RESULTADOS NUMÉRICOS – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA TOTAL DAS COMPORTAS 102
TABELA 3.3 – RESULTADOS NUMÉRICOS – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA PARCIAL DAS COMPORTAS 103
TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DOS ENSAIOS REALIZADOS 133
TABELA 4.2 – RESULTADOS OBTIDOS – ABERTURA 6 m 144
TABELA 4.3 – QUANTIDADE DE CÉLULAS RESULTANTES 145
TABELA 5.1 – COMPARATIVO DA CAPACIDADE DE DESCARGA – PROJETO PILOTO 164
TABELA 5.2 – COMPARATIVO DA CAPACIDADE DE DESCARGA – ALTERNATIVA 1 171
TABELA 5.3 – COMPARATIVO DA CAPACIDADE DE DESCARGA – ALTERNATIVA 2 178

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

2D - Duas Dimensões
3D - Três Dimensões
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
CEHPAR - Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza
CFD - *Computational Fluid Dynamics*
CFL - *Courant-Friedrichs-Lewy*
COPEL - Companhia Paranaense de Energia
CSF - *Continuum Surface Force*
DES - *Detached Eddy Simulation*
DIN - Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização)
DNS - *Direct Numerical Simulation*
EDPs - Equações Diferenciais Parciais
Elv - Elevação
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
FDM - *Finite Difference Method*
FEM - *Finite Element Method*
FVM - *Finite Volume Method*
GPL - *General Public License*
GUIs - *Graphical User Interfaces*
HBM - *Hottinger Baldwin Messtechnik*
LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LES - *Large Eddy Simulation*
MN - Meganewton
NAJ - Nível de Água de Jusante
NAM - Nível de Água de Montante
NAR - Nível de Água do Reservatório
NBR - Norma Brasileira
OPENFOAM - *Open Field Operation and Manipulation*
P&D - Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento
PDEs - *Partial Differential Equations* (Equações Diferenciais Parciais)
PIMPLE - *Piso-Simple Merged*

PISO - *Pressure Implicit with Splitting of Operators*

PVC - Policloreto de Vinil

RANS - *Reynolds Averaged Navier* – Stokes

RNG - *Renormalization Group*

SGS - *Smagorinsky Subgrid Scale*

SIMPLE - *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

SST - *Shear Stress Transport*

STL - *Stereolithography)*

UHE - Usina Hidrelétrica

USBR - *United States Bureau of Reclamation*

VOF - *Volume of Fluid*

VTK - *Visualization Toolkit*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 22
1.1 OBJETIVOS 23
1.1.1 Objetivo Geral 23
1.1.2 Objetivos Específicos 23
1.2 JUSTIFICATIVA 24
2 REVISÃO DE LITERATURA 25
2.1 COMPORTA SEGMENTO 25
2.1.1 Conceito 25
2.1.2 Submergência 28
2.1.2.1 Usina Hidrelétrica Santo Antônio 28
2.1.2.2 Usina Hidrelétrica Jirau 30
2.1.2.3 Usina Hidrelétrica Belo Monte 33
2.1.3 Esforços Hidrostáticos e Hidrodinâmicos 35
2.1.3.1 *Downpull* 36
2.1.3.2 *Uplift* 36
2.2 RESSALTO HIDRÁULICO 37
2.2.1 Profundidade Conjugada 38
2.2.2 Tipos de Ressalto Hidráulico 39
2.2.2.1 Ressalto Ondulado (1 < Fr < 1,7) 40
2.2.2.2 Ressalto Fraco ou Pré-Ressalto (1,7 < Fr < 2,5) 40
2.2.2.3 Ressalto Oscilante (2,5 < Fr < 4,5) 40
2.2.2.4 Ressalto Estacionário (4,5 < Fr < 9,0) 41
2.3 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DO MOVIMENTO DO FLUIDO 41
2.3.1 Conservação de Massa 42
2.3.2 Quantidade de Movimento 44
2.3.3 Equação de Navier-Stokes 49
2.4 DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAL 52
2.4.1 Conceito 52
2.4.2 Processo de Discretização 53
2.4.2.1 Modelagem do Domínio Físico e dos Fenômenos Físicos 54
2.4.2.2 Discretização do Domínio 55
2.4.2.3 Malha 56

2.4.2.4 Condição de Contorno....57
2.4.2.5 Condições Iniciais....58
2.4.2.6 Discretização das Equações....59
2.4.2.7 Soluções Numéricas....62
2.4.3 Software OpenFOAM® 66
2.4.3.1 Solver *interFoam* 68
2.4.3.2 Qualidade da Malha 73
2.5 TURBULÊNCIA....74
2.5.1 Origem....74
2.5.2 Conceitos Fundamentais....76
2.5.2.1 Turbulência de Parede 77
2.5.2.2 Turbulência Livre....77
2.5.3 Média Temporal de Reynolds....80
2.5.4 Escalas de Turbulência e Espectro de Energia Cinética Turbulenta....84
2.5.4.1 Escalas de Turbulência 85
2.5.4.2 Espectro de Energia Cinética Turbulenta 88
2.5.5 Modelo de Turbulência RANS....90
2.5.6 Modelo de Turbulência LES 91
2.5.7 Modelo Híbrido RANS-LES (DES) 91
3 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO PROJETO PILOTO 94
3.1 PERFIL DO VERTEDOURO 94
3.2 CAPACIDADE DE DESCARGA....95
3.3 LARGURA DO VÃO 99
3.4 CARACTERÍSTICAS DA COMPORTA SEGMENTO....100
3.5 GEOMETRIA DOS PILARES 102
3.6 CONDIÇÕES DO ESCOAMENTO....102
4 MATERIAIS E MÉTODOS 105
4.1 MODELO FÍSICO....105
4.1.1 Instalação do Modelo Hidráulico Reduzido 105
4.1.2 Comporta Segmento 113
4.1.2.1 Comporta segmento projetada para uso de transmissores eletrônicos de pressão 115
4.1.2.2 Comporta segmento projetada para uso de células de carga 118
4.1.3 Geometria das Alternativas 119

4.1.4 Medição de Resultados 121
4.1.4.1 Medidores de vazão 122
4.1.4.2 Medidores de níveis de água 122
4.1.4.3 Medidores de pressão 124
4.1.4.4 Medidores de esforços 128
4.1.5 Definição dos Ensaios 131
4.2 MODELO COMPUTACIONAL 134
4.2.1 Modelagem do Domínio Físico e dos Fenômenos Físicos 134
4.2.1.1 Geometria das Alternativas 134
4.2.1.2 *Baffles* 138
4.2.1.3 Análise de Sensibilidade do Modelo de Turbulência 139
4.2.2 Discretização do Domínio 142
4.2.2.1 Malha Computacional 142
4.2.2.2 Condições de Contorno 152
4.2.2.3 Condições Iniciais 155
4.2.2.4 Discretização das Equações 155
4.2.2.5 Soluções Numéricas 156
4.2.3 Pontos e Regiões de Aquisição de Resultados 157
4.2.3.1 Medidores de Níveis de Água 157
4.2.3.2 Medidores de Pressão 157
4.2.3.3 Medidores de Esforços 158
4.2.4 Definição das Simulações 161
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 162
5.1 COMPARATIVO ENTRE O MODELO FÍSICO E COMPUTACIONAL 162
5.1.1 Projeto Piloto 162
5.1.1 Alternativa 1 170
5.1.2 Alternativa 2 177
5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 182
5.2.1 Análise Comparativa – Níveis de água 182
5.2.2 Análise Comparativa – Pressões 183
5.2.3 Análise Comparativa – Esforços 183
5.3 METODOLOGIA COMPUTACIONAL 185
5.3.1 Representação Geométrica das Estruturas 185
5.3.2 Vertedouro 185

5.3.3 Comporta....186
5.3.3.1 Alimentação....188
5.3.3.2 *Baffles* 189
5.3.4 Definição da Malha Computacional....189
5.3.5 Modelo de Turbulência....190
5.3.6 Condições Iniciais, Passo de tempo e Período de simulação 190
5.3.7 Quantificação dos Esforços Hidrodinâmicos 191
5.3.8 Validação dos Resultados....191
5.3.9 Correção dos Esforços Hidrodinâmicos 191
5.3.10 Limitações e Incertezas....193
5.3.10.1 Esforço Computacional 193
5.3.10.2 Quantidade de Elementos na Largura....193
5.3.10.3 Arquivo *interfaceHeight* na versão 9....198
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 201
REFERÊNCIAS....206
ANEXO 1 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO – ABERTURA 4 M – PROJETO PILOTO....211
ANEXO 2 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO – ABERTURA 4 M – ALTERNATIVA 1 213
ANEXO 3 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO – ABERTURA 4 M – ALTERNATIVA 2 215
ANEXO 4 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – PROJETO PILOTO....217
ANEXO 5 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS E INSTANTÂNEAS – PROJETO PILOTO....220
ANEXO 6 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO....228
ANEXO 7 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO....233
ANEXO 8 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 1 238
ANEXO 9 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS E INSTANTÂNEAS – ALTERNATIVA 1 240

ANEXO 10 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 1 246
ANEXO 11 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA1 250
ANEXO 12 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 2 254
ANEXO 13 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2 257
ANEXO 14 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2 261

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o setor energético brasileiro tem mostrado importantes mudanças na exploração dos aproveitamentos hidroelétricos. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2020, as regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil concentram o maior potencial hidroelétrico do país, com destaque para as usinas de baixa queda na região Norte, como a UHE Jatobá, no rio Tapajós, e a UHE Jardim do Ouro, no rio Jamanxim. Além disso, há projetos de empreendimentos futuros em outras regiões do país, como a UHE Iraí, no rio Uruguai, e a UHE Ercilâncida, no rio Piquiri, com características semelhantes à de usinas de baixa queda.

A expansão hidrelétrica brasileira prevê a construção de usinas de baixa queda, constituídas por vertedouros com alto grau de submergência por jusante. Nesses casos, o ressalto hidráulico oscilante é frequentemente deslocado contra a comporta segmento através do impacto das ondas na viga inferior da comporta, podendo gerar esforços hidrodinâmicos imprevistos e ainda não completamente conhecidos.

Tendo em conta a importância das obras construídas recentemente e as que serão construídas nos próximos anos no Brasil, este estudo tem como principal motivação estabelecer uma metodologia computacional capaz de verificar os esforços hidrodinâmicos incidentes sobre as comportas destas obras, considerando solicitações que poderão ocorrer durante sua operação. O conhecimento desses esforços poderá subsidiar a flexibilização de regras de operação e a definição de reforços necessários para garantir a segurança da estrutura.

A utilização de um modelo numérico em conjunto com a modelagem física, permite agregar a potencialidade das duas metodologias, no sentido de se obter resultados mais confiáveis e passíveis de reprodução para obras semelhantes. No presente estudo, serão utilizados os resultados obtidos em modelo hidráulico reduzido, a fim de se calibrar/validar o modelo computacional desenvolvido. Visto isso, o desenvolvimento de uma metodologia computacional torna-se uma ferramenta importante, muitas vezes mais viável, na busca pela otimização de prazos e redução de custos, em projetos e verificações de vertedouros de baixa queda, sujeitos a esforços hidrodinâmicos incidentes na viga inferior de comportas segmento.

Este documento apresenta parte dos resultados obtidos no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) ANEEL, identificado pelo código PD-06491-0445/2017 e intitulado “Critério Empírico e Metodologia Computacional para a estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico”, no que diz respeito a metodologia computacional. O projeto foi financiado pela proponente Copel Geração e Transmissão S.A. e desenvolvido pelas seguintes empresas executoras: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) responsável pelo desenvolvimento do modelo físico e Intertechne Consultores S.A., responsável pela modelagem computacional hidráulica e estrutural. O principal objetivo desse Projeto de Pesquisa foi o desenvolvimento de um critério empírico e uma metodologia computacional para estimativa de esforços gerados pelo impacto das ondas do ressalto hidráulico na viga inferior de comportas segmento, sendo que para isso foram desenvolvidas técnicas de instrumentação, validação do uso da modelagem computacional com base nos resultados obtidos em modelo físico, além da medição e avaliação dos esforços atuantes na viga inferior.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia computacional, para estimar os esforços hidrodinâmicos gerados pelo impacto das ondas do ressalto hidráulico na viga inferior de comportas segmento. A metodologia desenvolvida utilizará os resultados obtidos no modelo hidráulico reduzido, para calibrar e validar o modelo numérico, a fim de viabilizar o uso dessa técnica na determinação dos esforços. Para se atingir o objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1.1.2 Objetivos Específicos

a) Validar o uso da metodologia computacional, desenvolvida no software OpenFOAM®, para a determinação dos esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior de comportas segmento, afogadas por jusante. Para isso, serão

comparados os resultados obtidos no modelo computacional com os resultados provenientes do modelo hidráulico reduzido;

b) Verificar a influência da largura do modelo computacional, na magnitude dos esforços hidrodinâmicos, registrados durante a simulação numérica;
c) Disponibilizar informações que possam auxiliar em pesquisas e projetos futuros, no que se refere a escolha da utilização da modelagem computacional, assim como na definição da largura do modelo a ser simulado, para a determinação de esforços hidrodinâmicos ou em aplicações semelhantes às verificadas neste trabalho.

1.2 JUSTIFICATIVA

Existem diversos estudos teóricos e experimentais voltados para a análise da turbulência e das ondas geradas pelo ressalto hidráulico, porém, eles se concentram em temas como erosões a jusante da bacia de dissipação, a estabilidade da própria bacia e dos muros laterais do vertedouro. Visto que, atualmente não há critérios ou metodologias amplamente conhecidos, que permitam estimar os esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior de comportas segmento, torna-se evidente a relevância do desenvolvimento de uma metodologia computacional. Essa metodologia avançará em questões ainda pouco exploradas e poderá ser utilizada tanto para subsidiar as estimativas de esforços hidrodinâmicos atuantes em comportas segmento, durante a fase de projeto, quanto a verificação de estruturas já construídas.

Além disso, a busca pela otimização de prazos e redução de custos, em um cenário de crescente competitividade no mercado de projeto e construção, tem gerado uma demanda por estruturas de comportas cada vez mais esbeltas, do ponto de vista estrutural. Uma vez que essas estruturas podem estar mais suscetíveis a esforços hidrodinâmicos, o conhecimento desses esforços e de sua influência podem subsidiar soluções mais assertivas, permitindo a exploração de diferentes configurações geométricas da estrutura.

Por fim, a metodologia computacional desenvolvida será aplicável a qualquer empreendimento caracterizado por vertedouros controlados, de baixa queda e sujeito aos efeitos da submergência pelos níveis de água a jusante.

2 REVISÃO DE LITERATURA

No presente capítulo é apresentada a revisão da literatura necessária para o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são apresentadas as definições e os conceitos importantes, relacionados a comporta segmento, ressalto hidráulico e esforços hidrodinâmicos. Na sequência, são apresentadas as equações fundamentais e os conceitos de dinâmica do fluído computacional. Por fim, são explicitados os aspectos turbulentos do fluido

2.1 COMPORTA SEGMENTO

2.1.1 Conceito

As sociedades hidráulicas da Antiguidade se caracterizavam por pequenas comunidades agrícolas, localizadas nas margens de grandes rios, onde construíam obras para melhorar o uso dos recursos hídricos. A principal atividade dessas sociedades era a agricultura de regadio, na qual o fornecimento de água para as plantas era cuidadosamente controlado, garantindo a quantidade necessária no momento adequado. Para isso, realizavam o armazenamento de água por meio de pequenas barragens e a distribuíam por canais laterais. Com a evolução da sociedade, foram construídas barreiras móveis, capazes de liberar o excesso de água quando removidas, estruturas essas, que são conhecidas atualmente como comportas.

O conceito de comporta segmento surgiu na França, pelo engenheiro Poirée há mais de 150 anos. A primeira referência ao seu uso foi no rio Sena, onde foram instaladas quatro comportas, com 8,75 m de largura e 1 m de altura, com braços submetidos à compressão, construídas por Poirée (ERBISTE, 1987). Mais tarde, em 1886, a comporta conhecida como radial foi patenteada nos Estados Unidos.

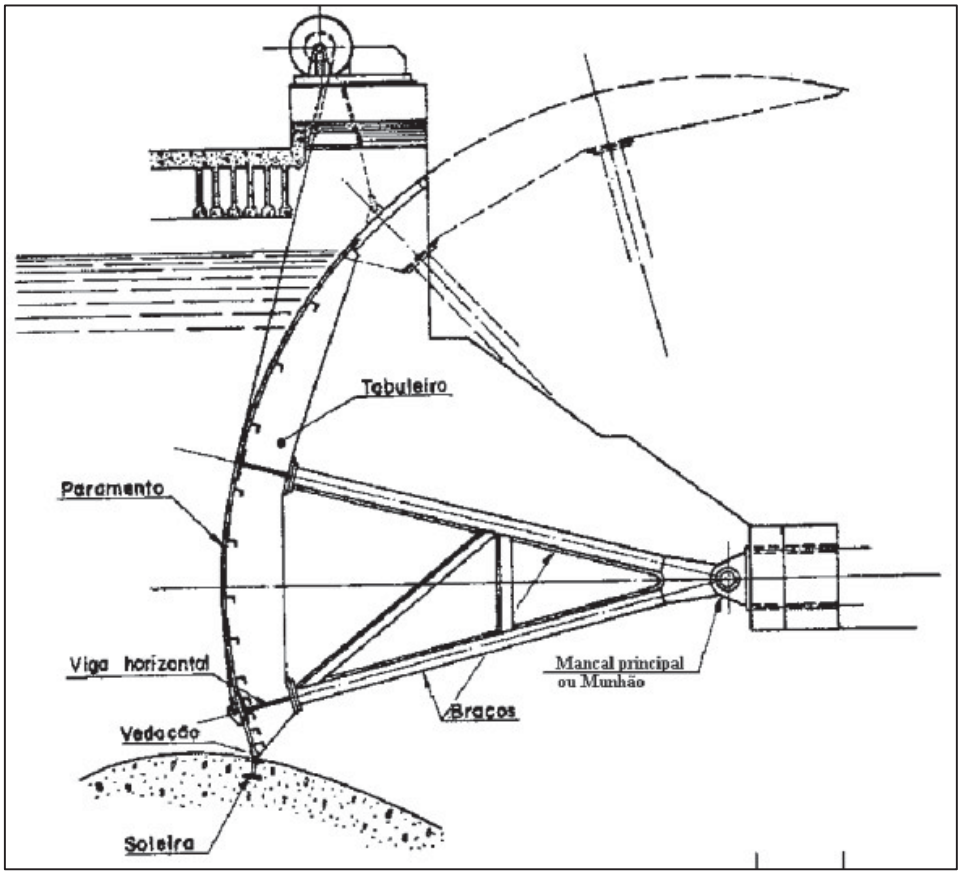
Atualmente, a comporta do tipo radial tem sido amplamente utilizada, com estruturas de dimensões cada vez maiores e mais esbeltas. Como exemplo de comporta com grandes dimensões, pode se citar três das comportas do vertedouro da barragem de Horseshoe, no Arizona – Estados Unidos, com quase 35 m de largura e 8 m de altura, conforme apresentado na FIGURA 2.1.

FIGURA 2.1 – COMPORTAS DA BARRAGEM DE HORSESHOE – ARIZONA

FONTE: Bandy (2022).

A NBR 7259/2001 define as comportas do tipo segmento como comportas de rotação, com um paramento curvo correspondente a um segmento de cilindro com diretriz circular. Essas comportas possuem braços radiais, que transmitem a pressão hidráulica para mancais fixos, sendo que o perfil do tabuleiro é um segmento circular. A FIGURA 2.2 ilustra a comporta segmento, que gira em torno de um eixo horizontal, que passa através dos centros dos mancais, coincidindo com o centro do raio de curvatura do paramento.

FIGURA 2.2 – COMPORTA SEGMENTO



FONTE: ABNT (2001).

As principais vantagens das comportas do tipo segmento são:

a) Boa adaptabilidade em termos de projeto, construção e instalação;
b) Não necessitam de ranhuras nos pilares para seu suporte, eliminando a perturbação potencial do escoamento e apresentando melhor coeficiente de descarga que as comportas verticais;
c) Mais adaptabilidade para controle automático, em comparação com outros tipos de comporta;
d) Exige pouca capacidade de içamento, visto que seu fechamento é feito por gravidade;
e) Trabalha basicamente a compressão.

Levando em consideração as características e vantagens apresentadas, pode se dizer que as comportas do tipo segmento são provavelmente as mais amplamente utilizadas para o controle de vazão em vertedouros com ogiva.

2.1.2 Submergência

Em situações em que a ogiva do vertedouro está posicionada bem acima do nível de água de jusante, a posição de equilíbrio do ressalto hidráulico se afasta da comporta, fazendo com que o escoamento se torne supercrítico e não exerça influência sobre a vazão. Nesses casos, as cargas hidrostáticas incidem sobre o paramento de montante da comporta. Já em uma aplicação específica de afogamento da comporta segmento, o ressalto hidráulico não encontra condição de equilíbrio no canal e se move para montante até encontrar a comporta segmento. Com o afogamento do escoamento, uma zona de turbulência é gerada, submetendo a estrutura da comporta a esforços hidrodinâmicos por jusante.

Existe uma preocupação quanto a ocorrência de ressalto hidráulico e outras perturbações que possam afetar o desempenho da comporta, além do efeito de fadiga, ao qual a estrutura pode estar sujeita. A literatura sobre esse fenômeno ainda é consideravelmente limitada, sendo a avaliação e caracterização desses impactos, o objetivo principal do presente estudo.

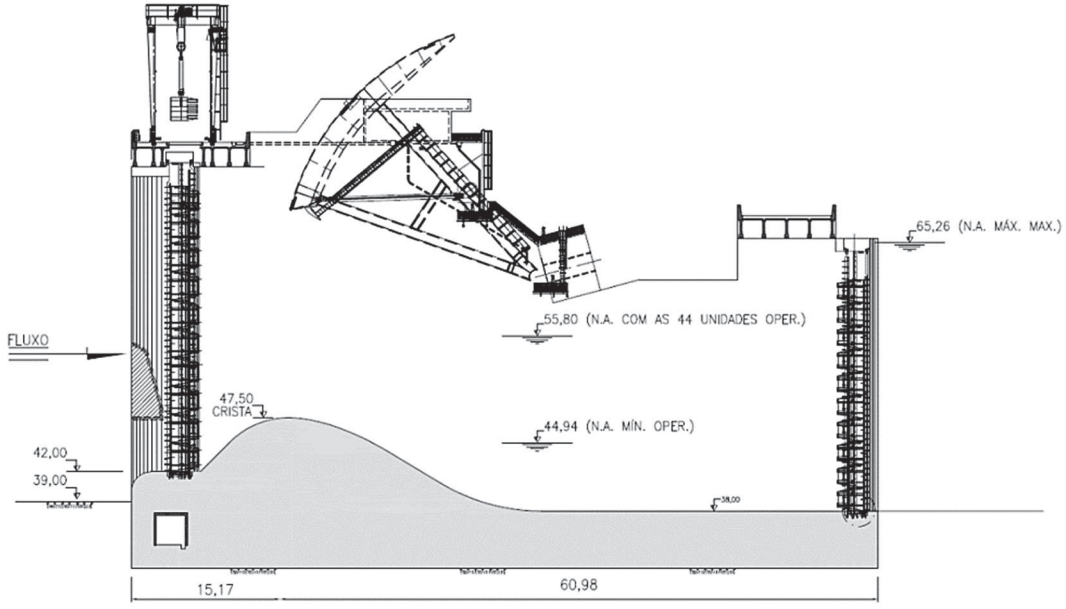
No Brasil, existem empreendimentos de baixa e média queda localizados em rios de grande porte, os quais estão associados a vazões de cheias elevadas. Por isso, a vazão específica desses rios resulta na necessidade de comportas de grandes dimensões, com a soleira do vertedouro frequentemente localizada abaixo dos níveis de água de jusante. Como exemplo desse tipo de empreendimento, citam-se, Usina Hidrelétrica Santo Antônio e Usina Hidrelétrica Jirau, no rio Madeira e Usina Hidrelétrica Belo Monte, no rio Xingu.

2.1.2.1 Usina Hidrelétrica Santo Antônio

Localizada no rio Madeira, no município de Porto Velho, em Rondônia, a usina possui dois vertedouros, com crista na Elv. 47,50 m, sendo a usina operada a fio d’água, ou seja, o reservatório não acumula grandes volumes de água e seu nível máximo normal encontra-se na Elv. 71,30 m. Para garantir a vazão de dimensionamento de 84.000 m³/s, o vertedouro é controlado por 18 comportas do tipo segmento (15 comportas no vertedouro principal e 3 comportas no vertedouro auxiliar), com 20 m de largura e aproximadamente 24,2 m de altura, conforme ilustrado na FIGURA 2.3. Para vazões máximas turbinadas superiores a 25.000 m³/s (nível de

água normal de jusante de 55,80 m), é necessário operar o vertedouro, resultando em um afogamento de cerca de 9 m acima do ponto de apoio das comportas (Elv. 46,82 m). Além disso, o nível de água Máximo Maximorum é de 65,26 m, aproximadamente 18 m acima da crista do vertedouro. A FIGURA 2.4 ilustra as comportas do tipo segmento, do vertedouro auxiliar da UHE Santo Antônio, em situação de afogamento por jusante, porém, elas não se encontram em operação.

FIGURA 2.3 – UHE SANTO ANTÔNIO – SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOURO



FONTE: Adaptado de Povh, Araujo Filho e Vanz (2013).

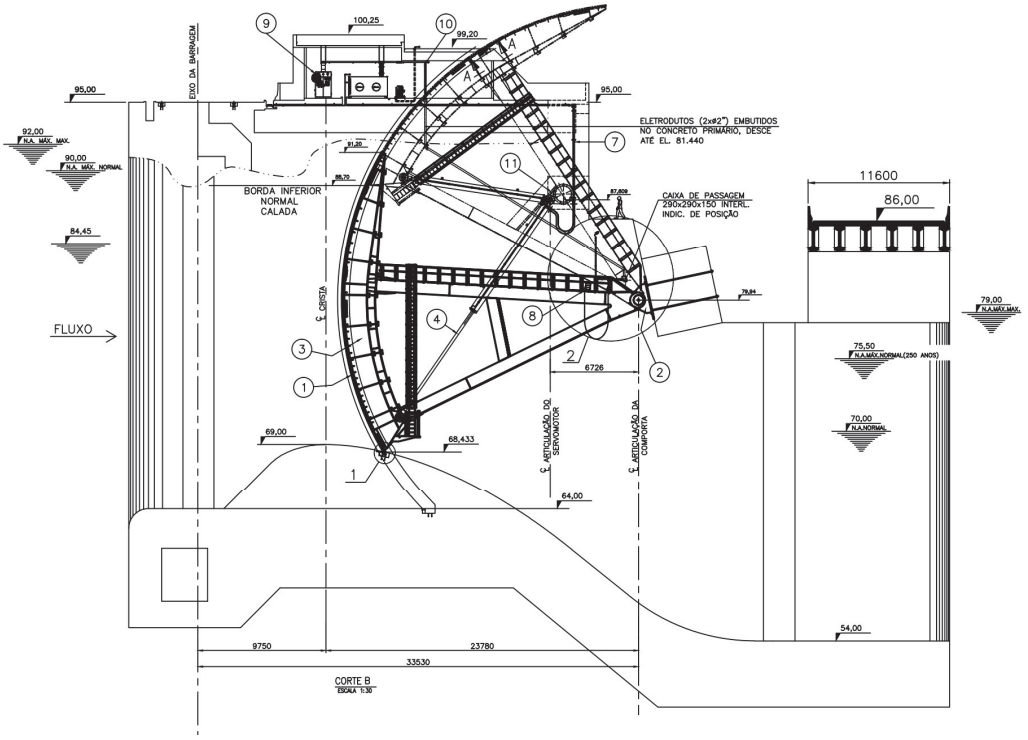
FIGURA 2.4 – UHE SANTO ANTÔNIO – VERTEDOURO AUXILIAR

FONTE: Santo Antônio Energia (2023).

2.1.2.2 Usina Hidrelétrica Jirau

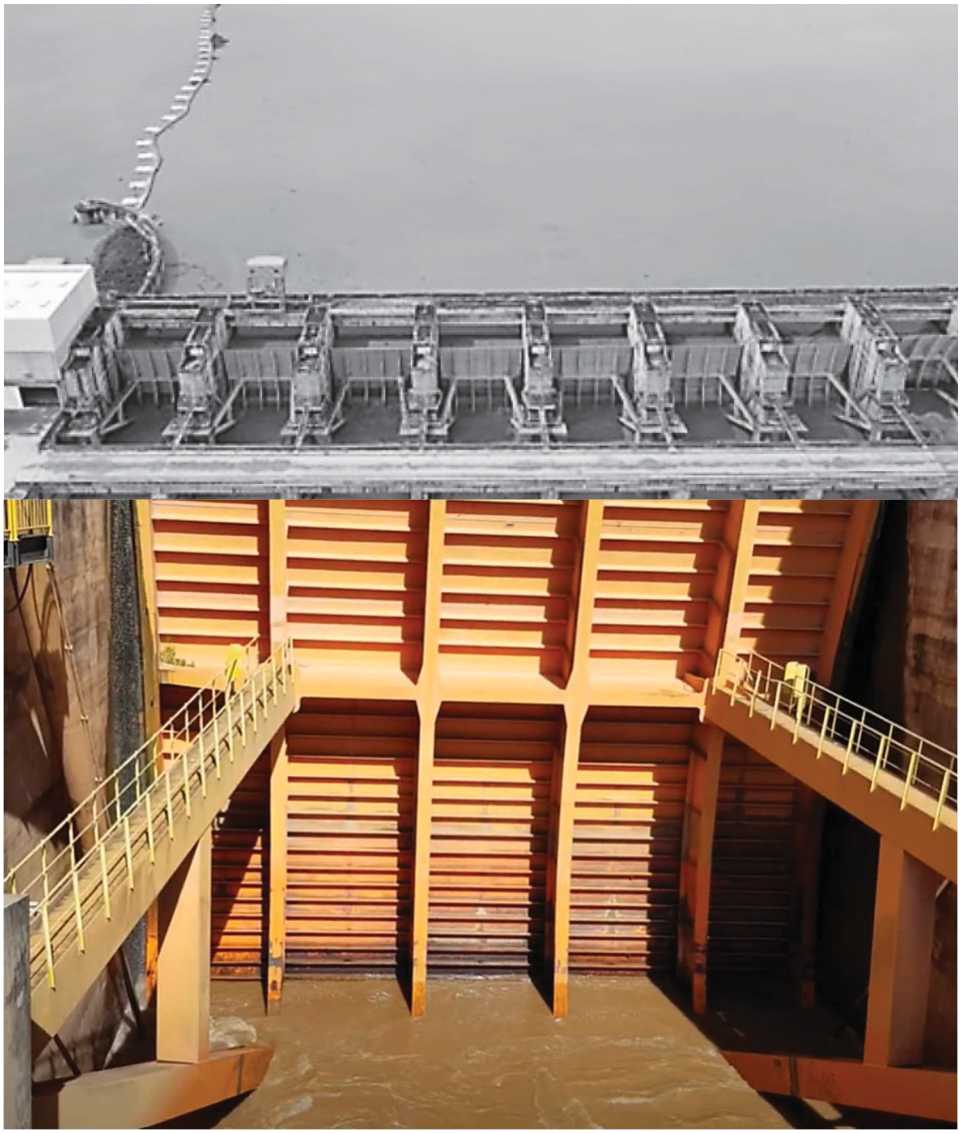
Localizada a montante da UHE Santo Antônio, no rio Madeira, a usina possui um vertedouro principal com 18 vãos e crista na Elv. 69,00 m. Para garantir a vazão de dimensionamento de 82.600 m³/s, o vertedouro é controlado por 18 comportas do tipo segmento, com 20 m de largura e aproximadamente 22 m de altura, conforme ilustrado na FIGURA 2.5. O nível de água máximo normal de jusante situa-se na Elv. 74,00 m, resultando em um afogamento de cerca de 5,8 m acima do ponto de assentamento da comporta (Elv. 68,43 m). Além disso, o nível de água Máximo Maximorum é de 92,00 m, cerca de 24 m acima da crista do vertedouro. A FIGURA 2.6 ilustra as comportas do tipo segmento, do vertedouro da UHE Jirau, em situação de afogamento por jusante.

FIGURA 2.5 – UHE JIRAU – SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOURO



FONTE: Adaptado de Nardy, Pedrazzi e Maia (2014).

FIGURA 2.6 – UHE JIRAU – VERTEDOURO



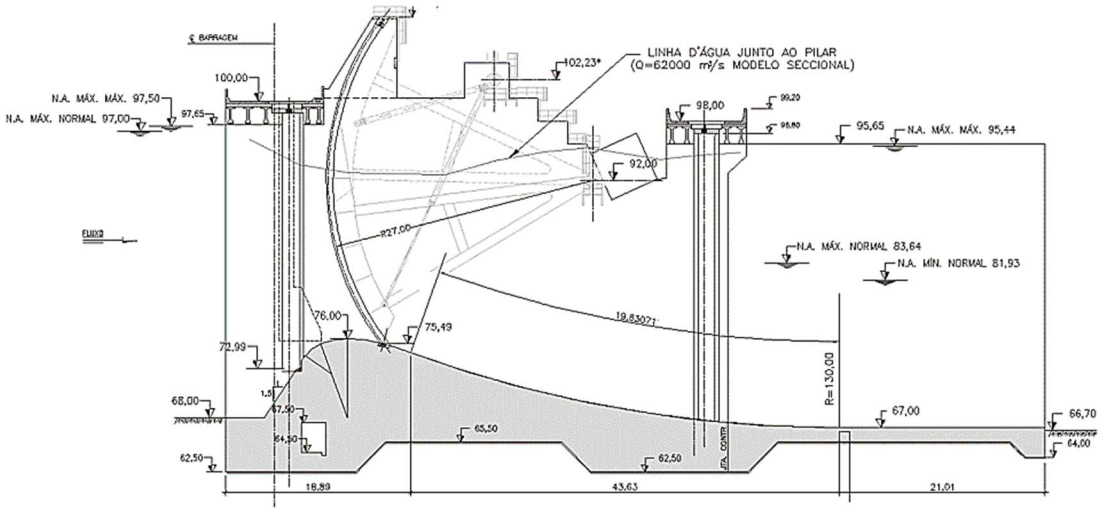
FONTE: Adaptado de Erbiste (2002) e TRACTEBEL ENGIE (2024).

Em 2014 o Rio Madeira passou por uma cheia histórica, caracterizada por um aumento incomum em seu nível de água, com uma vazão registrada na usina de 54.000 m³/s. Nessa ocasião a hidrelétrica de Santo Antônio adotou medidas para suspender as operações por dois meses, de modo a preservar a integridade das unidades geradoras. Visto isso, a justiça condenou a usina a refazer seus estudos de impactos da cheia.

2.1.2.3 Usina Hidrelétrica Belo Monte

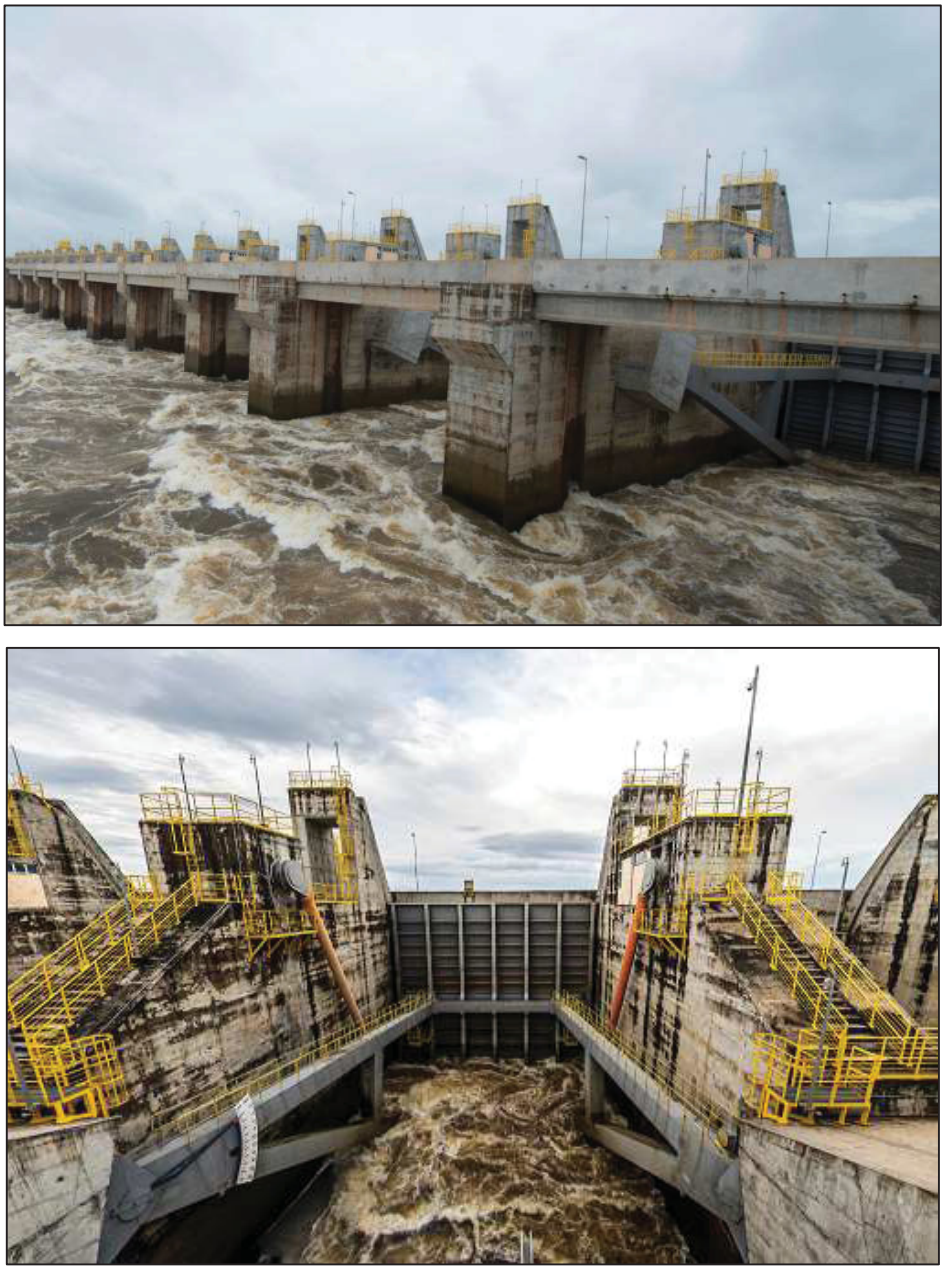
O complexo hidrelétrico de Belo Monte, localizado no rio Xingu, nos municípios de Altamira e Vitória do Xingu, no Estado do Pará, possui uma capacidade instalada de 11.233 MW, proveniente da casa de força principal, situada no Sítio Belo Monte, e da casa de força complementar, no Sítio Pimental, sendo, portanto, o maior empreendimento hidrelétrico integralmente construído em território nacional. A usina conta com um vertedouro do tipo perfil Creager, com crista na Elv. 76,00 m, dimensionado para descarregar a cheia decamilenar, estimada em 62.000 m³/s, com o nível de água Máx. Maximorum no reservatório na Elv. 97,50 m. O vertedouro é controlado por 18 comportas do tipo segmento, cada uma com 20,00 m de largura e 22,00 m de altura, conforme indicado no perfil longitudinal apresentado na FIGURA 2.7. O vertedouro do Sítio Pimental abriga a casa de força complementar, destinada a regularização das vazões a jusante do barramento. Em condições normais de operação, o nível de água a jusante atinge aproximadamente 83,60 m, resultando em um afogamento de 8,11 m das comportas. A FIGURA 2.8 ilustra as comportas do tipo segmento do vertedouro da UHE Belo Monte, submersas pelos níveis de água de jusante.

FIGURA 2.7 – UHE BELO MONTE (SÍTIO PIMENTAL) – SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOURO



FONTE: Adaptado de Araujo Filho e Ota (2016).

FIGURA 2.8 – UHE BELO MONTE (SÍTIO PIMENTAL) – VERTEDOURO



FONTE: Adaptado de Norte Energia (2023).

O projeto das comportas da Usina Hidrelétrica de Belo Monte, considerou um reforço estrutural extra; entretanto, os esforços atuantes, necessários para o dimensionamento, não foram determinados.

Cabe ressaltar que, até o momento, não há notícias públicas de problemas causados pela incidência do ressalto nas comportas dos vertedouros das usinas mencionadas. Um fator que, aparentemente, favorece esse aspecto, é a possibilidade dessas comportas terem sido projetadas de forma mais robusta do que é usual

atualmente. Em outras palavras, a maior robustez das comportas mais antigas, em parte devido ao cálculo estrutural majorado, permitiu a acomodação de fenômenos não conhecidos de forma íntegra.

Além das usinas mencionadas, existem outros empreendimentos com vertedouros submergidos por jusante no Brasil. Neste contexto, destacam-se o vertedouro da Usina Hidrelétrica de Estreito, no rio Tocantins, com um afogamento de aproximadamente 1,7 m em relação ao nível de água máximo normal, e o vertedouro da Usina Hidrelétrica de Baixo Iguaçu, no rio Iguaçu, com um afogamento da ordem de 2,6 m.

2.1.3 Esforços Hidrostáticos e Hidrodinâmicos

As comportas hidráulicas são projetadas para controlar o fluxo de água a montante, estando, portanto, sujeitas a cargas hidráulicas que podem apresentar diferentes características, dependendo das condições de operação e do tipo da estrutura. Segundo Daniel e Paulus (2019), as principais cargas hidráulicas a serem consideradas em projetos de comportas, incluem as forças hidrostáticas, resultantes da diferença de nível de água, as ondas de longos períodos ou flutuação, e as forças hidrodinâmicas, que podem ser causadas por ondas significativas, induzidas pelo vento, turbulência ou impacto do escoamento.

Quando uma comporta segmento está totalmente fechada, o escoamento represado tende a estar em repouso, de modo que as pressões obedecem às leis hidrostáticas, e os esforços hidráulicos podem ser facilmente determinados por métodos analíticos. Nesse contexto, conforme mencionado por Erbiste (1987), a componente vertical das forças hidráulicas atuantes sobre a comporta, pode ser determinada pelo empuxo de Arquimedes, enquanto a carga piezométrica pode ser obtida por meio de diagramas de pressão. No entanto, em situações em que a comporta está parcialmente aberta, o escoamento em alta velocidade, provoca uma redução de pressão na região da parte inferior da comporta, resultando na distribuição não uniforme da carga piezométrica no conduto. Tendo em conta que o equilíbrio hidrostático é desfeito, as forças hidrodinâmicas não podem ser determinadas por diagramas de pressão, tornando-se necessária uma análise adicional do fenômeno dinâmico.

As forças hidrodinâmicas incidentes sobre as comportas do tipo segmento, associadas ao empuxo da água, podem ser classificadas da seguinte maneira:

2.1.3.1 *Downpull*

O esforço de *downpull* (ou apenas "*downpull*") é uma força hidrodinâmica de direção descendente, exercida pela água sobre a estrutura da comporta, particularmente na região próxima a soleira do vertedouro, durante seu processo de abertura ou operação intermediária entre as posições totalmente fechada e totalmente aberta. O escoamento leva a um aumento de velocidade do fluido, resultando em uma diminuição de pressão na face inferior da comporta, provocada pela conversão de energia potencial em energia cinética e pela mudança na direção do escoamento. Na parte superior da comporta, a pressão é apenas ligeiramente afetada pelas condições estáticas (pressão total do reservatório), de acordo com Naudascher, Kobus e Rao (1964). Os autores afirmam ainda que a porção principal da força de *downpull* é proveniente da diferença entre as forças de pressão entre as faces inferior da comporta, gerando uma força vertical no sentido descendente. Visto isso, o conhecimento dessa força hidrodinâmica é imprescindível para o dimensionamento do mecanismo de elevação e para a segurança do projeto. Por outro lado, a falta de compreensão sobre esse fenômeno pode resultar no efeito oposto, conhecido como *uplift*, que impulsiona a comporta no sentido ascendente do fluxo.

2.1.3.2 *Uplift*

Ao contrário da força de *downpull*, o esforço hidrodinâmico de *uplift* tende a empurrar a comporta para cima. Essas forças são mais acentuadas nas faixas de maiores aberturas da comporta.

Por fim, Novak *et al*. (2007) recomendam que as forças hidrodinâmicas atuantes em uma comporta sejam analisadas em diversas condições operacionais, por meio de considerações teóricas, testes experimentais, bem como modelos numéricos, se necessário.

2.2 RESSALTO HIDRÁULICO

O fenômeno conhecido como ressalto ou salto hidráulico é amplamente estudado em canais, principalmente a jusante de comportas, onde é utilizado como dissipador da energia cinética do escoamento. Chanson (2009) descreve que o ressalto hidráulico é formado na transição do escoamento em regime supercrítico ou torrencial (Fr > 1), para o regime subcrítico ou fluvial (Fr < 1), conforme apresentado na FIGURA 2.9. Esse fenômeno pode ser classificado em termos do número de Froude (Equação (2.1)), considerando os princípios da continuidade e da quantidade de movimento, que estabelecem uma relação entre as profundidades do fluxo a montante e a jusante.

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{gh}} \tag{2.1}$$

Onde,

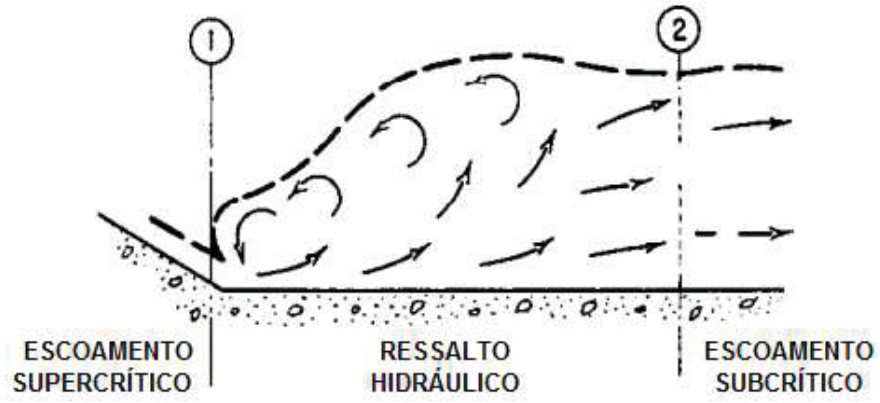
v = velocidade do escoamento (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

h = profundidade do escoamento (m).

Segundo Porto (2006), no processo de formação do ressalto hidráulico, ocorre uma elevação brusca do nível de água até uma profundidade média em uma seção, a partir da qual o nível de água é basicamente igual ao nível de energia. Essa instabilidade na superfície favorece a incorporação de ar, de modo que a turbulência gerada no interior do ressalto, juntamente com o movimento dos rolos de água, resulta em uma dissipação significativa de energia.

FIGURA 2.9 – RESSALTO HIDRÁULICO

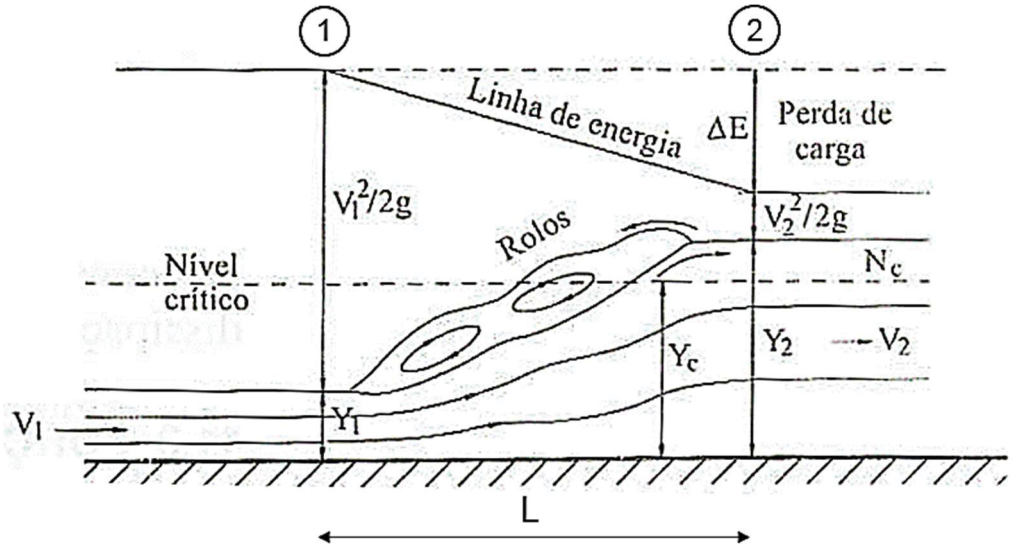


FONTE: Adaptado de Peterka (1984).

2.2.1 Profundidade Conjugada

A mudança abrupta de profundidade do regime supercrítico para o subcrítico do ressalto hidráulico, resulta na transformação de parte da energia cinética ($V^2/2g$), por meio da turbulência, em energia potencial. A FIGURA 2.10 ilustra esquematicamente as medidas do ressalto hidráulico propostas por Porto (2006) entre as seções 1 e 2, onde V1 representa a velocidade média no início do ressalto hidráulico (m/s), e Y1 e Y2 são as profundidades conjugadas (m), sendo a diferença entre elas (Y1-Y2) denominada altura do ressalto (m). Além disso, Yc é a profundidade crítica do escoamento (m), L é o comprimento do ressalto hidráulico (m), e V2 é a velocidade média a jusante do ressalto hidráulico (m/s). A perda de carga, em metros, é representada pela diferença de cotas na linha de energia ($\Delta E = E1 – E2$).

FIGURA 2.10 – CONFIGURAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO



FONTE: Adaptado de Porto (2006).

Bélanger (1828) desenvolveu uma equação capaz de determinar as profundidades conjugadas Y1 e Y2, baseada na conservação da quantidade de movimento. A equação considera a ocorrência de pressão hidrostática, a distribuição uniforme de velocidades, a seção do canal retangular, o fundo horizontal e plano, o escoamento permanente, além de desconsiderar a tensão de cisalhamento junto ao fundo do canal, conforme detalhado na Equação (2.2) a seguir:

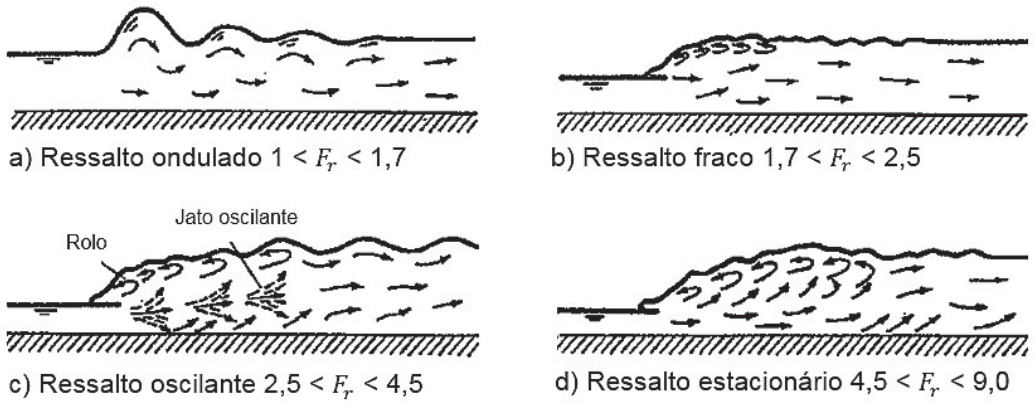
$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8{F_{R1}}^2} - 1\right) \tag{2.2}$$

Onde Y1 e Y2 representam as profundidades conjugadas do escoamento nas seções 1 (regime supercrítico) e 2 (regime subcrítico), em metros, e F_{R1} é o número de Froude a montante do ressalto hidráulico (seção 1).

2.2.2 Tipos de Ressalto Hidráulico

O aspecto físico do ressalto varia de acordo com a razão entre a velocidade do fluxo e as ondas de gravidade, ou, mais precisamente, com o número de Froude na seção em questão. As diferentes formas de um ressalto são classificadas por Chow (1959), da seguinte maneira:

FIGURA 2.11 – TIPOS DE RESSALTO HIDRÁULICO DE ACORDO COM O NÚMERO DE FROUDE



FONTE: Adaptado de Chow (1959).

2.2.2.1 Ressalto Ondulado (1 < Fr < 1,7)

Caracteriza-se pela transição gradual entre o escoamento torrencial (supercrítico) e o fluvial (subcrítico). A dissipação de energia específica resulta em uma perda de carga, causada por efeitos viscosos, provenientes do atrito nas paredes e fundo do canal. O ressalto ondulado apresenta pequenas oscilações de nível de água na superfície, semelhantes a uma onda estacionária.

2.2.2.2 Ressalto Fraco ou Pré-Ressalto (1,7 < Fr < 2,5)

Nesta condição, o ressalto mantém um aspecto ondulado, mas com zonas de separação na superfície líquida. As perdas de carga são baixas, inferiores a 20% da energia de entrada, conforme Peterka (1984). De maneira geral, para Fr < 2,5 o fenômeno não é considerado como um ressalto propriamente dito.

2.2.2.3 Ressalto Oscilante (2,5 < Fr < 4,5)

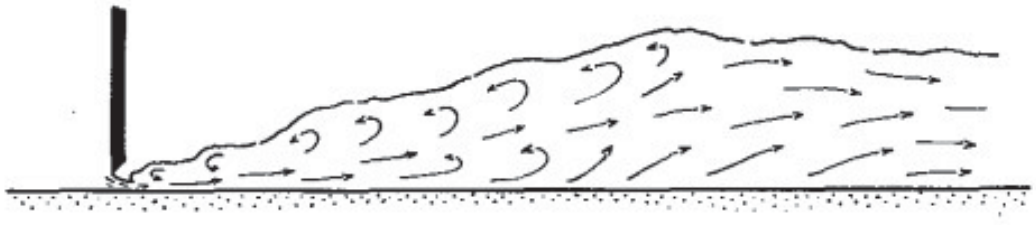
O ressalto assume seu aspecto típico, apresentando ondas de grande amplitude e com tendência de se deslocar para jusante, podendo causar danos a consideráveis distâncias. Segundo Peterka (1984), o ressalto oscilante tem a capacidade de dissipar cerca de 30% a 45% da energia do escoamento.

2.2.2.4 Ressalto Estacionário (4,5 < Fr < 9,0)

Nessa condição o ressalto hidráulico tende a ser mais estável, podendo ser utilizado como dissipador de energia em obras hidráulicas. A energia total dissipada varia entre 45% e 70% da energia disponível a montante, conforme Peterka (1984).

Cabe ressaltar que, em condições de ressalto hidráulico com Fr > 9, conforme apresentado na FIGURA 2.12, o ressalto é caracterizado como forte, com alto teor de incorporação de ar, turbulência na superfície, formação de vórtices e jatos de alta turbulência. A perda de energia é alta, podendo alcançar 85% da energia de entrada, porém, a superfície torna-se extremadamente instável. Nesse sentido, Porto (2006) ressalta que, em geral, não é recomendado o uso desse tipo de ressalto em construções hidráulicas, devido aos efeitos adversos nas estruturas de dissipação, como processos abrasivos ou até mesmo cavitação.

FIGURA 2.12 – RESSALTO FORTE – Fr > 9



FONTE: Peterka (1984).

2.3 EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DO MOVIMENTO DO FLUIDO

As equações governantes do fluido, conforme descrito por Versteeg e Malalasekera (1995), são expressões matemáticas das leis de conservação da física.

Os fenômenos fundamentais associados ao transporte de materiais e propriedades, diretamente relacionados ao movimento de um fluido, incluem:

a) Transporte de massa: a massa de um fluido é conservada;

b) Transporte de calor: a taxa de variação da energia é igual a soma da taxa de adição de calor e da taxa de trabalho sobre uma partícula de fluido (primeira lei da termodinâmica);
c) Quantidade de movimento: a taxa de variação de movimento é igual a soma das forças que atuam sobre uma partícula de fluido.

De acordo com Daily e Harleman (1966), os processos e as leis podem ser sintetizados da seguinte forma:

QUADRO 2.1 – PROCESSOS E LEIS FUNDAMENTAIS DO MOVIMENTO

Processos	**Lei observacional**
Transporte de massa	Conservação de massa (equação da continuidade)
Transporte de calor	Conservação de energia
Transporte de movimento	Segunda lei de Newton (equação do movimento)

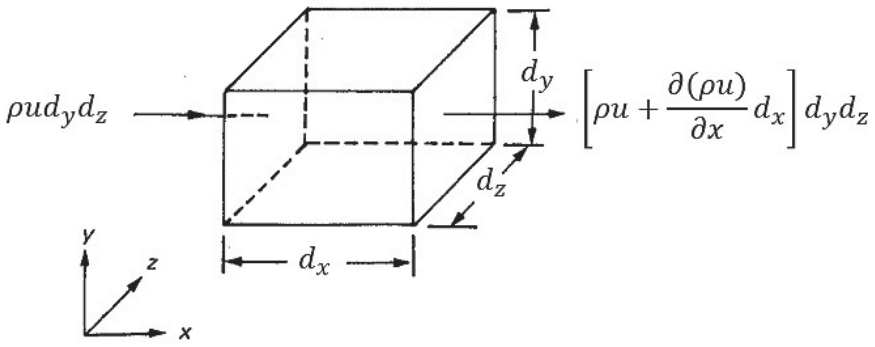
FONTE: Adaptado de Daily e Harleman (1966).

2.3.1 Conservação de Massa

Para desenvolver as equações da dinâmica dos fluidos, as leis de conservação são formuladas sobre um volume de controle. Em fluidos homogêneos, a lei da conservação da massa resulta na equação da continuidade, que estabelece uma relação entre as variações temporais e espaciais de densidade (ρ) e das componentes da velocidade (u, v, w), ao longo de um volume de controle.

Considerando um volume de controle diferencial com dimensões dx, dy, dz, a taxa de fluxo é calculada para cada face do cubo, nas três direções. A FIGURA 2.13 ilustra o fluxo de massa que atravessa as faces perpendiculares ao eixo x.

FIGURA 2.13 – VOLUME DE CONTROLE DIFERENCIAL PARA CONSERVAÇÃO DE MASSA



FONTE: Adaptado de Patankar (1980).

A equação da continuidade, considerando a contribuição das demais direções, coloca os termos do balanço de massa no lado esquerdo da equação e divide a expressão pelo volume do elemento dx, dy, dz. Conforme Daily e Harleman (1966), a equação pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{2.3}$$

Ou, em uma notação vetorial mais compacta, com ∇:

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)\hat{\imath} + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)\hat{\jmath} + \left(\frac{\partial}{\partial z}\right)\hat{k} \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \quad \nabla \,.\, \rho\vec{V} = 0 \tag{2.5}$$

Onde:

ρ = densidade do fluido (kg/m³);

t = tempo (s);

u = velocidade do fluido na direção do eixo x (m/s);

v = velocidade do fluido na direção do eixo y (m/s);

w = velocidade do fluido na direção do eixo z (m/s).

A Equação (2.5) representa a conservação de massa tridimensional para um fluido compressível. O primeiro termo da equação, ($\partial\rho/\partial t$), representa a taxa de variação da densidade ao longo do tempo (contribuição local), enquanto o segundo termo descreve o fluxo de massa para fora do elemento, através de seus limites, sendo denominado de termo convectivo.

Para a condição de estado estacionário, onde o fluido pode ser considerado incompressível para líquidos, como no caso da água, a equação da continuidade se reduz a uma relação que descreve apenas a variação espacial da velocidade (conservação de volume). Isso ocorre porque a densidade de cada massa infinitesimal de fluido não muda durante seu movimento. Em outras palavras, a derivada substancial da densidade ($\partial\rho/\partial t$), ou seja, a taxa de variação da densidade em relação ao tempo em uma unidade de volume, é zero. Nesse caso, a equação da continuidade pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad \nabla \,.\, \vec{V}=0 \tag{2.6}$$

A equação da continuidade é complexa para ser resolvida numericamente. Em programas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ela é frequentemente combinada com as equações da quantidade de movimento, resultando em uma equação de Poisson para a pressão, que possui propriedades numéricas mais adequadas. Dessa forma, a equação pode ser resolvida por diferentes métodos de iteração. Esse método é conhecido como o acoplamento pressão-velocidade.

2.3.2 Quantidade de Movimento

A segunda lei de Newton afirma que a taxa de variação do movimento de uma partícula fluida é igual a soma das forças que atuam sobre a partícula, de acordo com Daily e Harleman (1966). A Equação (2.7) apresenta a força resultante que atua em uma partícula infinitesimal ($d\overrightarrow{Fr}$), a qual é o produto da massa dessa partícula (d_m) e sua aceleração ($\vec{a}$).

$$F = m.a \rightarrow \ d\overrightarrow{Fr} = d_m\vec{a} \tag{2.7}$$

A aceleração ($\vec{a}$) de uma partícula infinitesimal que se move pelo campo de velocidades é dada pela derivada material ou substancial ($D\vec{V}/\,Dt$), que resulta em duas componentes: uma referente a aceleração convectiva, na qual a velocidade não depende do tempo e varia com o espaço, e outra componente referente a aceleração local, onde a velocidade varia com o tempo, conforme apresentado na Equação (2.8):

$$d\overrightarrow{Fr} = d_m\frac{D\vec{V}}{Dt}$$

$$d\overrightarrow{Fr} = d_m\left(u\frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + \ v\frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + w\frac{\partial\vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial\vec{V}}{\partial t}\right) \tag{2.8}$$

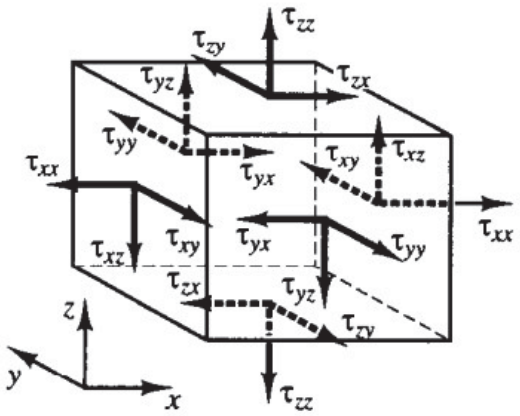
$$d\overrightarrow{Fr} = \rho dxdydz\left(u\frac{\partial\vec{V}}{\partial x} + \ v\frac{\partial\vec{V}}{\partial y} + w\frac{\partial\vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial\vec{V}}{\partial t}\right)$$

Massa — Aceleração convectiva — Aceleração local

Podem ser distinguidos dois tipos de forças que atuam nas partículas de fluido: as forças superficiais, que incluem as forças viscosas (tensões normais ou cisalhantes) e as forças de pressão, e as forças de campo, como as forças gravitacionais (por exemplo, o peso da partícula), a força centrífuga, a força de Coriolis e a força eletromagnética.

O estado de tensão de um elemento de fluido é caracterizado pela pressão e pelos nove componentes de tensão viscosa. As contribuições das forças de superfície são ilustradas na FIGURA 2.14. As tensões viscosas são denotadas (τ), utilizando a notação usual do sufixo τ_{ij}, que indica a direção das tensões viscosas. Nesse caso, i e j indicam que a componente de tensão atua na direção j em uma superfície normal a direção i.

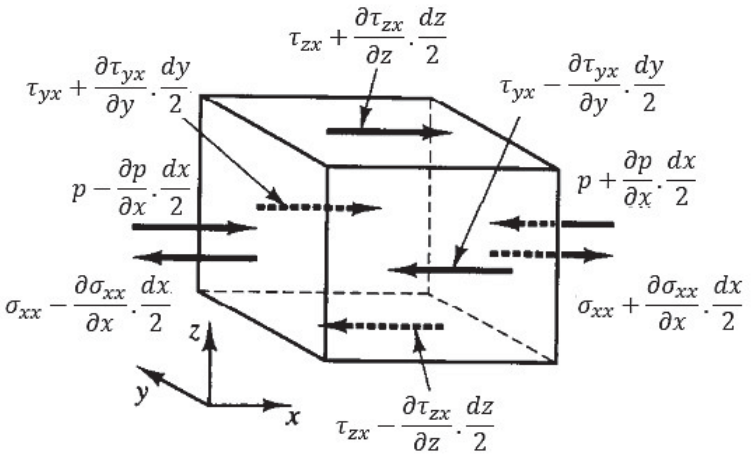
FIGURA 2.14 – COMPONENTES DE TENSÃO VISCOSA NAS TRÊS FACES DO ELEMENTO DE FLUIDO



FONTE: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (1995).

Considerando inicialmente as componentes x das forças de pressão (p) e tensão (τ_{xx}, τ_{yx} e τ_{zx}), mostradas na FIGURA 2.15, a magnitude de uma força resultante da tensão superficial é o produto da tensão pela área. As forças que estão na mesma direção de um eixo recebem o sinal positivo, enquanto as forças que estão na direção oposta recebem o sinal negativo. A força resultante na direção x é a soma das componentes das forças que atuam nessa direção no elemento infinitesimal de fluido. Quando $i = j$, a tensão viscosa perpendicular à superfície é denominada tensão normal (σ). Quando $i \neq j$, a tensão viscosa tangente a superfície é denominada tensão cisalhante (τ).

FIGURA 2.15 – COMPONENTES DE TENSÃO NA DIREÇÃO X



FONTE: Adaptado de Versteeg e Malalasekera (1995).

A seguir, são apresentadas as forças que atuam sobre um elemento infinitesimal nas três direções, em coordenadas cartesianas.

$$\begin{aligned} dF_x = \quad & \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}\frac{dx}{2}\right) dydz - \left(\sigma_{xx} - \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x}\frac{dx}{2}\right) dydz \\ & + \left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\frac{dy}{2}\right) dxdz - \left(\tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}\frac{dy}{2}\right) dxdz \\ & + \left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\frac{dz}{2}\right) dxdy - \left(\tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\frac{dz}{2}\right) dxdy \\ & + \left(p + \frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2}\right) dydz - \left(p - \frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2}\right) dydz \end{aligned} \tag{2.9}$$

Sabendo-se que $p = mg$, obtém-se:

$$dF_x = \left(\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) dxdydz \tag{2.10}$$

De forma análoga, as componentes das forças nas demais direções são:

$$dF_y = \left(\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right) dxdydz \tag{2.11}$$

$$dF_z = \left(\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right) dxdydz$$

Substituindo $d\overrightarrow{Fr}$ por $d_m \frac{D\vec{V}}{Dt}$, obtém –se:

$$\begin{aligned} d_{mx} \frac{D\vec{V}}{Dt} &= \rho \left(u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}\right) dxdydz \\ &= \left(\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) dxdydz \end{aligned} \tag{2.12}$$

A Equação (2.13), conhecida como equação de Cauchy, descreve as equações da quantidade de movimento para todas as direções:

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}\right) &= \left(\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) \\ \rho \left(u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}\right) &= \left(\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right) \\ \rho \left(u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}\right) &= \left(\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}\right) \end{aligned} \tag{2.13}$$

O tensor de tensões das forças de superfície atuantes no fluido é dado pela Equação (2.14), onde σ representa as tensões normais, e τ , as tensões tangenciais.

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \tag{2.14}$$

A equação de Cauchy pode ser expressa na forma vetorial:

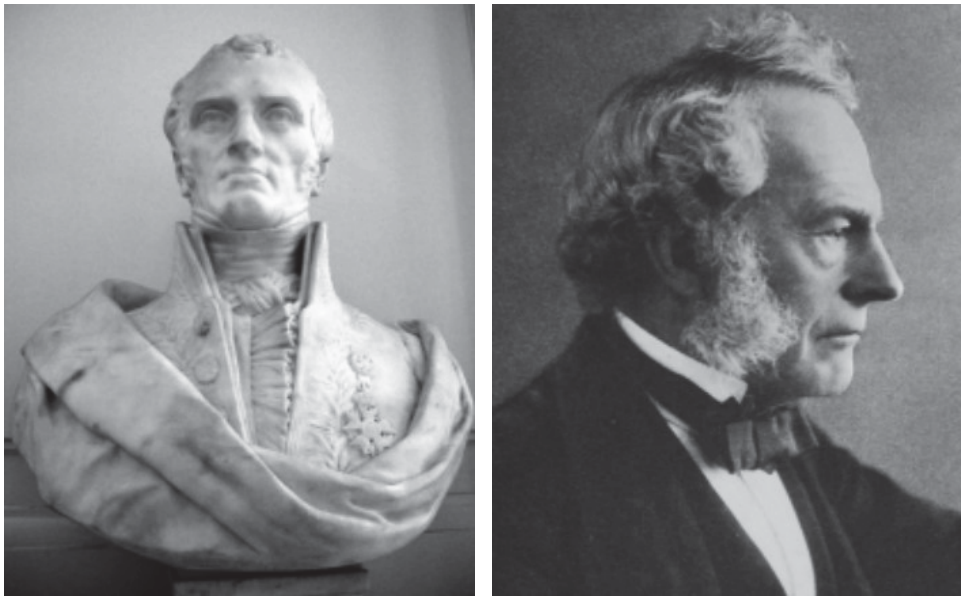
$$\underbrace{\rho \frac{D\vec{V}}{Dt}}_{\text{Forças de campo}} = \underbrace{\rho \vec{g}}_{\text{Forças de superfície}} + \underbrace{\nabla . \sigma_{ij}}_{\text{Tensor de tensões}} \tag{2.15}$$

Por fim, pode-se dizer que o modelo Newtoniano de tensões viscosas leva a equação de Navier-Stokes.

2.3.3 Equação de Navier-Stokes

As equações governantes de fluxo, que consideram a fricção (forças que atuam entre as moléculas de fluído), são chamadas de equações de Navier-Stokes, em homenagem ao francês Louis Marie Henri Navier (1785-1836) e ao inglês George Gabriel Stokes (1819-1903), que derivaram as equações do movimento do fluido, considerando o fenômeno físico do atrito, o qual foi desconsiderado das equações de Euler, segundo Johnson (2016). A FIGURA 2.16 ilustra, a esquerda, o busto de Navier, da coleção da *École Nationale des Ponts et Chaussées* e a direita uma fotografia de Stokes.

FIGURA 2.16 – NAVIER-STOKES



FONTE: Adaptado de Cannone e Friedlander (2023).

Navier e Stokes desenvolveram um sistema de equações idênticas às equações de movimento de Euler, mas com termos adicionais que surgiram devido às forças intermoleculares (fluido com atrito interno). Esses termos envolvem as segundas derivadas da velocidade, multiplicadas por uma constante que representa uma função do espaçamento entre as moléculas, ou seja, o coeficiente de viscosidade. Eles consideraram, em seus estudos, um fluido newtoniano, no qual a

tensão de cisalhamento (τ) é linearmente proporcional a taxa de deformação de cisalhamento ($\partial u/\partial y$), sendo a viscosidade dinâmica ou absoluta (μ) a constante de proporcionalidade entre eles, conforme apresentado na Equação (2.16).

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \tag{2.16}$$

Onde:

μ = viscosidade dinâmica ou absoluta (kg/m.s ou Pa.s);

τ = tensão de cisalhamento (N/m² ou Pa);

$\partial u/\partial y$ = taxa de deformação (m/s).

As tensões viscosas, tanto cisalhantes simétrica quanto normais, para um fluido newtoniano, são expressas por:

$$\begin{aligned}
\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad \sigma_{xx} &= -p - \frac{2}{3}\,\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\mu\,\frac{\partial u}{\partial x} \\
\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) \quad \sigma_{yy} &= -p - \frac{2}{3}\,\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\mu\,\frac{\partial v}{\partial y} \\
\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right) \quad \sigma_{zz} &= -p - \frac{2}{3}\,\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\mu\,\frac{\partial w}{\partial z}
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Substituindo as equações de tensões viscosas cisalhantes e normais na Equação (2.13) para a direção x, obtém –se:

$$\begin{gathered}
\rho\left(u\frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v\frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w\frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}\right) = \\
\left(\rho g_x + \frac{\partial\left(-p - \frac{2}{3}\,\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\mu\,\frac{\partial u}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right)}{\partial y} + \frac{\partial\left(\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right)}{\partial z}\right) \\
\rho\frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\left(-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right)
\end{gathered} \tag{2.18}$$

De forma análoga, para as demais direções:

$$\rho\frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\left(-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right)$$
$$\rho\frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu\left(-\frac{2}{3}\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + 2\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right) \quad (2.19)$$

Escrevendo de forma vetorial, obtém-se:

$$\underbrace{\rho\left(\frac{D\vec{V}}{Dt} + \vec{V}.\nabla\vec{V}\right)}_{\text{Forças inerciais}} = \overbrace{-\nabla p}^{\substack{\text{Força de} \\ \text{Gradiente de pressão}}} + \underbrace{\mu\nabla^2\vec{V} + \frac{1}{3}\mu\nabla\left(\nabla.\vec{V}\right)}_{\text{Forças viscosas}} + \overbrace{\rho\,\vec{g}}^{\substack{\text{Força de campo} \\ \text{(gravidade)}}} \quad (2.20)$$

De acordo com Versteeg e Malalasekera (1995), fluidos incompressíveis são aqueles em que não há variação de densidade, ou seja, a massa específica (ρ) permanece constante. Nesse caso, não há ligação entre a equação de energia e as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento. Nesse cenário, o campo de fluxo pode ser resolvido considerando apenas as equações de conservação de massa (continuidade) e conservação da quantidade de movimento. Conforme apresentado a seguir, a equação da continuidade é utilizada como equação constitutiva da equação de Navier-Stokes, e o divergente da velocidade ($\nabla\,.\,\rho\vec{V}$) torna-se nulo:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \quad \nabla\,.\,\rho\vec{V} = 0 \;\rightarrow\; \nabla\,.\,\rho\vec{V} = 0 \quad (2.21)$$

Portanto, a equação da continuidade para um fluido incompressível é dada por:

$$\nabla\,.\,\vec{V} = 0 \quad (2.22)$$

Aplicando a hipótese simplificadora de fluido incompressível, a partir da equação da continuidade, as equações de Navier-Stokes, na forma vetorial, podem ser expressas da seguinte forma:

$$\rho\left(\frac{D\vec{V}}{Dt}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\vec{V} + \rho\,\vec{g} \tag{2.23}$$

Expandindo as equações de Navier-Stokes para as três direções no plano cartesiano, tem-se:

$$\begin{aligned}
\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \rho g_x \\
\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) + \rho g_y \\
\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \rho g_z
\end{aligned} \tag{2.24}$$

2.4 DINÂMICA DOS FLUÍDOS COMPUTACIONAL

2.4.1 Conceito

A dinâmica dos fluidos estuda o movimento de fluidos (líquidos e gases), assim como as forças atuantes sobre eles. Já a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é uma ciência que utiliza a computação para prever esses fenômenos, com base nas leis de conservação (massa, momento e energia) e nas condições do sistema (KUNDU, 1990). Para isso, as equações diferenciais parciais (PDEs) são resolvidas numericamente e convertidas em sistemas algébricos, possibilitando assim, a análise de variáveis como velocidade, pressão e temperatura, bem como o comportamento global do escoamento, incluindo a vazão e as forças hidrodinâmicas.

Como ferramenta de pesquisa e design, a dinâmica dos fluidos computacional complementa a abordagem experimental, oferecendo diversas vantagens significativas, tais como:

a) Rapidez na produção do modelo e redução de custos;
b) Geração de informações detalhadas e de fácil acesso em todo o domínio de interesse;

c) Facilidade na alteração dos parâmetros de entrada, facilitando a otimização do projeto;
d) Capacidade de simular condições realistas (escalas reais) e eventos extremos que normalmente são difíceis de estudar experimentalmente;
e) Possibilidade de concentrar a atenção em parâmetros essenciais, desligando termos irrelevantes nas equações que governam o sistema.

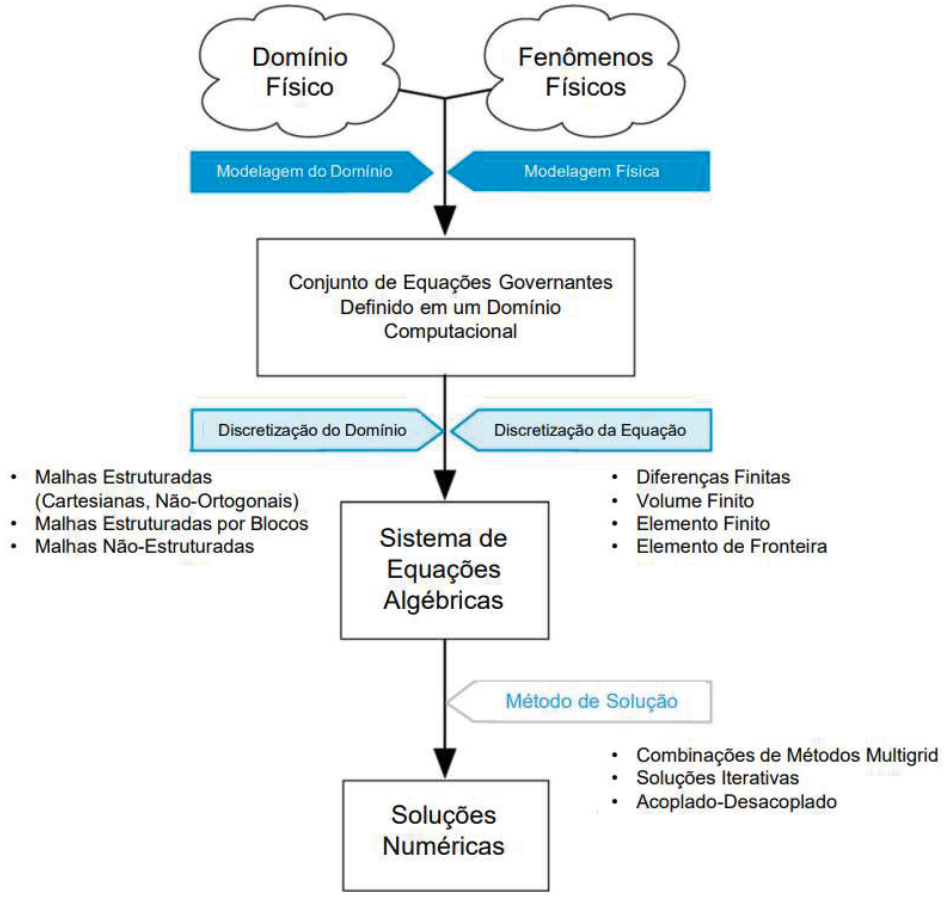
A dinâmica dos fluidos computacional (CFD), embora seja valiosa, apresenta previsões sujeitas a imprecisões decorrentes de diversas fontes, o que exige cautela na interpretação dos resultados, reconhecendo-a apenas como uma ferramenta de análise para problemas de escoamento. Entre os erros mais comuns, destacam-se:

a) A discretização, que é influenciada pela escolha da malha ou dos instantes de tempo utilizados para resolver o campo do escoamento;
b) Os dados de entrada, incluindo imprecisões nas propriedades do fluido e nas condições iniciais e de contorno;
c) A modelagem, especialmente em fenômenos complexos como a modelagem da turbulência, a modelagem atmosférica e os escoamentos multifásicos, onde as teorias científicas podem não descrever perfeitamente os fenômenos.

2.4.2 Processo de Discretização

O processo de discretização, ilustrado na FIGURA 2.17, consiste na conversão de um problema físico contínuo, descrito por equações diferenciais parciais (EDPs), em um sistema de equações algébricas solucionável computacionalmente. Essa conversão, que utiliza métodos de discretização para relacionar valores entre elementos vizinhos da malha com base na equação de conservação, resulta em um conjunto de equações algébricas discretizadas. Após a resolução dessas equações, os valores das variáveis obtidas são processados para extrair informações relevantes. As principais etapas desse processo, detalhadas subsequentemente, abrangem: a modelagem do domínio geométrico e dos fenômenos físicos relevantes, a discretização do domínio computacional, a discretização das equações governantes e a solução numérica do sistema algébrico resultante.

FIGURA 2.17– PROCESSO DE DISCRETIZAÇÃO



FONTE: Adaptado de Moukalled, Mangani e Darwish. (2016).

2.4.2.1 Modelagem do Domínio Físico e dos Fenômenos Físicos

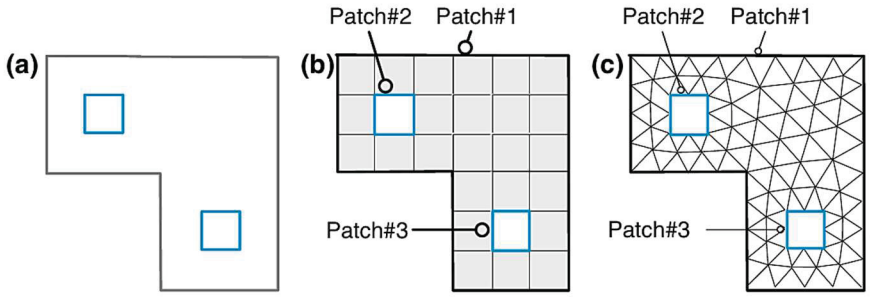
A modelagem do domínio geométrico e dos fenômenos físicos de interesse é uma etapa essencial do processo de discretização, exigindo a formulação matemática e a validação dos fenômenos analisados, em conformidade com a prática científica. Para otimizar as análises, podem ser adotadas estratégias como a redução da dimensionalidade do domínio (por exemplo, de tridimensional para bidimensional) e o uso de simetria para minimizar o tamanho do domínio computacional. Além disso, em alguns casos, os componentes físicos podem ser substituídos por representações matemáticas apropriadas.

2.4.2.2 Discretização do Domínio

A solução numérica de equações diferenciais parciais (EDPs), segundo Moukalled, Mangani e Darwish (2016), baseia-se na discretização do domínio em elementos de malha ou nós, nos quais são calculados os valores da variável dependente. Esse processo, denominado geração de malha ou discretização do domínio, posiciona os nós ou as variáveis nos centroides ou vértices das células, substituindo a solução exata e contínua da EDP por valores discretos. A malha resultante é formada por células ou elementos classificados conforme características como: estrutura, ortogonalidade, blocos, formato das células e disposição das variáveis. Definida por vértices e faces, a malha exige informações topológicas e geométricas, incluindo relações entre elementos e faces, dados da superfície, centroides e volumes dos elementos, que são extraídas de seus dados básicos. Em malhas não estruturadas, essas informações precisam ser geradas e armazenadas em listas.

A FIGURA 2.18 (a) ilustra o domínio geométrico caracterizado por um volume, enquanto a FIGURA 2.18 (b) apresenta sua discretização utilizando uma malha estruturada, composta por células quadradas e três faces de contorno, denominadas "Patch". Por fim, a FIGURA 2.18 (c) ilustra a possibilidade de discretizar o domínio computacional por meio de uma malha não estruturada com elementos triangulares.

FIGURA 2.18 – DISCRETIZAÇÃO GEOMÉTRICA E FÍSICA DO DOMÍNIO



FONTE: Adaptado de Moukalled, Mangani e Darwish (2016).

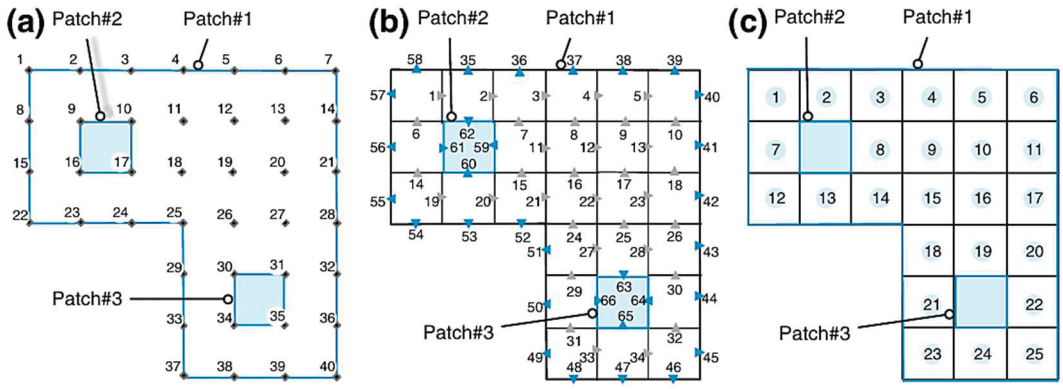
A seguir, serão detalhados os componentes fundamentais para a discretização geométrica e física do domínio.

2.4.2.3 Malha

A malha, segundo Moukalled, Mangani e Darwish (2016), é uma representação discreta do domínio físico, constituída por vértices (pontos no espaço), elementos poliédricos e faces. Os elementos subdividem o domínio, e suas faces podem ser: internas, quando compartilhadas entre elementos vizinhos, ou de contorno, quando coincidem com as fronteiras do domínio. Em uma malha computacional, as faces internas são aquelas que se formam naturalmente a partir da conexão entre os elementos vizinhos, sendo determinadas pela topologia da malha. Já as faces de contorno correspondem aos limites físicos do domínio, ou seja, as superfícies que delimitam a região onde o escoamento será simulado. Essas faces de contorno são agrupadas em conjuntos chamados "patches", que geralmente representam condições específicas de contorno (como entrada, saída ou paredes). Em malhas bidimensionais (2D), essas fronteiras são representadas por pontos ou linhas, enquanto em malhas tridimensionais (3D), são representadas por arestas ou superfícies.

A normal das faces internas depende da topologia dos elementos vizinhos, enquanto, nas faces de contorno, aponta para fora do domínio (FIGURA 2.19 b). Os demais componentes da malha como vértices, faces e elementos são destacados nas FIGURA 2.19 a–c, respectivamente.

FIGURA 2.19 – COMPONENTES DA MALHA – VÉRTICES, FACES E ELEMENTOS



FONTE: Adaptado de Moukalled, Mangani e Darwish (2016).

Após a geração da malha, a discretização física do domínio deve ser realizada, através da configuração do campo inicial com as condições de contorno.

2.4.2.4 Condição de Contorno

As condições de contorno representam a formalização matemática das interações entre os fluidos e seu entorno, impondo restrições as equações de conservação para descrever o comportamento do escoamento nas fronteiras do domínio, como entradas, saídas e paredes. Essenciais para a formulação de problemas matemáticos bem definidos, essas descrições matemáticas da física nas fronteiras, são intrínsecas ao sistema analisado (PAPANASTASIOU, 2000). No OpenFOAM®, para cada tipo de restrição geométrica de um *patch* na malha, existe uma condição de contorno correspondente, a ser especificada no arquivo *boundaryField*, algumas das quais são apresentadas a seguir.

a) *Symmetry*: a condição de contorno do tipo *symmetry* define um plano de simetria nas faces do domínio de simulação, assumindo que o escoamento é simétrico em relação a essa face (OPENFOAM FOUNDATION, 2024). Embora as componentes tangenciais da velocidade possam ser diferentes de zero, permitindo o movimento paralelo à fronteira, não ocorre transferência de massa ou fluxo através da face de simetria (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). Essa condição de contorno é especialmente útil para reduzir o domínio computacional, otimizando o tempo de cálculo da simulação (ANDERSSON *et al.,* 2012);
b) *Pacth*: as condições de contorno genéricas do tipo "*patch*" e "*wall*", especificadas no arquivo de contorno, não impõem restrições geométricas. O tipo "*patch*" é utilizado em contornos abertos, como entradas e saídas, sem a necessidade de aproximações geométricas específicas ou conexões numéricas, conforme descrito no Guia do Usuário do OpenFOAM®, 2024 (OPENFOAM FOUNDATION, 2024);
c) *Inlet e Outlet*: as condições de contorno de entrada (*inlet*) podem ser especificadas com base nas velocidades ou nas taxas de fluxo de massa, permitindo definir tanto um fluxo médio quanto a distribuição das componentes de velocidade. Para a condição de contorno de saída (*outlet*), adota-se a condição de fluxo de difusão zero, que extrapola as condições do plano de saída, garantindo que o fluxo a montante não seja influenciado (ANDERSSON

et al., 2012). Além disso, o Manual do Usuário do OpenFOAM® descreve a condição *inletOutlet*, derivada da condição *mixed*, que alterna entre *zeroGradient* (para condição de Neumann) na saída do fluido do domínio e *fixedValue* (para condição de Dirichlet) na entrada, onde o valor de entrada é definido pelo parâmetro *inletValue;*

d) *Wall:* o Guia do Usuário do OpenFOAM® descreve também as condições de contorno do tipo *wall*, que, de modo similar às do tipo *patch*, não impõem um tratamento geométrico ou numérico específico. Essas condições são aplicadas a "patches" coincidentes com superfícies sólidas, representando barreiras físicas intransponíveis para o fluido. Nesse contexto, a condição *wall* impõe uma velocidade normal nula na superfície da parede, impedindo que o fluxo atravesse. Existem variações dessa condição, incluindo *noSlip*, condição de aderência com velocidade tangencial nula, simulando uma superfície lisa sem deslizamento (ANDERSSON *et al*., 2012); *slip*, que permite deslizamento livre, desconsiderando o atrito entre o fluido e a parede; *movingWall*, aplicado a paredes em movimento, como rotores e pistões; e *fixedWall*, utilizado para paredes fixas, sem qualquer movimento relativo ao fluido.

2.4.2.5 Condições Iniciais

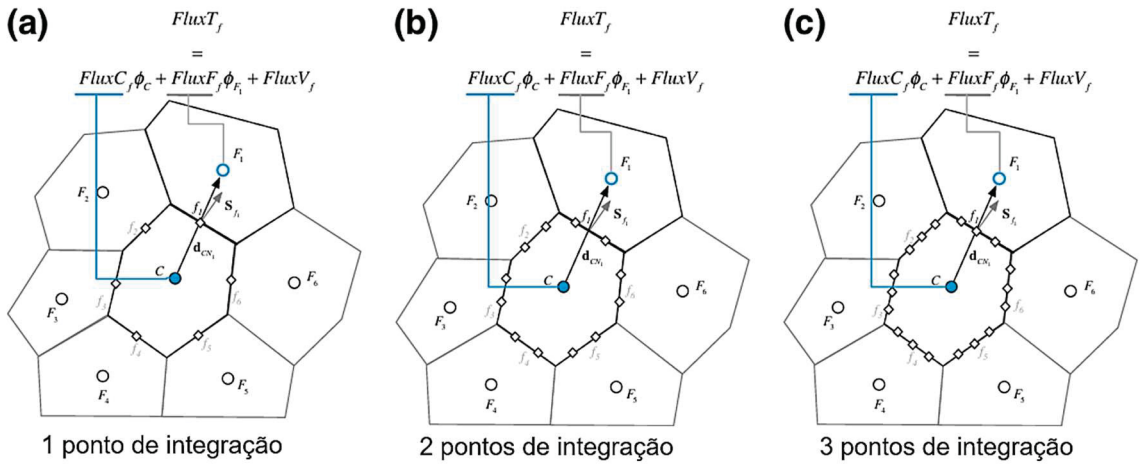
Em simulações numéricas com evolução temporal de campos de fluxo, a precisão da solução é determinada pelas condições de contorno e inicial, que definem o estado do sistema no início da simulação (PAPANASTASIOU, 2000). A convergência da solução numérica das equações de Navier-Stokes, influenciada por sua não linearidade e a possibilidade de múltiplas soluções, depende da precisão da estimativa inicial. No OpenFOAM®, essa estimativa é definida no diretório "0" para o tempo inicial (t=0), seguida da inicialização de uma equação nos elementos para calcular e distribuir as condições iniciais internas, juntamente com as condições de contorno predefinidas. Para otimizar a busca por soluções do regime permanente em simulações transientes, podem-se adotar condições iniciais menos restritivas e passos de tempo maiores (ANDERSSON *et al*., 2012).

2.4.2.6 Discretização das Equações

Dentre os diversos métodos de discretização utilizados em CFD, como o Método das Diferenças Finitas (FDM), o Método dos Elementos Finitos (FEM) e outros, destaca-se o Método dos Volumes Finitos (FVM), adotado no software OpenFOAM®. O FVM é uma técnica numérica baseada na integração das equações diferenciais parciais (EDPs) que descrevem o escoamento (equações de Navier-Stokes e da Continuidade), transformando-as em um sistema de equações algébricas lineares, que relacionam as variáveis entre as células vizinhas (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). Primeiramente, o domínio físico é discretizado por meio de uma malha computacional, e em seguida, as EDPs são integradas nos volumes de controle, resultando em equações de balanço semi-discretizadas para cada elemento. Por fim, uma interpolação é aplicada para estimar os valores das faces, com base nos valores no centro dos volumes.

A capacidade do Método dos Volumes Finitos de realizar a discretização diretamente no espaço físico, eliminando a necessidade de transformações entre sistemas de coordenadas física e computacional, torna-o uma abordagem flexível e amplamente utilizada (MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2016). A precisão da interpolação e da integração numérica, dos nós para as faces dos elementos, varia em função do número de pontos de integração e da função de ponderação utilizada. A integração de valor médio simples (um ponto de integração), conhecida como a regra trapezoidal (FIGURA 2.20 a), resulta em precisão de segunda ordem, enquanto o aumento do número de pontos de integração para dois ou três (FIGURA 2.20 b e c) eleva a ordem da precisão, impactando diretamente no custo computacional.

FIGURA 2.20 – TIPOS DE INTEGRAÇÃO AO LONGO DAS FACES DOS ELEMENTOS



FONTE: Adaptado de Moukalled, Mangani e Darwish (2016).

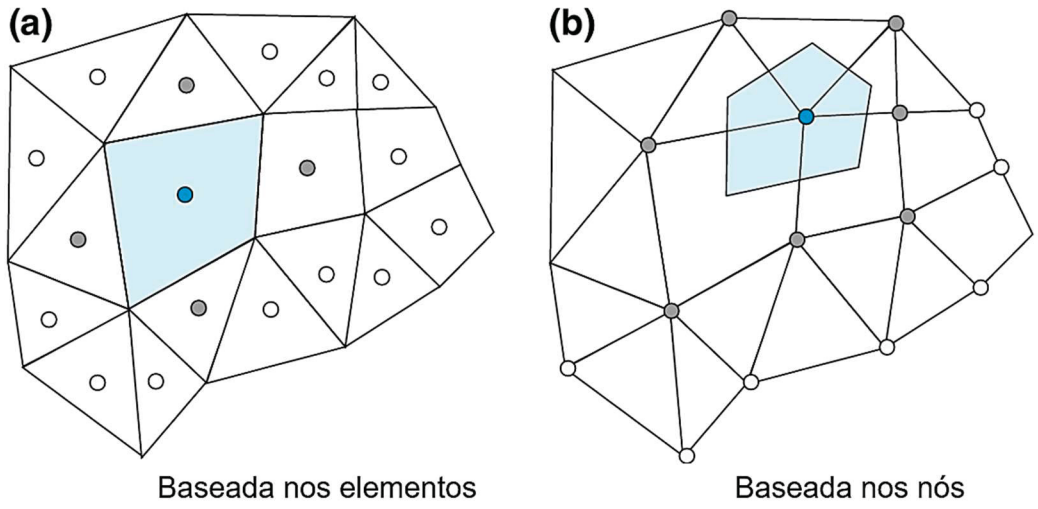
A discretização das equações pode ser realizada por duas abordagens principais, conforme o método de definição dos volumes de controle, como ilustrado na FIGURA 2.21. Na abordagem baseada em volumes finitos, os próprios elementos da malha são utilizados como volumes de controle, com as variáveis armazenadas no centro das células. Essa metodologia exige interpolação para determinar as propriedades nas faces e proporciona maior precisão no cálculo dos fluxos e condições de contorno. Já a abordagem centrada nos nós, define os volumes de controle com base na área de influência de cada nó da malha.

Segundo Moukalled, Mangani e Darwish (2016) a discretização por volumes finitos centrados na célula resulta em um sistema de equações em que as variáveis dependentes, localizadas nos centros das células, são as incógnitas. A forma como esse sistema é estruturado e resolvido define a abordagem computacional adotada, que pode ser classificada como explícita ou implícita. Na abordagem explícita, as variáveis são calculadas diretamente a partir de valores já conhecidos naquele instante de tempo, o que permite a avaliação imediata dos operadores de discretização. Já na abordagem implícita, as variáveis dependentes são tratadas como incógnitas de um sistema acoplado de equações, cuja solução é obtida por meio de algoritmos de solução diretos ou iterativos.

Na dinâmica dos fluidos computacional, a natureza não linear das equações de conservação frequentemente torna a abordagem implícita preferível, devido à sua maior estabilidade numérica, mesmo que exija um custo computacional mais elevado.

De modo geral, muitos softwares oferecem alternativas tanto implícitas quanto explícitas para a discretização dos termos transientes. Em determinadas situações, é possível ainda combinar ambas as abordagens na resolução dos diferentes termos das equações, equilibrando precisão, estabilidade e desempenho computacional.

FIGURA 2.21 – DISCRETIZAÇÃO BASEADA NOS ELEMENTOS E NOS NÓS



FONTE: Adaptado de Moukalled, Mangani e Darwish (2016).

Por fim, a aplicação do Método dos Volumes Finitos em simulações numéricas, exige que as equações discretizadas satisfaçam algumas propriedades fundamentais, garantindo soluções consistentes e fisicamente admissíveis. Essas propriedades são apresentadas a seguir, conforme descrito por Moukalled, Mangani e Darwish (2016).

a) Conservação: a conservação das variáveis transportadas, como massa e energia, é fundamental para a física da simulação. No FVM, essa propriedade é garantida intrinsecamente, pois os fluxos nas faces compartilhadas entre os elementos adjacentes possuem a mesma magnitude, porém com sinais opostos, garantindo a conservação;
b) Precisão: como a solução exata é geralmente desconhecida, a precisão numérica pode ser avaliada por meio do erro de truncamento, que indica a taxa de melhoria da solução com o refinamento da malha, sendo maior para esquemas de ordem superior;

c) Convergência: obtida por meio de um processo iterativo, a convergência ideal é alcançada quando não há variações significativas entre iterações sucessivas, sendo frequentemente avaliada por um critério de tolerância (ε) e pela independência da solução em relação à malha;
d) Consistência: a solução numérica é considerada consistente se, à medida que o passo de tempo (Δt) e o tamanho das células (Δx) tendem a zero, ela converge para a solução exata das EDPs que governam o escoamento. Para isso, o erro de discretização deve ser uma função de Δt e/ou Δx e, quando expresso como Δx/Δt, Δx deve diminuir mais rapidamente. A consistência é um requisito fundamental para a convergência;
e) Estabilidade: essencial para a confiabilidade da solução em diferentes condições, impede o crescimento ilimitado de erros em problemas transitórios, sendo influenciada pelo tipo de esquema numérico (explícito ou implícito) e podendo ser controlada pelo passo de tempo ou sub-relaxação;
f) Economia: em simulações CFD aplicadas a escoamentos complexos, o tempo de processamento excessivo pode limitar a aplicabilidade e a eficiência das ferramentas, tornando o controle do custo computacional um aspecto essencial;
g) Transporte Adequado: a discretização numérica deve ser capaz de representar com precisão a natureza direcional do transporte das variáveis de fluxo, considerando a influência combinada da convecção e da difusão. Isso se torna particularmente crítico em regimes convectivos dominantes (alto número de Peclet), onde a influência do escoamento é fortemente influenciada pelo fluxo a jusante;
h) Limitação do Perfil de Interpolação: além da conservação, a discretização deve preservar outras propriedades físicas da EDP original, como por exemplo, o princípio do valor máximo, que determina que em um domínio sem fontes ou reações internas, os valores de uma variável conservada não podem exceder os valores nas fronteiras do domínio.

2.4.2.7 Soluções Numéricas

São aproximações computacionais do comportamento dos fluidos, obtidas através da discretização das equações governantes e da aplicação de métodos

numéricos, geralmente com o uso de solucionadores iterativos. No OpenFOAM®, a resolução das equações de Navier-Stokes envolve técnicas especificas para o coura pressão-momento, implementadas por algoritmos como o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), o PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*) e o PIMPLE (*PISO-SIMPLE Merged*). A configuração dos solucionadores, critérios de tolerância e algoritmos é realizada no dicionário *fvSolution*, no diretório *system* (Guia do Usuário do OpenFOAM®, 2025).

As opções de solucionadores (*solvers*) lineares disponíveis na versão 10 do OpenFOAM® são apresentadas no QUADRO 2.2.

QUADRO 2.2 – SOLUCIONADORES LINEARES

Solucionador	**Palavra-chave**
Gradiente pré-condicionado (bi-) conjugado	*PCG/PBiCG*
Gradiente pré-condicionado (bi-) conjugado estabilizado (recomendado em vez de PCG/PBiCG)	*PBiCGStab*
Solucionador utilizando um suavizador	*smoothSolver*
Multigrid generalizado geométrico-algébrico	*GAMG*
Solucionador diagonal para sistemas explícitos	*diagonal*

FONTE: Adaptado do Guia do Usuário do OpenFOAM® (2025).

Kundu (1990) destaca o método dos volumes finitos como uma das técnicas numéricas mais populares e amplamente utilizadas nas últimas quatro décadas, especialmente para a resolução iterativa de sistemas complexos de equações. Visto isso, a seguir são apresentados alguns dos métodos numéricos utilizados no processo de solução dos sistemas de equações algébricas no software OpenFOAM®.

- Acoplamento Pressão-Velocidade: em simulações de escoamento transiente, o algoritmo PIMPLE é amplamente utilizado no acoplamento pressão-velocidade, combinando as vantagens dos algoritmos PISO e SIMPLE (SIMPLEC). Enquanto o PISO é aplicado em cálculos transientes, o SIMPLE é utilizado em análises de escoamento em regime permanente, nas quais não há dependência temporal. A estabilidade do algoritmo PISO depende da manutenção de um número de Courant (Co) suficientemente baixo, o que restringe o passo de tempo, em função de sua formulação, que inclui derivação temporal e acoplamento pressão-velocidade. Conforme apresentado na Equação (2.25), esse parâmetro adimensional depende da velocidade local da

célula (U), do passo de tempo (Δt) e da distância característica entre as células (Δx). No OpenFOAM®, o número de Courant, também conhecido como Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), é calculado com base no volume da célula, e sua magnitude é diretamente proporcional ao refinamento da malha (menor distância entre as células), ao aumento da velocidade, ou do passo de tempo.

$$Co = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \tag{2.25}$$

O algoritmo PIMPLE, conforme descrito por Holzmann (2017), busca iterativamente uma solução de estado estacionário a cada passo de tempo, utilizando técnicas de sub-relaxamento. Esse processo inclui loops de correção externa, fundamentais para garantir a estabilidade e a convergência dos termos explícitos das equações discretizadas. A simulação prossegue até o tempo final estabelecido, avançando para o próximo passo de tempo somente após a solução iterativa atingir a tolerância predefinida de convergência. No contexto do OpenFOAM®, o algoritmo PIMPLE apresenta flexibilidade operacional por meio do parâmetro *nOuterCorrectors*: ao configurá-lo como 1, o solucionador opera no modo PISO, enquanto ao defini-lo como 0, desativa integralmente o *loop* PIMPLE, evitando qualquer cálculo associado. Por ser uma abordagem hibrida, o algoritmo PIMPLE, permite a utilização de números de Courant altos ($Co \gg 1$), possibilitando passos de tempo maiores e, consequentemente, maior eficiência computacional. Essa escolha de modalidade é realizada durante a inicialização do solucionador, permitindo a adaptação da estratégia computacional às exigências do problema em análise.

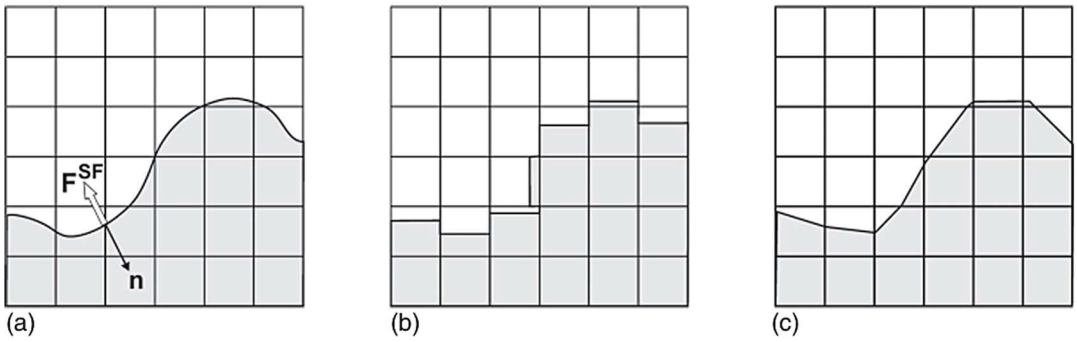
- Método do Volume de Fluido: o método *Volume of Fluid* (VoF), amplamente utilizado em simulações de escoamentos multifásicos estratificados, utiliza uma fração de volume em cada célula da malha, para determinar a posição da interface entre os fluidos (ANDERSSON *et al.* (2012).

  Quando a interface entre dois fluidos deixa de ser reta, a curvatura resultante e a orientação das normais (n), geram forças de tensão superficiais (F_{SF}), que são modeladas como um termo fonte adicional de momento, conforme ilustrado na FIGURA 2.22 - a. Essas forças têm como objetivo minimizar a área da

interface entre os fluidos (FIGURA 2.22 - b), no caso de bolhas ou gotículas, a área de interface minimizada é esférica, enquanto em um escoamento totalmente estratificado, a área de interface minimizada (interpolada) assume a forma de uma linha reta (FIGURA 2.22 - c).

Diversas metodologias podem ser empregadas na modelagem de forças de tensão superficial, destacando-se os métodos de rastreamento da frente (*front-tracking*), Volume de Fluido (*VoF*) e *Level-Set*. O método de rastreamento de volume (VoF), que utiliza uma fração de volume como função indicadora da interface, requer estratégias, como a reconstrução e compressão da superfície, para limitar os efeitos da dissipação, difusão e enrugamento da interface, durante a convecção. Dessa forma, para preservar a precisão, empregam-se esquemas de discretização limitados (*bounded schemes*), que mantêm os valores da fração de volume entre 0 e 1. Ressalta-se ainda que, devido à precisão de primeira ordem do método, a malha deve ser refinada adequadamente, uma vez que a região da interface entre as fases é altamente sensível a sua resolução (ANDERSSON *et al*., 2012).

FIGURA 2.22 – MÉTODO DO VOLUME DE FLUIDO (VOF)



FONTE: Adaptado de Andersson *et al*. (2012).

Na simulação de escoamentos com interface água-ar, o método VOF, proposto por Hirt e Nichols (1981), utiliza uma função α para representar a fração de volume dos fluidos. Essa função assume valor de 0 para células preenchidas totalmente por ar (α = 0) e valor de 1 para células preenchidas totalmente por água (α = 1). Valores intermediários de α indicam a presença da superfície livre e a coexistência dos fluidos dentro da célula, com gradientes de α restritos a região da interface.

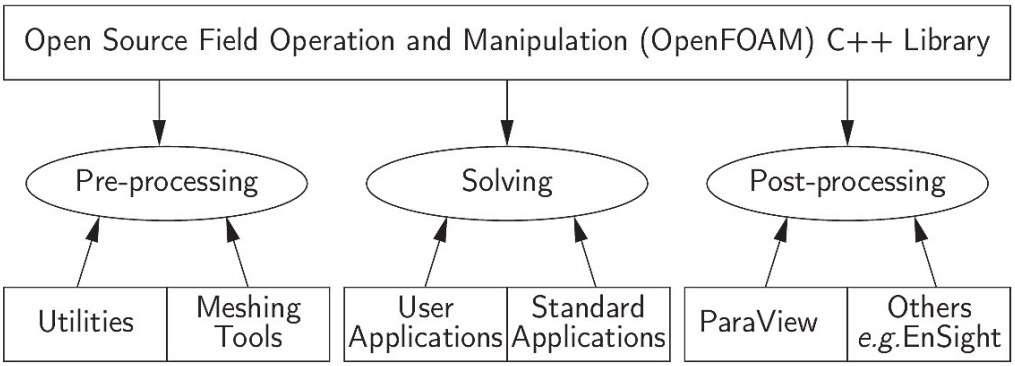
2.4.3 Software OpenFOAM®

Diante das limitações impostas por ferramentas comerciais, tanto em custo de aquisição de licenças quanto em flexibilidade, optou-se pelo uso do software OpenFOAM® nesta dissertação. Como plataforma de código aberto, ele permite maior controle sobre os modelos e se mostra especialmente vantajoso para aplicações em dinâmica dos fluidos computacional.

O OpenFOAM® (*Open Field Operation and Manipulation*) é uma plataforma computacional desenvolvida em C++ e distribuída sob a licença GNU GPL (*General Public License*). Criado originalmente em 2004, pela OpenCFD Ltd., no Reino Unido, o software oferece um conjunto abrangente de bibliotecas, ferramentas e *solvers* pré-desenvolvidos, voltados à simulação numérica em diversas áreas da engenharia e da física, especialmente em problemas de mecânica do contínuo. Seus módulos atendem a uma ampla gama de aplicações, incluindo CFD básica, escoamentos compressíveis e incompressíveis, escoamentos multifásicos, simulação numérica direta (DNS), simulação de grandes vórtices (LES), transferência de calor, combustão, eletromagnetismo, dinâmica dos sólidos e, até mesmo, aplicações em finanças.

De acordo com o manual de referência do OpenFOAM® (GREENSHIELDS, 2021), o software opera por meio de arquivos executáveis chamados *applications*, que se subdividem em duas principais categorias: *solvers* e *utilities*. Os *solvers* são responsáveis pela solução de problemas específicos relacionados a mecânica dos fluidos (ou contínuo). Já as *utilities* consistem em ferramentas auxiliares, utilizadas em tarefas como pré-processamento e pós-processamento, garantindo um tratamento de dados consistente entre todos os ambientes. Dessa forma, a estrutura do OpenFOAM® é fundamentalmente organizada em torno das seguintes categorias de aplicações:

FIGURA 2.23 – VISÃO GERAL DA ESTRUTURA DO OPENFOAM®



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

Conforme ilustrado anteriormente, o OpenFOAM® é estruturado em um conjunto de bibliotecas pré-compiladas, que são vinculadas dinamicamente durante a compilação dos *solvers* e utilitários. A metodologia de CFD é estruturada em três etapas principais: o pré-processamento (*pre-processing*), a execução dos solucionadores (*solving*) e o pós-processamento (*post-processing*).

A etapa de pré-processamento no OpenFOAM® consiste na configuração completa do caso (case) de simulação, realizada por meio de arquivos organizados em diretórios padronizados. Esses arquivos, conhecidos como dicionários, contêm as definições da geometria, da malha computacional, das propriedades físicas do escoamento, das condições de contorno e dos parâmetros de controle numérico. Diferentemente de muitos softwares de CFD baseados em interfaces gráficas (GUIs), o OpenFOAM® adota uma abordagem baseada na manipulação direta desses arquivos de texto, exigindo certa familiaridade com a estrutura desses diretórios. Além das ferramentas de simulação (*Utilities*), ele disponibiliza ferramentas de geração de malha (*Meshing Tools*) e visualização de dados (*ParaView*).

A etapa de processamento, fundamental para a resolução numérica dos problemas em mecânica dos meios contínuos computacional, é realizada por meio da seleção e aplicação de *solvers*. Sua eficiência, expressa pelo tempo de execução, depende diretamente dos métodos de discretização e dos algoritmos numéricos adotados para a resolução das equações do escoamento.

Por fim, o pós-processamento compreende a análise e a interpretação dos resultados numéricos, podendo ser realizado durante ou após a execução da simulação. No OpenFOAM®, essa etapa é comumente conduzida por meio do utilitário

paraFoam, executado no diretório do caso. Esse comando inicializa o *ParaView*, ferramenta de código aberto baseada no *Visualization Toolkit* (VTK), amplamente utilizada para o processamento e a visualização dos dados computacionais.

2.4.3.1 Solver *interFoam*

O solver interFoam, disponibilizado no OpenFOAM®, é empregado para simular escoamentos bifásicos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis. Para resolver as equações do escoamento, ele utiliza métodos numéricos específicos, como o algoritmo PIMPLE, apresentado anteriormente, e o método da fração de volume (*VoF*), responsável pela captura da interface entre as fases. O solver resolve, de forma simultânea, as equações de conservação de volume, conservação da quantidade de movimento e a equação de transporte para a fração de volume, conforme apresentadas a seguir em notação vetorial (negrito):

- Conservação do volume (continuidade): considerando o fluido como incompressível, o termo de compressibilidade é eliminado da equação da continuidade. Dessa forma, conforme apresentado na Equação (2.26), a equação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\nabla . \boldsymbol{u} = 0 \tag{2.26}$$

- Conservação da quantidade de movimento: no contexto de sistemas multifásicos, a equação de conservação da quantidade de movimento, previamente introduzida na Equação (2.15) necessita ser reformulada. Esta adaptação incorpora efeitos como a gravidade e a tensão superficial, através das forças de corpo por unidade de massa ($\boldsymbol{f_b}$), conforme detalhado a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\, \boldsymbol{u}) + \nabla . (\rho\, \boldsymbol{uu}) = \tag{2.27}$$

$$-\nabla p + \nabla . \mathbf{T} + \rho \boldsymbol{f_b} \tag{2.28}$$

- Conservação da fração de volume: para rastrear a interface ou a distribuição das fases em um escoamento multifásico, utiliza-se a equação de transporte para a fração de volume α. Esta equação é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . (\boldsymbol{u}\, \alpha) = 0 \tag{2.29}$$

Admitindo-se que as contribuições das velocidades de cada fluido para a evolução da interface (ou superfície livre) são proporcionais às suas respectivas frações de fase, e definindo a velocidade efetiva do fluido ($\boldsymbol{u} = \mathbf{u_l} + \mathbf{u_g}$) como a média ponderada dessas velocidades pelas frações de fase correspondentes ($\boldsymbol{u} = \alpha\, \mathbf{u_l} + (1 - \alpha)\mathbf{u_g}$), a Equação (2.29), de transporte para a fração de volume, pode ser reorganizada. Conforme Damián (2004), esta manipulação resulta em uma equação de evolução para a fração de volume (α):

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . [\alpha\, \boldsymbol{u_l} + (1 - \alpha)\boldsymbol{u_g}]\alpha = 0 \tag{2.30}$$

Onde:
α = fração de volume que pode variar de 0 a 1;
t = tempo (s);
∇ = operador diferencial vetorial (gradiente);
$\boldsymbol{u_l}$ = vetor de velocidade do fluido na fase líquida (m/s);
$\boldsymbol{u_g}$ = vetor de velocidade do fluido na fase gasosa (m/s).

A partir da definição de velocidade relativa ($\boldsymbol{u}$), e procedendo com o isolamento algébrico do termo correspondente à velocidade do gás ($\mathbf{u_g}$), obtém-se a seguinte expressão:

$$\boldsymbol{u_g} = \boldsymbol{u_l} - \boldsymbol{u_r} \tag{2.31}$$

Onde:
$\boldsymbol{u}$ = vetor de velocidade tridimensional = u **i** + v **j** + w **k** (m/s);

$\boldsymbol{u_r}$ = vetor de velocidade relativa, denominado “velocidade de compressão” da superfície livre (m/s).

Dessa forma, substituindo a equação da velocidade do gás, na Equação (2.29) de transporte, obtém-se:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . [\alpha \, \boldsymbol{u_l} + \boldsymbol{u_g} - \alpha \boldsymbol{u_g}]\alpha = 0 \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . [\alpha \, \boldsymbol{u_l} + (\, \boldsymbol{u_l} - \ \boldsymbol{u_r}) - \alpha(\, \boldsymbol{u_l} - \ \boldsymbol{u_r})]\alpha = 0 \tag{2.33}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . [\alpha \, \boldsymbol{u_l} + \boldsymbol{u_l} - \ \boldsymbol{u_r} - \alpha \, \boldsymbol{u_l} + \ \alpha \, \boldsymbol{u_r})]\alpha = 0 \tag{2.34}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . [\boldsymbol{u_l} - \ \boldsymbol{u_r} + \ \alpha \, \boldsymbol{u_r})]\alpha = 0 \tag{2.35}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . [\boldsymbol{u_l} - (\boldsymbol{1} - \alpha) \, \boldsymbol{u_r})]\alpha = 0 \tag{2.36}$$

Reorganizando-se os termos da equação, chega-se à seguinte forma:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla . (\boldsymbol{u_l}\alpha) - \nabla[(\boldsymbol{1} - \alpha)\alpha \, \boldsymbol{u_r})] = 0 \tag{2.37}$$

Conforme descrito por Damián (2004), a simplificação da Equação (2.6), resultante da anulação de termos infinitesimais de conservação de massa para fluidos incompressíveis, resulta na expressão conhecida como "termo de compressão" (Equação (2.38)). Apesar de sua denominação, este termo não está associado a variações de volume causadas por mudanças de pressão. Trata-se, na realidade, de um ajuste artificial, introduzido no cálculo da convecção da fração de volume, com o objetivo puramente numérico de refinar a resolução da interface, garantindo que a superfície livre seja representada de forma mais nítida no domínio computacional.

$$\nabla[(\mathbf{1}-\alpha)\alpha\,\boldsymbol{u_r})]=0 \tag{2.38}$$

Ao adicionar o termo de compressão à equação de transporte para a fração de volume (α), obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t}+\nabla.(\boldsymbol{u}\,\alpha)\;+\;\nabla.[\boldsymbol{u_r}\,\alpha\,(1-\alpha)]=0 \tag{2.39}$$

Adicionalmente, as propriedades físicas dos dois fluidos imiscíveis (água e ar), tais como a densidade (ρ) e a viscosidade dinâmica (μ), são determinadas por meio de médias ponderadas. Conforme Damián (2004), essa ponderação é feita com base na distribuição local da fração de volume (α), que indica a proporção de cada fluido em uma célula do domínio computacional.

$$\rho=\alpha\,\rho_l+(1-\alpha)\,\rho_g \tag{2.40}$$

$$\mu=\alpha\,\mu_l+(1-\alpha)\,\mu_g \tag{2.41}$$

A tensão superficial na interface líquido-gás é incorporada ao modelo de escoamento multifásico como uma força de campo, por unidade de volume. Essa força, que representa o gradiente de pressão adicional decorrente da tensão interfacial, é calculada por meio do método da Força de Superfície Contínua (*CSF – Continuum Surface Force*), conforme a expressão a seguir:

$$F_\sigma=\;\sigma\kappa\nabla\alpha \tag{2.42}$$

Onde:

σ = tensão superficial (kg/s²);

κ = curvatura média da superfície livre.

Conforme Damián (2004), em simulações que utilizam o método VOF na presença de paredes sólidas estacionárias e não verticais, surge uma dificuldade relacionada à descontinuidade do gradiente de pressão normal à parede, entre as fases. Para contornar esse problema e simplificar a aplicação das condições de

contorno de pressão, torna-se necessária a utilização de uma formulação de pressão modificada. O solver interFoam adota, especificamente, a variável de pressão modificada $p_{_rgh}$, utilizando uma formulação otimizada desta variável, cuja implementação é descrita a seguir:

$$p_{_rgh} = p - \rho(g.h) \tag{2.43}$$

Onde:

$p_{_rgh}$ = pressão modificada, obtida pela subtração da contribuição hidrostática da pressão total (Pa);

p = pressão total (Pa);

ρ = densidade do fluido (kg/m³);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

h = altura (distância vertical) entre o ponto considerado e a origem do sistema de coordenadas (m).

Com base nas equações e manipulações algébricas detalhadas anteriormente, procede-se à reestruturação da equação de conservação de momento para sistemas multifásicos. Nesta formulação, os termos do gradiente de pressão estática (∇p) e da força de corpo gravitacional (ρg) são substituídos pelo gradiente da pressão modificada ($\nabla p_{_rgh}$), cuja definição foi apresentada na Equação (2.43). A variável $p_{_rgh}$, que já incorpora os efeitos hidrostáticos, incluindo o impacto das variações da densidade (ρ), permite uma representação mais conveniente e precisa da dinâmica do escoamento. A equação de momento resultante dessa abordagem é apresentada a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\,\boldsymbol{u}) + \nabla.(\rho\,\boldsymbol{uu}) = \nabla.(\mu\nabla\,\mathbf{u}) + (\nabla\,\mathbf{u}).\nabla\,\mu - \nabla p_{_rgh} - g.x\nabla\rho + \sigma\kappa\nabla\alpha \tag{2.44}$$

Para a modelagem de turbulência, o *interFoam* implementa as abordagens RANS – *Reynolds Averaged Navier* – Stokes (com 19 modelos, dentre eles *SpalartAllmaras*, *kEpsilon*, *kOmega* e modelos de tensões de Reynolds LRR ou SSG), LES – *Large Eddy Simulation* (com 6 modelos disponíveis, a exemplo de Smagorinsky e WALE) e a estratégia híbrida DES – *Detached Eddy Simulation* (com 4 modelos,

dentre eles *SpalartAllmarasDDES*), que combina RANS em regiões próximas a sólidos e LES em zonas afastadas. Informações complementares sobre a implementação numérica utilizada no solver interFoam, abrangendo o método VOF, podem ser encontradas no trabalho de Damián (2004). Detalhes adicionais podem ser verificados diretamente no código-fonte disponível na plataforma OpenFOAM®.

2.4.3.2 Qualidade da Malha

Durante o processo iterativo de geração da malha com o utilitário *snappyHexMesh* no OpenFOAM®, a qualidade dos elementos é continuamente monitorada. Caso uma modificação geométrica ou topológica introduza células ou faces que não atendam aos critérios de qualidade pré-estabelecidos, a alteração é automaticamente revertida, restabelecendo a malha a um estado anterior considerado válido e isento de inconsistências. Os critérios de qualidade utilizados nessas verificações dinâmicas são definidos no subdicionário *meshQualityControls* (ENGYS, 2012).

O subdicionário *meshQualityControls*, presente no arquivo *snappyHexMeshDict* do OpenFOAM®, define os critérios de qualidade que devem ser atendidos pela malha gerada através do pelo utilitário *snappyHexMesh*. Esse conjunto de restrições geométricas visa garantir a estabilidade numérica da simulação e a confiabilidade dos resultados, limitando distorções excessivas nos elementos da malha. Os principais parâmetros avaliados incluem:

a) *Boundary Openness*: esse parâmetro quantifica o grau de fechamento das superfícies de contorno da malha. Em domínios computacionais sólidos, espera-se que as faces de contorno formem superfícies topologicamente fechadas, isolando completamente o interior do domínio em relação ao exterior. Para uma malha idealmente fechada, a soma dos vetores de área das faces de contorno deve tender a zero, dentro de uma tolerância numérica. Um valor não nulo para o *boundaryOpenness* indica a existência de uma possível abertura na superfície de contorno;
b) *Aspect Ratio*: a razão de aspecto de um elemento de malha é definida como a relação entre sua maior e menor dimensão ($l_{\max}/l_{\min}$), segundo GREENSHIELDS C.J. e WELLER H. G. (2022). Para a razão de aspecto, não

existem limites definidos ou default no OpenFOAM®, porém, valores elevados dessa razão indicam células com geometria excessivamente alongada ou achatada, o que é indesejável, pois, pode comprometer a qualidade da discretização e, por conseguinte, a precisão da solução numérica;

c) *Non-orthogonality*: esse parâmetro define o desvio máximo aceitável da ortogonalidade entre as faces das células da malha. No OpenFOAM®, por meio do *snappyHexMesh*, esse critério é configurado como *maxNonOrtho*, representando o ângulo máximo permitido (em graus) entre o vetor que liga os centros de duas células vizinhas e a normal da face que as separa, através de um produto escalar normalizado (ENGYS, 2012). O *User Guide* da versão 2112 do OpenFOAM® (2021), recomenda a utilização de um valor padrão de 65 graus;
d) *Max Skewness*: a assimetria da face é quantificada pela distância entre o centro geométrico da face e o ponto de intersecção desta com a linha que conecta os centroides das células adjacentes, normalizada pela distância entre os próprios centroides dessas células (ENGYS, 2012). O utilitário *snappyHexMesh* permite definir os parâmetros de controle de qualidade da malha *maxBoundarySkewness* e *maxInternalSkewness*, que correspondem, respectivamente, à máxima assimetria permitida para faces de contorno e faces internas. De acordo com a OpenFOAM® Foundation (2024), os valores recomendados para esses parâmetros são 20 para *maxBoundarySkewness* e 4 para *maxInternalSkewness*.

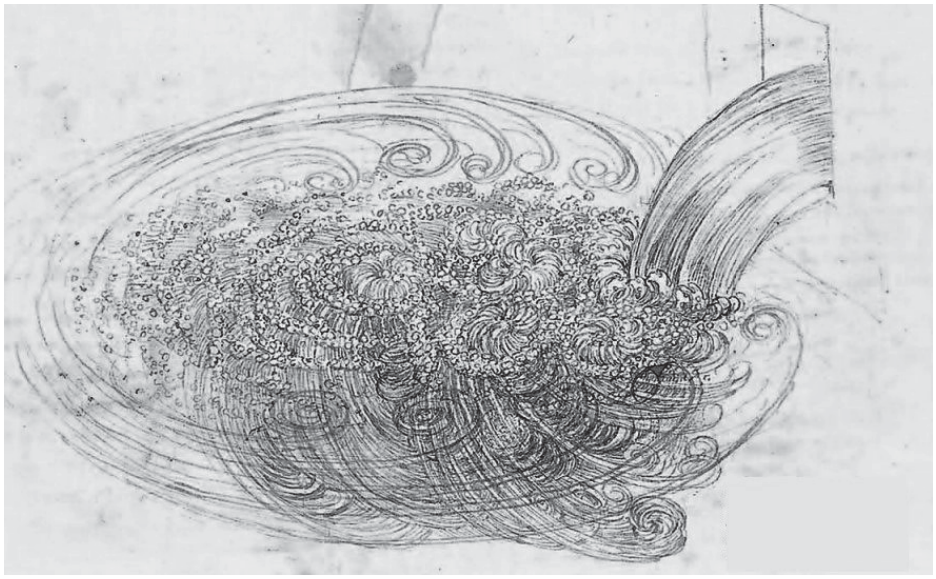
2.5 TURBULÊNCIA

2.5.1 Origem

A observação e descrição da turbulência remontam a Leonardo da Vinci, que, em seus cadernos de anotações de 1507, registrou suas impressões sobre o fenômeno que denominou “*la turbolenza”*. Através de sua acurada observação da água em movimento, da Vinci notou a presença de redemoinhos e movimentos aleatórios, elementos que hoje reconhecemos como características centrais da turbulência.

Em suas palavras, da Vinci descreveu o movimento da água como assemelhando-se ao de cabelos, com duas forças motrizes: uma, o peso do cabelo, e outra, a direção dos cachos. Analogamente, ele observou que a água exibe movimentos de redemoinho, impulsionados tanto pela corrente principal do fluxo quanto por um movimento aleatório e inverso. Essa descrição pioneira, ilustrada na FIGURA 2.24, revela a intuição de da Vinci sobre a natureza dual da turbulência: a coexistência de um movimento direcional predominante e flutuações aleatórias.

FIGURA 2.24 – ILUSTRAÇÃO DE DA VINCI – FLUXO TURBULENTO



FONTE: Adaptado de DA VINCI, Leonardo (2004).

A investigação pioneira da turbulência é tradicionalmente atribuída a Osborne Reynolds, que em 1883, publicou um estudo experimental, que identificou que o escoamento se torna turbulento quando o número de Reynolds ($Re = UL/\nu$, onde U é a escala de velocidade, L é a escala de comprimento e ν é a viscosidade cinemática) ultrapassa um valor crítico. Ele também introduziu o conceito de tensão turbulenta, ao reconhecer que as velocidades em um fluxo turbulento flutuam aleatoriamente em torno de um valor médio; ele propôs que essas flutuações podem ser tratadas como variáveis turbulentas, separando-as em uma componente média e uma flutuação.

Mais tarde, G.I. Taylor expandiu a compreensão da turbulência com seus conceitos de turbulência homogênea e isotrópica, nos quais as propriedades estatísticas do escoamento são uniformes em todo o espaço e em todas as direções. Taylor também introduziu o espectro de turbulência, que descreve a distribuição de

energia entre diferentes escalas de vórtices, e a ideia de comprimento de mistura, que relaciona as flutuações turbulentas de velocidade com o transporte de quantidade de movimento.

Na década de 1920, Ludwig Prandtl e Theodore Von Kármán desenvolveram teorias semiempíricas para modelar a turbulência, destacando-se a teoria do comprimento de mistura, onde deduziram que, em regiões de escoamento turbulento totalmente desenvolvido próximas a paredes sólidas, o perfil de velocidade apresenta um comportamento logarítmico.

Avançando na compreensão da turbulência, Lewis Richardson propôs, em 1922, o conceito de cascata espectral ou cascata de turbulência, uma descrição fundamental da transferência de energia em fluxos turbulentos. Essa descrição da cascata espectral foi complementada pela formulação da lei dos quatro terços, que relaciona a energia transferida por vórtices de diferentes tamanhos. Andrei Kolmogorov, por sua vez, deu continuidade a essas teorias, concentrando-se nas menores escalas do movimento turbulento, onde suas características são independentes da geometria do escoamento em larga escala e dependem da viscosidade cinemática do fluido (ν) e da taxa de dissipação de energia (ε).

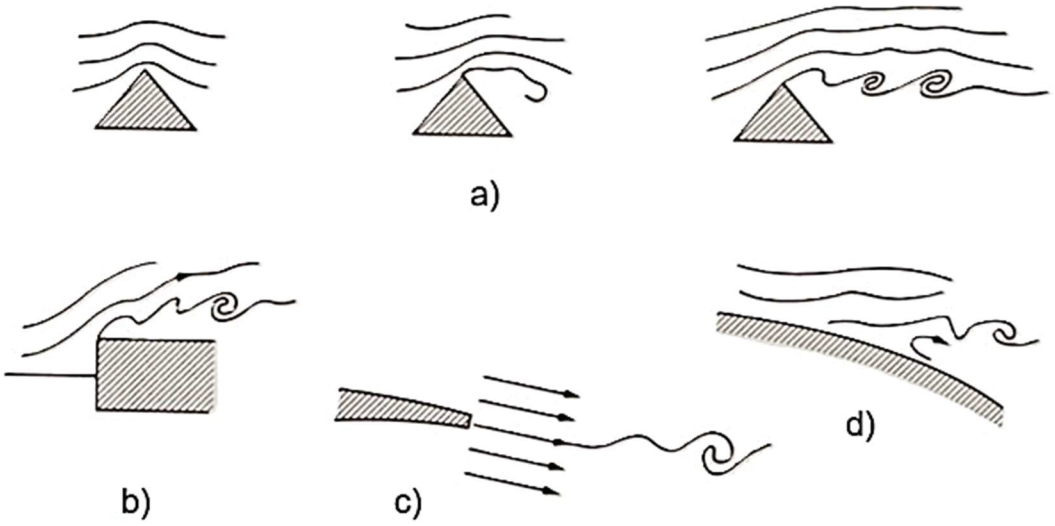
2.5.2 Conceitos Fundamentais

Daily e Harleman (1966) descrevem a turbulência como a ruptura do fluxo ordenado de um fluido, resultando na formação de redemoinhos, que geram movimentos flutuantes e irregulares em determinadas regiões do escoamento. Sob condições apropriadas, esse regime turbulento pode se manter em um estado quase estacionário. Hinze (1959) descreve o movimento turbulento como aquele caracterizado por flutuações aleatórias no tempo e no espaço, que se distinguem estatisticamente dos valores médios do escoamento. O autor afirma, ainda, que o escoamento turbulento pode ser gerado de duas maneiras: turbulência de parede e turbulência livre, descritas na sequência.

2.5.2.1 Turbulência de Parede

Ocorre quando a turbulência é gerada e continuamente influenciada por forças viscosas ao longo de superfícies sólidas. Segundo Daily e Harleman (1966), esse tipo de turbulência tende a se formar em regiões onde há descontinuidades no fluxo, especialmente quando duas correntes de fluido se encontram, resultando em uma variação abrupta de velocidade entre camadas adjacentes. Como exemplo desse tipo de turbulência, pode se citar: pontas de projeções afiadas (FIGURA 2.25 – a), corpos com geometria abrupta (FIGURA 2.25 – b), bordas de fuga de aerofólios FIGURA 2.25 – c) e zonas de separação da camada limite (FIGURA 2.25 – d).

FIGURA 2.25 – TURBULÊNCIA DE PAREDE



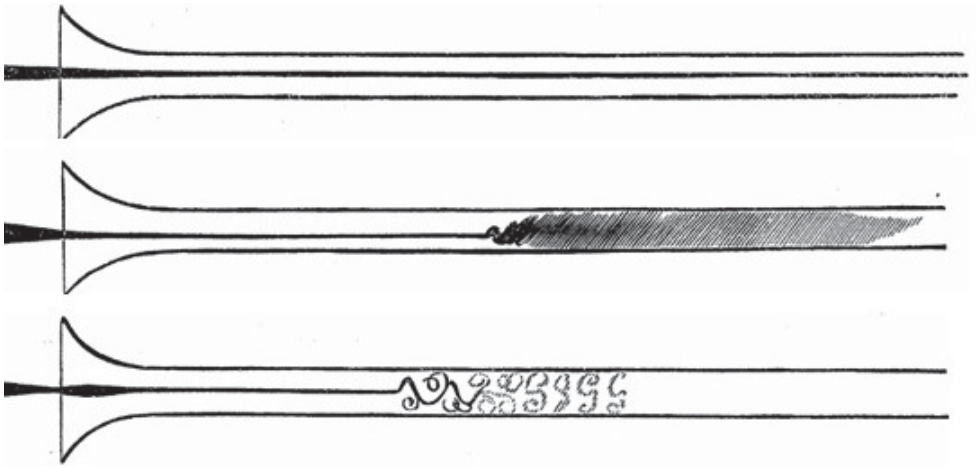
FONTE: Adaptado de Daily e Harleman (1966).

2.5.2.2 Turbulência Livre

Ocorre na ausência de superfícies sólidas, sendo gerada pela interação entre camadas de fluido com diferentes velocidades relativas, nas quais uma se desloca sobre a outra. Um experimento clássico, realizado por Osborne Reynolds e descrito em seu trabalho de 1883 (FIGURA 2.26), demonstrou de forma notável a transição do escoamento laminar para o turbulento. No experimento, um filamento de corante é injetado em um fluxo de água, dentro de um tubo de vidro. Observou-se que, em baixas velocidades, o filamento de corante seguia uma trajetória linear e bem definida,

caracterizando um escoamento laminar. No entanto, com o aumento gradual da velocidade, o filamento de corante começou a se dispersar e a se misturar com a água, até que toda a massa de fluido se tornou colorida. Sob a iluminação de uma faísca elétrica, foi possível observar a formação de redemoinhos, caracterizando a transição para o regime turbulento.

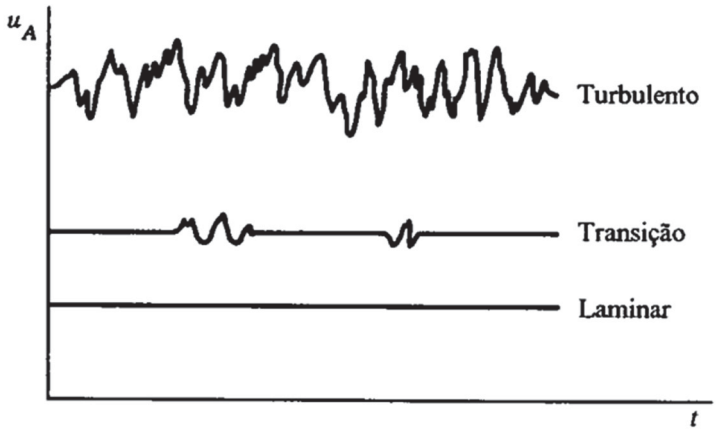
FIGURA 2.26 – EXPERIÊNCIA DE REYNOLDS



FONTE: Adaptado de Osborne (1883).

Reynolds Osborne (1895) descreve que, à medida que a velocidade do fluido aumenta, pequenas perturbações no escoamento tendem a crescer, gerando flutuações nas componentes de velocidade (u', v', w'), em relação aos valores médios. Essas variações aleatórias, características do escoamento turbulento, afetam significativamente a dinâmica do escoamento e promovem a dissipação de energia. Além disso, decorrentes de instabilidades no fluxo, elas são as principais responsáveis pela transição do regime laminar para o turbulento, conforme ilustrado na FIGURA 2.27.

FIGURA 2.27 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA VELOCIDADE DO FLUIDO



FONTE: Adaptado de Munson *et al*. (2004).

A dinâmica da água é intrinsecamente complexa, tornando desafiador prever com precisão seus movimentos e definir as forças que os regem. Essas particularidades, perceptíveis tanto no fluxo quanto nas forças associadas, não apenas suscitam, mas exigem uma abordagem teórica rigorosa, conforme destacado por Reynolds Osborne (1895). Algumas características gerais dos escoamentos turbulentos se destacam de forma evidente, conforme detalhado por Kundu (1990), Tennekes e Lumley (1972) e Mcdonough (2007):

a) Aleatoriedade: os escoamentos são irregulares, caóticos e imprevisíveis, o que impossibilita uma abordagem determinística. Por isso, a análise da turbulência é feita com métodos estatísticos;
b) Não linearidade: a não linearidade desempenha duas funções principais: primeiro, em escoamentos instáveis, pequenas perturbações crescem espontaneamente e frequentemente se equilibram como distúrbios de amplitude finita. Ao ultrapassarem os critérios de estabilidade, esses distúrbios podem causar novo estado instável, levando o escoamento a atingir um estado caótico. Em segundo lugar, a não linearidade causa o estiramento de vórtices, um processo fundamental para a manutenção da vorticidade nos escoamentos turbulentos tridimensionais;
c) Difusividade: é a capacidade da turbulência de promover uma rápida mistura e dispersão de momento, calor e massa. Esse fenômeno ocorre devido às

flutuações caóticas da velocidade no fluido, aumentando significativamente as taxas de transferência em relação aos escoamentos laminares;

d) Vorticidade: considerada um elemento fundamental nos escoamentos turbulentos, a vorticidade não é uma propriedade física diretamente mensurável, mas sim uma definição matemática - o rotacional do campo de velocidade. A turbulência é caracterizada por altos níveis de vorticidade flutuante, organizada em estruturas conhecidas como vórtices, que variam de tamanho. Os vórtices maiores contêm a maior parte da energia do escoamento, a qual é transferida para vórtices menores, um processo impulsionado por iterações não lineares. Essa transferência continua até que a energia atinja escalas tão pequenas que seja dissipada por difusão viscosa;
e) Dissipação: o escoamento turbulento é dissipativo porque a energia cinética da turbulência é convertida em energia interna do fluido, processo mediado pelas tensões viscosas. Esse processo ocorre por meio do estiramento de vórtices, que transfere a energia dos vórtices de maiores dimensões para escalas progressivamente menores, até que a viscosidade suavize os gradientes e dissipe a energia em forma de calor. Portanto, a manutenção da turbulência requer um suprimento contínuo de energia e formação de novos vórtices menores, para compensar as perdas causadas pela viscosidade (PANTON, 2013). A ausência dessa reposição energética leva a dissipação viscosa, culminando na gradual extinção da turbulência no escoamento;
f) Número de Reynolds elevados: escoamentos turbulentos sempre ocorrem em números de Reynolds altos. A turbulência, geralmente, surge quando um escoamento laminar se torna instável devido ao aumento excessivo do número de Reynolds. Os efeitos advectivos (não lineares), são muito maiores que os efeitos viscosos, que tendem a amortecer as flutuações.

2.5.3 Média Temporal de Reynolds

Daily e Harleman (1966) afirmam que o movimento turbulento, uma vez estabelecido, possui natureza aleatória, dificultando sua descrição exata. Para contornar essa complexidade, ele é tratado por meio de propriedades estatísticas, considerando a velocidade instantânea como a soma de um valor médio e uma componente flutuante. Osborne (1895), interpretando essas flutuações como

movimentos relativos à velocidade média, reformulou as equações de Navier-Stokes em termos das médias temporais das variáveis turbulentas. Essa abordagem, conhecida como decomposição de Reynolds, é expressa da seguinte forma:

$$u = \bar{u} + u' \tag{2.45}$$

Onde:

u = velocidade instantânea na direção x [LT^{-1}];

$\bar{u}$ = velocidade média na direção x [LT^{-1}];

u' = flutuação de velocidade na direção x [LT^{-1}].

Nas outras direções, as expressões correspondentes são:

$$v = \bar{v} + v' \qquad\qquad w = \bar{w} + w' \tag{2.46}$$

Onde:

v e w = velocidade instantânea na direção y e z [LT^{-1}];

$\bar{v}$ e $\bar{w}$ = velocidade média na direção y e z [LT^{-1}];

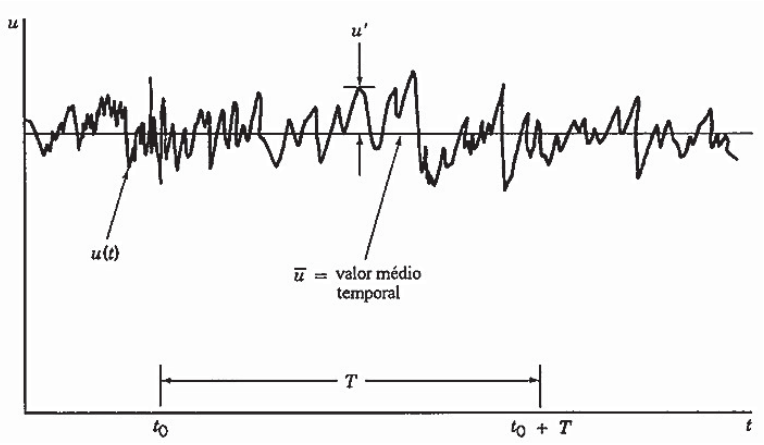
v' e w' = flutuação de velocidade na direção y e z [LT^{-1}].

A média temporal $\bar{u}$ de uma função $u(x, y, z, t)$ é definida por:

$$\bar{u} = \frac{1}{T}\int_{t0}^{t0+T} u\, dt \tag{2.47}$$

Em que T representa o período de cálculo da média, considerado bem maior do que qualquer período significativo das próprias flutuações e mais curto que qualquer variação na velocidade média. Os valores médios da velocidade estão ilustrados na FIGURA 2.28.

FIGURA 2.28 – SEPARAÇÃO DA VELOCIDADE INSTANTÂNEA EM COMPONENTES: MÉDIA ($\bar{u}$) E FLUTUAÇÃO (u')



FONTE: Adaptado de Munson *et al*. (2004).

Devido à natureza oscilatória das flutuações, que alternam entre valores positivos e negativos, a média temporal da componente flutuante da velocidade (u'), resulta em um valor médio nulo $(\overline{u'}) = 0$, conforme ilustrado na Equação (2.48) e na Equação (2.49) e FIGURA 2.29.

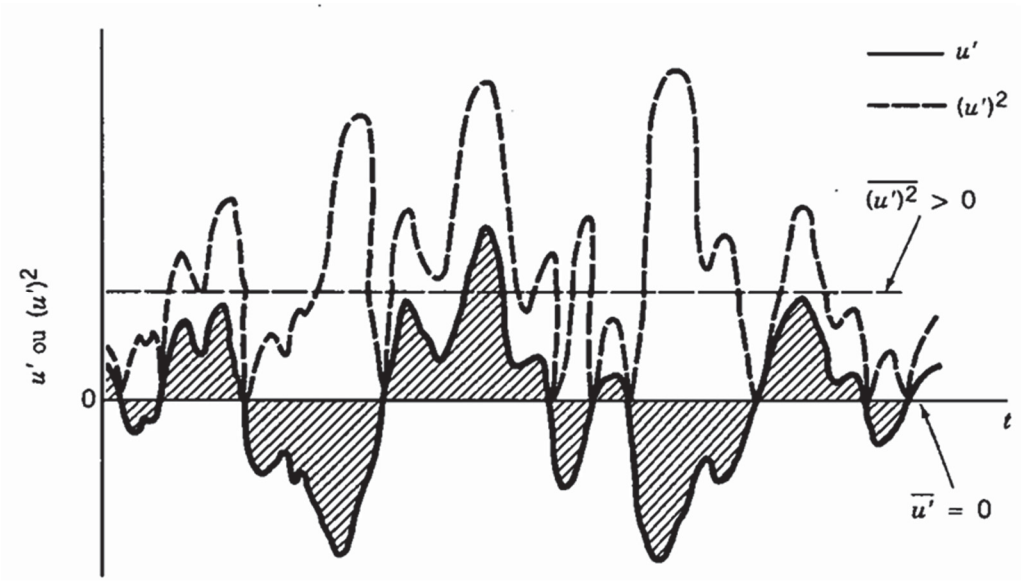
$$\overline{u'} = \frac{1}{T}\int_{t0}^{t0+T} (u - \bar{u})\, dt = \bar{u} - \bar{u} = 0 \tag{2.48}$$

$$\overline{u'} = \frac{1}{T}\int_{t0}^{t0+T} u'\, dt = 0 \tag{2.49}$$

Por outro lado, a média do quadrado de uma flutuação não é nula $\overline{(u')^2} > 0$, sendo sempre positiva. Esse valor representa uma medida de intensidade da turbulência, conforme apresentado na Equação (2.48):

$$\overline{(u')^2} = \frac{1}{T}\int_{t0}^{t0+T} (u')^2 dt \tag{2.50}$$

FIGURA 2.29 – MÉDIA DA FLUTUAÇÃO E MÉDIA DO QUADRADO DA FLUTUAÇÃO



FONTE: Adaptado de Munson *et al.* (2004).

Em escoamentos turbulentos, a intensidade média da turbulência (I) pode ser definida como a razão entre a raiz quadrada da média quadrática das flutuações de velocidade e a velocidade média temporal. Essa definição, proposta Daily e Harleman (1966), expressa a relação entre as variações instantâneas do escoamento e seu comportamento médio. Para a componente x, tem-se:

$$I = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\bar{u}}$$

$$I = \frac{\sqrt{\overline{(u')^2}}}{\bar{u}} = \frac{\left[\frac{1}{T}\int_{t0}^{t0+T}(u')^2 dt\right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{u}} \qquad (2.51)$$

Daily e Harleman (1966) descrevem a energia cinética turbulenta por unidade de massa conforme a Equação (2.52). Assim como em outros processos aleatórios, essa energia cinética da turbulência pode ser decomposta em um espectro de energia em função da frequência, permitindo a análise da distribuição da energia cinética turbulenta entre diferentes escalas de frequência.

$$\frac{energia\ cinética\ turbulenta\ média}{massa} = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right) \qquad (2.52)$$

Por fim, conforme destacado por Daily e Harleman (1966), a equação da continuidade deve ser satisfeita tanto para escoamentos laminares quanto turbulentos. No caso de fluidos incompressíveis, isso implica que a divergência do campo de velocidades é nula. Ao se aplicar a média temporal na Equação (2.6) e Equação (2.23), que representam, respectivamente, a continuidade e a conservação da quantidade de movimento, obtém-se a equação da continuidade para escoamentos turbulentos:

$$\frac{\partial(\bar{u} + u')}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v} + v')}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w} + w')}{\partial z} = 0 \tag{2.53}$$

Aplicando a média de cada termo da equação, tem-se:

$$\overline{\frac{\partial u'}{\partial x}} + \overline{\frac{\partial v'}{\partial y}} + \overline{\frac{\partial w'}{\partial z}} = 0 \tag{2.54}$$

Portanto, tanto as componentes do escoamento médio (Equação (2.55)), quanto as componentes do escoamento turbulento (Equação (2.56)), sobrepostas, devem satisfazer a condição de continuidade.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \tag{2.55}$$

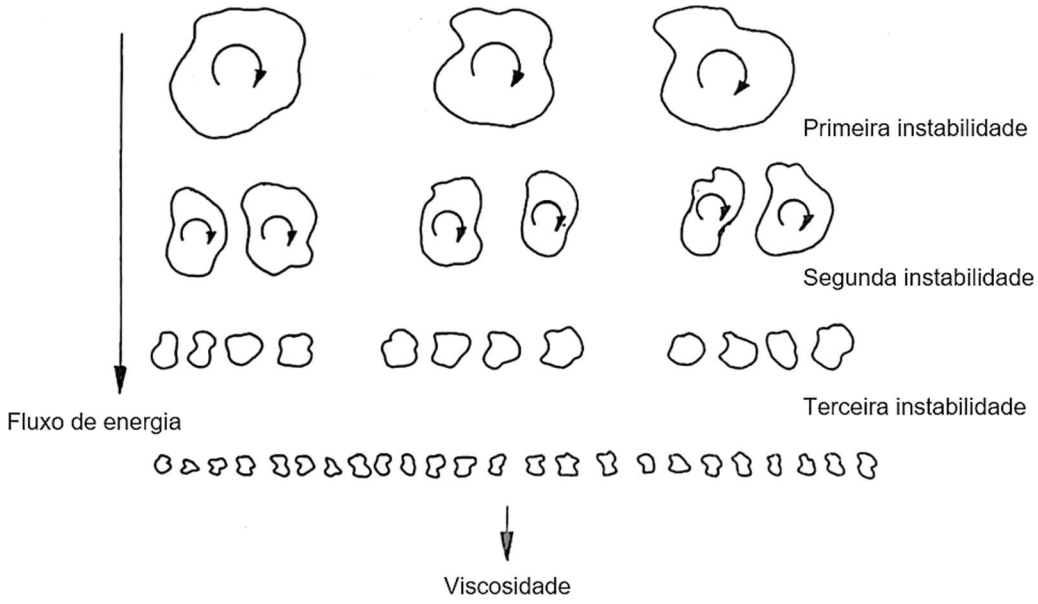
$$\frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} + \frac{\partial w'}{\partial z} = 0 \tag{2.56}$$

2.5.4 Escalas de Turbulência e Espectro de Energia Cinética Turbulenta

Richardson (1922) introduziu o conceito de cascata de turbulência (FIGURA 2.30), a qual descreve o processo pelo qual grandes vórtices, formados por instabilidades no escoamento médio, tornam-se instáveis devido a efeitos inerciais e se fragmentam (primeira instabilidade), transferindo sua energia para vórtices menores, por meio de um processo não viscoso e não linear.

Os vórtices menores, por sua vez, passam por um processo semelhante de ruptura, transferindo energia para vórtices ainda menores (segunda instabilidade). Esse fenômeno, repete-se sucessivamente, com a energia sendo transferida para escalas cada vez menores (terceira instabilidade), até que o número de Reynolds local, torne-se suficientemente pequeno. Assim, o movimento dos pequenos vórtices se torna estável, permitindo que a viscosidade molecular dissipe efetivamente a energia cinética na forma de calor.

FIGURA 2.30 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CASCATA DE ENERGIA



FONTE: Adaptado de Davidson (2004).

2.5.4.1 Escalas de Turbulência

Kolmogorov desenvolveu e quantificou a teoria proposta por Richardson, estabelecendo relações fundamentais entre as grandes e as pequenas escalas da turbulência, por meio da taxa de dissipação de energia (ε) e do número de Reynolds Re (relação entre as força inerciais e viscosas), conforme apresentado nas Equação (2.57) e Equação (2.58). Essa abordagem estatística, baseia-se na constatação de que, à medida que a escala de comprimento (ℓ) diminui, tanto as velocidades características turbulentas u(ℓ), quanto as escalas de tempo associadas $\tau(\ell)$, também diminuem.

$$\varepsilon = \frac{{u_0}^3}{l_0} \tag{2.57}$$

Onde:

ε = taxa de transferência de energia [$\mathrm{L^2T^{-3}}$];

u_0 = velocidade característica dos grandes vórtices [$\mathrm{LT^{-1}}$];

l_0 = comprimento característico dos grandes vórtices [L].

$$Re = \frac{u_0 \, \ell_0}{v} \tag{2.58}$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

v = viscosidade cinemática do fluido [$\mathrm{L^2T^{-1}}$];

u_0 = velocidade característica [$\mathrm{LT^{-1}}$];

ℓ_0 = escala de comprimento característica [L].

Por meio de análise dimensional, considerando a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε) e a viscosidade cinemática (v), derivam-se escalas únicas de comprimento, velocidade e tempo, aplicáveis tanto as maiores quanto as menores escalas, denominadas escalas de Kolmogorov (TABELA 2.1). As dimensões características dos grandes vórtices (l_0) são da ordem das escalas geométricas do escoamento L (escala integral), enquanto a intensidade de velocidade associada (u_0) representa a escala macroscópica das velocidades ($\overline{u}$). A taxa de dissipação de energia turbulenta desses vórtices é proporcional a ${u_0}^2$, e sua escala temporal típica é dada por $\tau_0 = l_0/u_0$.

Conforme evidenciado na TABELA 2.1, em regimes com alto números de Reynolds, as escalas características de velocidade e de tempo dos menores vórtices (u_η e τ_η) são significativamente menores em comparação com as escalas integrais dos maiores vórtices (u_0 e τ_0), resultando em uma relação entre as pequenas e grandes escalas muito reduzida.

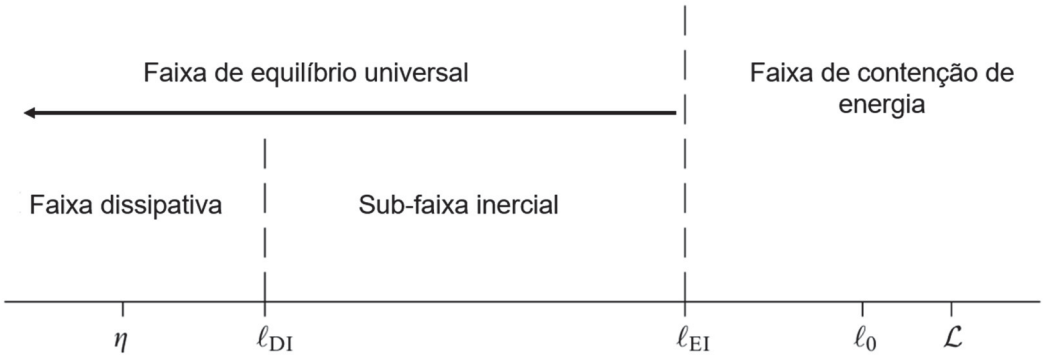
TABELA 2.1 – ESCALAS DE KOLMOGOROV

Escalas	Grandes	Pequenas	Relação: Pequenas/Grandes
Comprimento	$L = l_0$	$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}$	$\frac{\eta}{l_0} = Re^{-\frac{3}{4}}$
Tempo	$\tau_0 = l_0/u_0$	$\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}$	$\frac{\tau_\eta}{\tau_0} = Re^{-\frac{1}{2}}$
Velocidade	$u_0 = \bar{u}$	$u_\eta = (\nu\varepsilon)^{\frac{1}{4}}$	$\frac{u_\eta}{u_0} = Re^{-\frac{1}{4}}$

FONTE: Adaptado de Andrade (2023).

A FIGURA 2.31 ilustra as diferentes escalas de comprimento e os respectivos intervalos associados ao escoamento turbulento. Os sufixos EI e DI indicam que ℓ_{EI} é a linha de demarcação entre as faixas de energia (E) e inercial (I), enquanto ℓ_{DI} representa a linha de demarcação entre as faixas de dissipação (D) e inercial (I), de acordo com Pope (2000).

FIGURA 2.31 – ESCALAS DE COMPRIMENTO E FAIXAS (ℓ) DOS VÓRTICES EM ESCOAMENTOS TURBULENTOS



FONTE: Adaptado de Pope (2000).

As escalas de comprimento de Kolmogorov podem ser classificadas em duas faixas principais (Pope, 2000):

- Faixa de contenção de energia: a maior parte da energia está contida nos maiores vórtices, na faixa de tamanho $\ell_{EI} = \frac{1}{6}\ell_0 < \ell < 6\ell_0$, conhecida como faixa contendo energia. Nessa faixa, a turbulência tende a ser anisotrópica (varia em diferentes direções no espaço), sendo fortemente influenciada pela

geometria do fluxo (condições de contorno) e pelos mecanismos responsáveis pela sua geração;

- Faixa de equilíbrio universal: as estatísticas dos movimentos de pequena escala ($\ell < \ell_{EI}$) tendem a apresentar uma forma universal, determinada unicamente pela viscosidade (ν) e pela dissipação de energia (ε) para escalas sucessivamente menores. A taxa de dissipação (ε) é equivalente a taxa de transferência de energia ($\mathcal{T}_{EI}$), ou seja, $\varepsilon \approx \mathcal{T}_{EI}$. Essa faixa pode ser dividida em duas subfaixas: a subfaixa inercial ($\ell_{DI} < \ell < \ell_{EI}$), na qual os movimentos de transferência de energia são determinados pelos efeitos inerciais, sendo os efeitos viscosos desprezíveis; e a subfaixa dissipativa ($\ell < \ell_{DI}$), onde o número de Reynolds é suficientemente baixo, tal que os efeitos viscosos se tornam significativos e, portanto, são responsáveis por essencialmente toda a dissipação da energia. Dessa forma, a anisotropia é progressivamente atenuada nas menores escalas, através do processo de cascata de energia, resultando em um comportamento estatisticamente isotrópico (igual em todas as direções) da turbulência nas escalas de dissipação.

2.5.4.2 Espectro de Energia Cinética Turbulenta

A análise da distribuição da energia cinética turbulenta entre vórtices de diferentes escalas constitui um aspecto fundamental na caracterização e compreensão dos escoamentos turbulentos. Uma abordagem amplamente adotada para investigar essa distribuição é a representação espectral de energia, $E\ (\kappa)$, que se baseia na decomposição de Fourier do campo de velocidades em termos de números de onda (κ) ou, de forma equivalente, comprimentos de onda ($\lambda = 2\,\pi/\kappa$), de acordo com Wilcox (1998).

Definido $E\ (\kappa)d\kappa$ como a energia cinética turbulenta contida na faixa de números de onda entre κ e $\kappa + d\kappa$, onde κ representa a energia cinética por unidade de massa, podemos dizer que:

$$\kappa = \int_0^\infty E(\kappa)\, d\kappa \tag{2.59}$$

A teoria de Kolmogorov, apresentada anteriormente, propõe que, em escoamentos com elevado número de Reynolds, existe uma faixa intermediária entre as escalas integrais e as escalas dissipativas, denominada subfaixa inercial (WILCOX, 1998). Nessa região, a transferência de energia entre escalas é regida por efeitos inerciais, sendo desprezíveis tanto os efeitos viscosos quanto as estatísticas dos grandes vórtices. Assim, o espectro de energia $E\,(\kappa)$ depende apenas da taxa de dissipação ε e do número de onda κ. Por meio de análise dimensional, Kolmogorov obteve a seguinte relação:

$$E\,(\kappa) = \mathrm{C}_{\kappa}\ \varepsilon^{\frac{2}{3}}\ \kappa^{\frac{-5}{3}} \tag{2.60}$$

Onde:

$E\,(\kappa)$ = energia por unidade de massa associada ao número de onda κ [$\mathrm{L}^2\mathrm{T}^{-2}$];

C_{κ} = constante de Kolmogorov (experimentalmente entre 1 e 2);

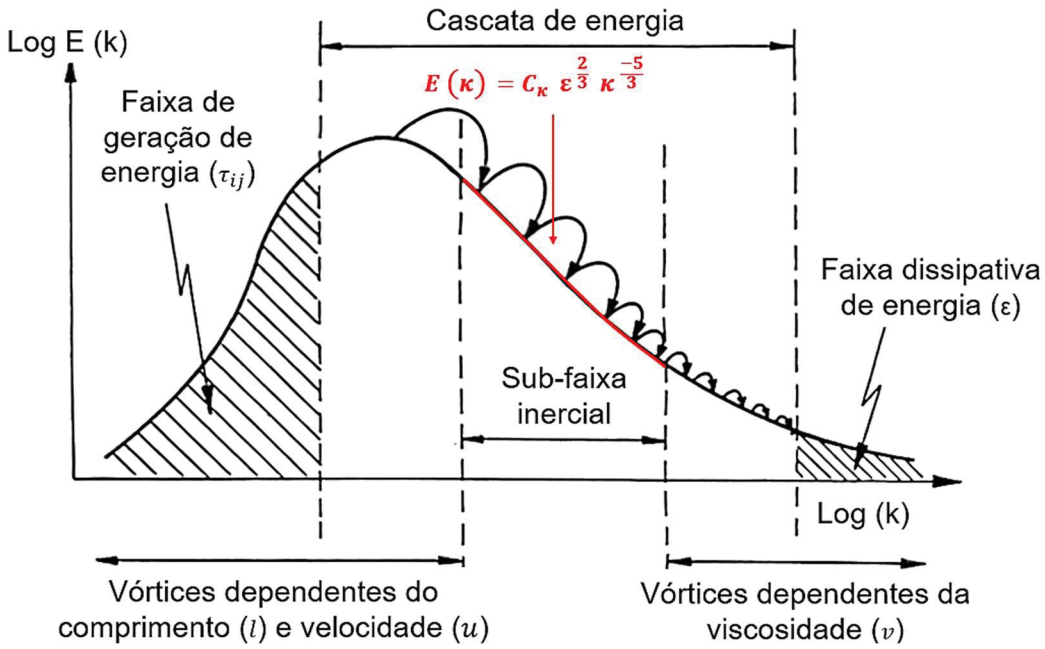
ε = taxa de transferência de energia [$\mathrm{L}^2\mathrm{T}^{-3}$];

κ = número de onda [L^{-1}].

Ao postular que, nessa faixa de números de onda, a transferência de energia é predominantemente inercial, Kolmogorov a denominou subfaixa inercial. A existência dessa região espectral tem sido amplamente confirmada por experimentos laboratoriais e simulações numéricas, embora a obtenção de evidências conclusivas tenha exigido décadas de investigação (WILCOX, 1998).

O espectro de energia turbulenta (Equação (2.60)) descreve como a energia cinética é distribuída entre as diferentes escalas espaciais de um escoamento turbulento, sendo representado em função do número de onda, conforme ilustrado na FIGURA 2.32.

FIGURA 2.32 – ESPECTRO DE ENERGIA – ESCOAMENTO TURBULENTO



FONTE: Adaptado de Davidson (2004).

2.5.5 Modelo de Turbulência RANS

A simulação numérica direta DNS (*Direct Numerical Simulation*) das equações de Navier-Stokes para escoamentos turbulentos de alto número de Reynolds é inviável devido ao proibitivo custo computacional, resultante da necessidade de malhas extremamente refinadas para resolução de todas as escalas turbulentas e de passos de tempo correspondentemente pequenos para garantir estabilidade e convergência. Para contornar a inviabilidade da aplicação da DNS, foram desenvolvidas simplificações nas equações de Navier-Stokes, como as equações RANS (*Reynolds-Averaged Navier Stokes*), que se baseiam na separação das variáveis em componentes médias e flutuações instantâneas. Essa abordagem permite descrever o escoamento de forma média, mas introduz termos adicionais (tensões de Reynolds), exigindo equações extras — os chamados modelos de turbulência — para fechar o sistema. Entre os modelos mais utilizados estão o k-ε, k-ω, RNG e o de Comprimento de Mistura.

2.5.6 Modelo de Turbulência LES

Os modelos de turbulência baseados em RANS buscam representar o comportamento médio do escoamento, não permitindo, portanto, a obtenção de informações detalhadas sobre as variações temporais de pressão e velocidade ao longo do escoamento. Para superar essa limitação, foi desenvolvida uma abordagem alternativa de modelagem de turbulência, denominada *Large Eddy Simulation* (LES), que visa capturar explicitamente os vórtices de maior escala, os quais têm papel relevante nos processos de dissipação de energia. Essa metodologia possibilita uma descrição mais precisa das flutuações temporais do escoamento.

2.5.7 Modelo Híbrido RANS-LES (DES)

A metodologia DES (*Detached Eddy Simulation*), proposta inicialmente por Spalart *et al*. (2006), configura-se como uma abordagem híbrida entre os modelos LES (*Large-Eddy Simulation*) e RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Segundo Shur *et al*. (1999), o DES consiste em uma solução numérica tridimensional e transiente, que utiliza um modelo de turbulência capaz de operar como modelo de sub-malha (SGS – *Smagorinsky Subgrid Scale*) em regiões onde a malha possui resolução suficiente para LES, e como modelo RANS nas demais regiões do domínio. Essa formulação híbrida tem como principal objetivo reduzir o esforço computacional associado ao elevado detalhamento de malha exigido pelo LES nas proximidades das superfícies sólidas, ao mesmo tempo em que mantém uma representação física adequada para escoamentos com altos números de Reynolds (WILCOX, 2006).

No modelo DES, o comprimento de escala adotado, denominado L_{DES}, é variável e determinado a partir de um parâmetro indireto associado ao tamanho da malha computacional, $C_{DES}\Delta$, e ao comprimento de escala turbulenta definido pelo modelo RANS, conforme a seguinte expressão:

$$L_{DES} = min\ (L_{RANS}, C_{DES}\,\Delta\,) \tag{2.61}$$

$$\Delta = max\ (\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z\,) \tag{2.62}$$

Onde:

L_{DES} = comprimento de escala LES [m];

L_{RANS} = comprimento de escala RANS [m];

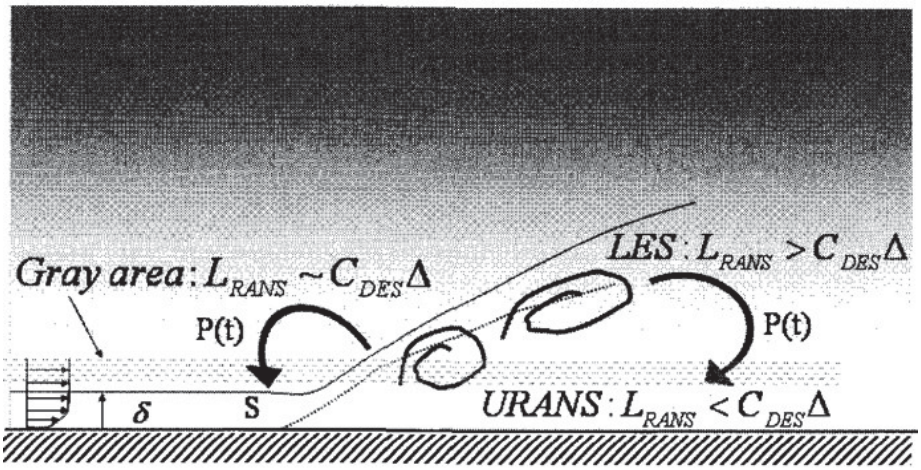
C_{DES} = constante relacionada as condições de contorno do modelo DES;

Δ_{xyz} = comprimento nas dimensões celulares aos respectivos eixos;

$\Delta\ ou\ L_{LES}$ = maior comprimento em uma das direções da célula [m].

A FIGURA 2.33 ilustra a separação do domínio para o uso das diferentes metodologias de simulação (LES/RANS) no escoamento, com a espessura da camada limite representada pela letra grega δ. Observa-se que, na região inferior da camada limite ($\delta < C_{DES}\Delta$), a modelagem é realizada como RANS, em razão do elevado grau de anisotropia da malha computacional, característico dessa região, e da flutuabilidade do campo de pressões. Em contrapartida, o modelo LES é empregado nas regiões mais afastadas das paredes ($L_{RANS} > C_{DES}\Delta$). A região de transição entre as duas abordagens, definida por $L_{RANS} \approx C_{DES}\Delta$, é denominada zona cinza, cuja análise é mais complexa, exigindo o tratamento conjunto das formulações RANS e LES.

FIGURA 2.33 – SOLUÇÃO DO ESCOAMENTO UTILIZANDO MODELO DES



FONTE: Sagaut, Deck e Terracol (2006).

Os modelos de fechamento da turbulência do tipo DES representam uma família de abordagens híbridas em CFD que combinam as vantagens dos métodos RANS e LES para simular escoamentos turbulentos complexos, especialmente aqueles com separação da camada limite e grandes estruturas instáveis.

No OpenFOAM®, os principais modelos DES disponíveis incluem kOmegaSSTDES e SpalartAllmarasDES. Dentre eles, o modelo kOmegaSSTDES baseia-se na formulação $k-\omega$ SST desenvolvida por Menter (1993), que combina os pontos fortes de dois modelos clássicos: o $k-\varepsilon$ padrão, adequado para regiões afastadas das superfícies, e o $k-\omega$ padrão, mais eficaz nas proximidades das paredes, através de uma função de mistura. Essa combinação oferece uma transição suave entre os regimes RANS e LES, contribuindo para maior precisão e estabilidade em simulações híbridas.

3 DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DO PROJETO PILOTO

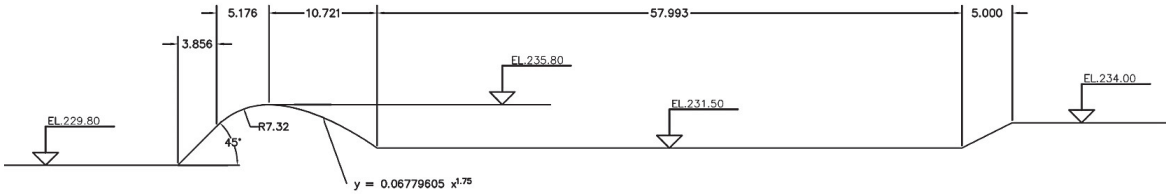
Como etapa fundamental da metodologia, a definição geométrica do projeto piloto serviu como informação básica para a construção dos modelos físico e computacional. Este capítulo apresenta, portanto, de forma resumida, o processo de definição da geometria do vertedouro e da comporta segmento, com ênfase em sua viga inferior.

O projeto piloto baseou-se na configuração do vertedouro de baixa queda, dos Estudos de Viabilidade da UHE Ercilândia no rio Piquiri, realizado em 2012 pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) em parceria com as empresas Walm – Engenharia e Tecnologia Ambiental e Engecorps (COPEL; ENGECORPS-WALM, 2012. No entanto, modificações foram implementadas para atender aos objetivos específicos deste estudo. A partir dessas alterações, foram definidas as características finais do vertedouro e detalhada a estrutura da comporta segmento. Adicionalmente, análises numéricas preliminares foram realizadas para avaliar as condições de escoamento na configuração proposta.

3.1 PERFIL DO VERTEDOURO

As modificações no projeto inicial do vertedouro do Projeto Piloto, originalmente baseado nos Estudos de Viabilidade da UHE Ercilândia, tiveram como objetivo induzir condições específicas de escoamento para o estudo dos esforços hidrodinâmicos em comportas segmento. As alterações implementadas compreenderam a mudança geométrica do perfil do vertedouro, o rebaixamento da elevação da crista do vertedouro, a redefinição das elevações do canal de aproximação e da bacia de dissipação, e mudança geométrica do defletor. A FIGURA 3.1 apresenta essas alterações, as quais tiveram como principal finalidade configurar um vertedouro de baixa queda.

FIGURA 3.1 – PERFIL DO VERTEDOURO – ALTERNATIVA INICIAL



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

As características da alternativa inicial do vertedouro do Projeto Piloto são apresentadas a seguir:

- Quantidade de vãos: 6
- Largura dos vãos: 13,00 m
- Cota do canal de aproximação: 229,80 m;
- Cota da crista: 235,80 m;
- Cota da bacia de dissipação: 231,50 m (posteriormente 232,00 m);
- Cota do canal de restituição: 234,00 m;
- Carga de projeto: 15,75 m.

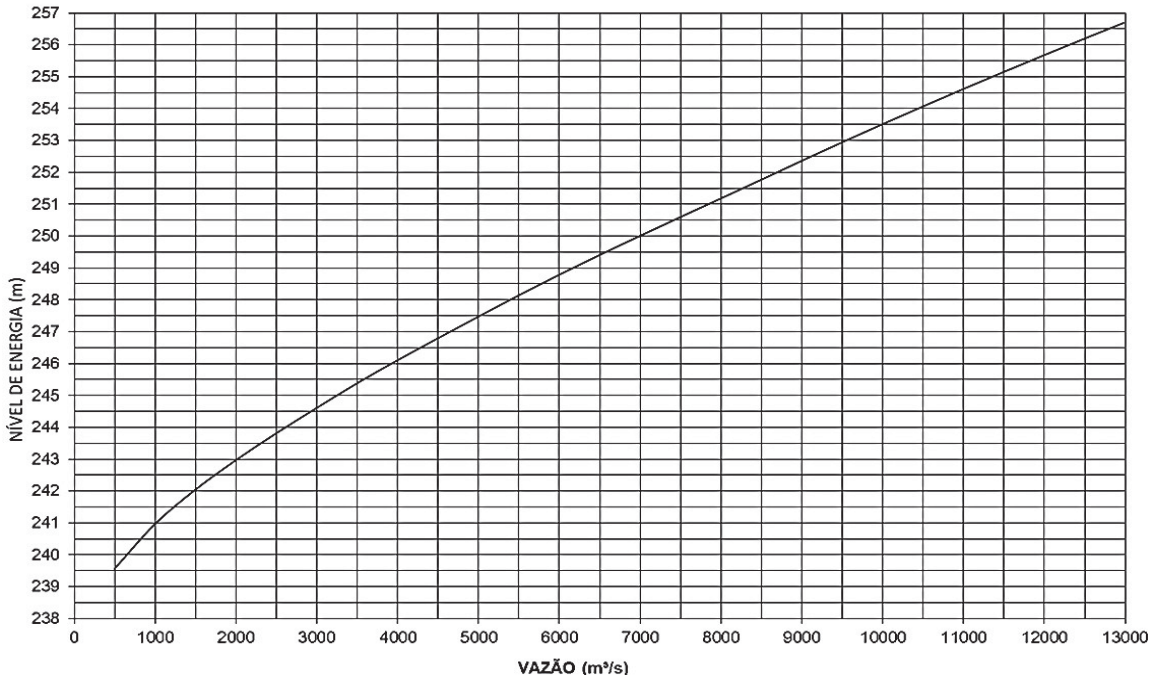
3.2 CAPACIDADE DE DESCARGA

A capacidade de descarga do vertedouro foi avaliada utilizando coeficientes de contração de pilar (0,005) e ombreira (0,15), para pilares de 3,5 m de espessura, inicialmente. Com base nessas características, a curva teórica de descarga do vertedouro (FIGURA 3.2) foi determinada conforme os critérios do *Bureau of Reclamation* (1973), como a redução do coeficiente de descarga produzida pela submergência por jusante (FIGURA 3.3). A avaliação do afogamento da ogiva considerou os níveis estabelecidos pela curva-chave atuando imediatamente a jusante da ogiva.

A curva de descarga do vertedouro (FIGURA 3.2) indica que, em termos teóricos, a vazão de projeto de 12.975 m³/s é escoada com o nível do reservatório ligeiramente inferior à cota 256,80 m. Nessa condição, o coeficiente de descarga estimado foi de aproximadamente $1{,}72\ m^{\frac{1}{2}}/s$, valor bastante próximo ao associado a vertedouros com soleira espessa.

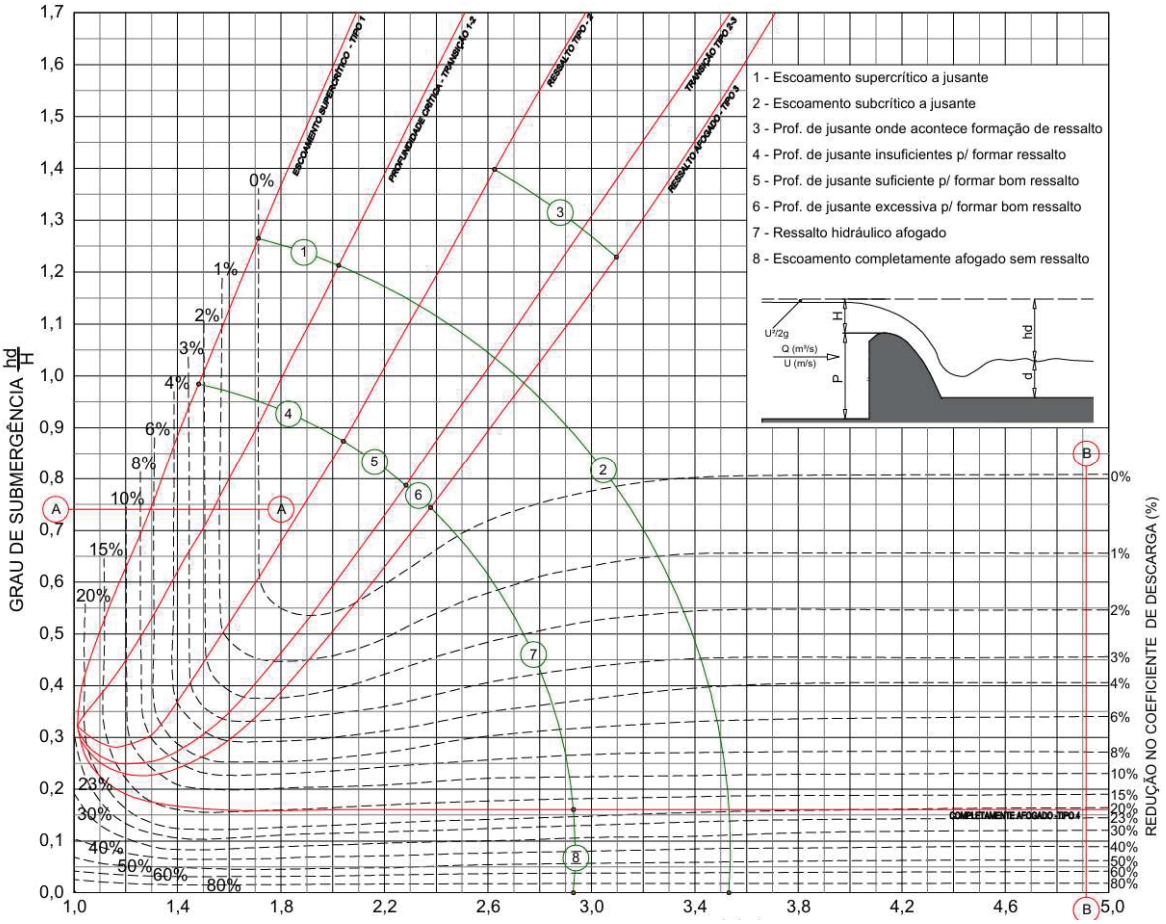
Já a condição de retenção do ressalto hidráulico, foi avaliada pela expressão de Bélanger (1828). A FIGURA 3.4 ilustra essa análise, evidenciando que o nível de jusante definido pela curva-chave (curva em preto), permanece consistentemente superior à profundidade conjugada do ressalto (curva em azul), considerando o nível do reservatório de 255,80 m.

FIGURA 3.2 – CURVA DE DESCARGA TEÓRICA DO VERTEDOURO



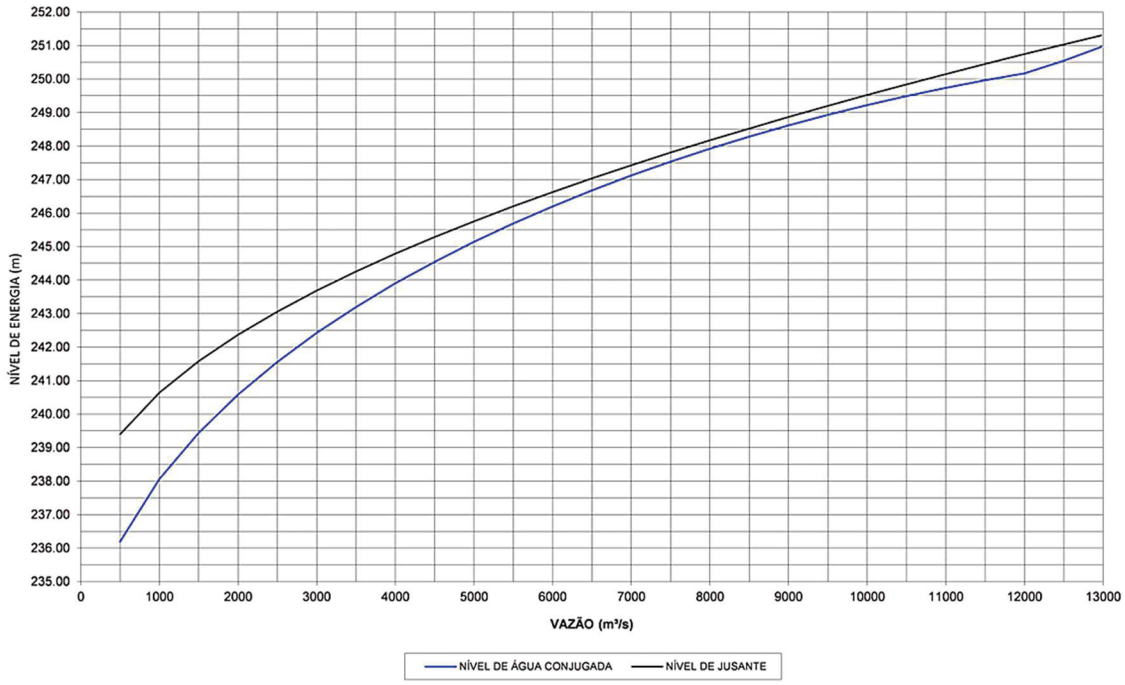
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

FIGURA 3.3 – REDUÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA PRODUZIDA PELA SUBMERGÊNCIA POR JUSANTE



FONTE: Adaptado de Dettmer (2013).

FIGURA 3.4 – CONDIÇÕES DE RETENÇÃO DO RESSALTO



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

A configuração do vertedouro foi avaliada por meio de ensaios em modelo físico reduzido, construído na escala 1:80, no Laboratório de Hidráulica do LACTEC (CEHPAR). Nesse modelo, foram instaladas apenas a soleira vertente e a bacia de dissipação, sem a inclusão de pilares, comportas ou demais elementos estruturais do vertedouro. A montante, foi implantado um piso na cota 229,80 m, representando o canal de aproximação, enquanto a jusante foi construído um piso na cota 234,00 m, correspondente ao canal de restituição.

O canal experimental foi adaptado para possibilitar a substituição de parte da soleira, com o objetivo de avaliar diferentes alternativas geométricas. Foram analisadas três configurações, todas mantendo a crista da soleira na elevação 235,80 m, mas com modificações no trecho compreendido entre a crista e a bacia de dissipação. A primeira alternativa (FIGURA 3.1) corresponde ao perfil inicial, que apresenta um ângulo acentuado entre o pé da soleira e o início da bacia. A segunda alternativa incorporou uma contracurva com raio de 20 m nesse mesmo trecho. Ambas as configurações resultaram em descolamento do escoamento na superfície da soleira. Com base nesse comportamento, foi proposta uma terceira alternativa, que consistiu no preenchimento da zona de separação observada nas opções anteriores.

Essa solução, apesar de não convencional, mostrou-se eficaz na eliminação da separação do escoamento, promovendo um escoamento aderente ao perfil da estrutura.

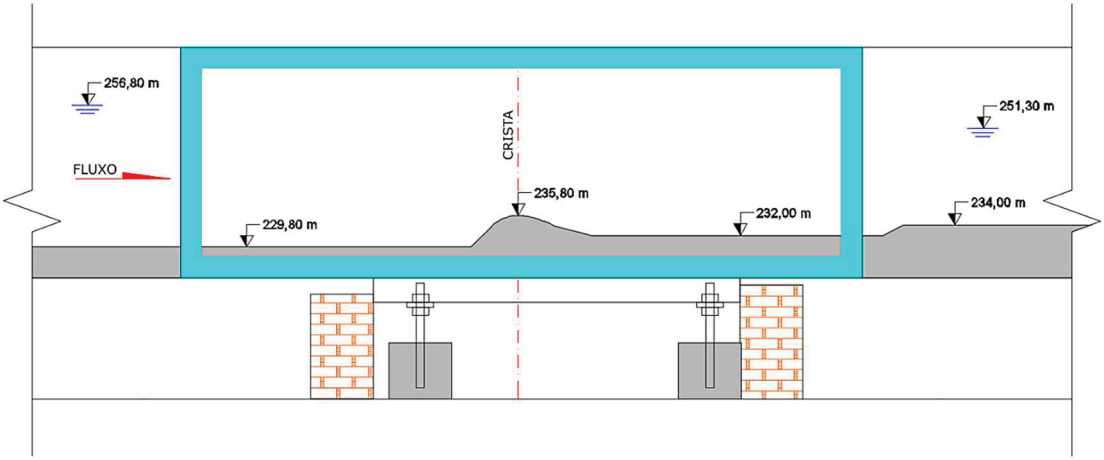
3.3 LARGURA DO VÃO

As análises preliminares realizadas em modelo seccional do vertedouro indicaram que a capacidade de descarga da estrutura era significativamente afetada pelo afogamento decorrente dos elevados níveis a jusante. Para mitigar esse efeito, foi necessária a ampliação da largura efetiva dos vãos, inicialmente definidos com 13,00 m.

No primeiro ensaio, realizado com seis vãos do vertedouro com largura de 13,00 m e vazão específica de 166,3 m³/s/m, o nível de energia a montante atingiu 257,13 m, 0,33 m acima do nível de água máximo Maximorum do reservatório (256,80 m). Na segunda alternativa, com aumento da largura dos vãos para 14,00 m e vazão específica de 154,5 m³/s/m, o nível de montante foi reduzido para 256,31 m, mas ainda acima do limite. Um terceiro ensaio foi realizado, com vãos de 15,00 m largura e vazão específica de 144,2 m³/s/m, resultando em um nível de energia de montante de 255,51 m. Considerando os coeficientes de contração dos pilares de 0,005 e dos encontros laterais de 0,15, estimou-se que essa configuração permitiria descarregar a cheia decamilenar, mantendo o nível de água do reservatório em 256,80 m. Por fim, um quarto ensaio foi conduzido com a mesma geometria dos vãos e vazão específica, porém com alteamento da bacia de dissipação de 231,50 m para 232,00 m (FIGURA 3.5), verificando-se, que mesmo com essa mudança da configuração na bacia de dissipação, o vertedouro mostrou capacidade de descarregar a cheia de projeto (12.975 m³/s).

Em suma, a vazão específica de 144,2 m³/s/m demonstrou atender às condições de projeto do vertedouro, conforme indicado pelos ensaios realizados em canal experimental. Inicialmente, os testes consideraram uma configuração com seis vãos. Contudo, após reunião técnica entre a empresa proponente e as empresas executoras, definiu-se a adoção de cinco vãos com 18,00 m de largura, configuração que passou a ser utilizada para as demais definições do projeto.

FIGURA 3.5 – MODELO FÍSICO IMPLANTADO NO CANAL EXPERIMENTAL



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

3.4 CARACTERÍSTICAS DA COMPORTA SEGMENTO

Nos ensaios em modelo seccional, foi possível se avaliar o perfil de linha de água, para vazões de 10.000 anos (144,2 m³/s/m) e 500 anos (109,5 m³/s/m) de recorrência, considerando a largura livre do vertedouro de 90 m. Os perfis de linha d'água obtidos, apesar de variações temporais e da ausência da comporta nos ensaios, forneceram dados aproximados para definir a posição de abertura máxima da comporta (cheia decamilenar) e a posição provisória do munhão (cheia de 500 anos). Levando em conta estes aspectos, concebeu-se a comporta segmento com as seguintes características principais:

- Largura do vão livre: 18,00 m
- Raio externo: 26,00 m;
- Cota do centro do munhão: 250,80 m;
- Cota do ponto de assentamento da comporta na soleira: 234,271 m;
- Cota da soleira: 235,80 m.

O projeto mecânico das comportas segmento seguiu a metodologia convencional, baseada na NBR 8883/2008 e na DIN 19704, normas de referência para cálculo de comportas hidráulicas. Suas características principais são apresentadas no QUADRO 3.1.

QUADRO 3.1 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS COMPORTAS SEGMENTO

Identificação	**Característica**
Tipo de comporta	Segmento de superfície
Número de comportas	5
Número de jogos de peças fixas	5
Tipo de acionamento	Servomotores hidráulicos
Raio nominal da comporta	R = 26,00 m
Largura do vão livre	VL = 18,00 m
Cota do eixo dos mancais da comporta	250,80 m
Cota do ponto de assentamento da comporta	NS = 234,27 m
Altura da comporta na vertical	22,53 m
Nível d'água máximo normal	NA = 255,80 m
Nível d'água máximo ocasional	NO = 256,80 m
Peso específico da água	γ = 9,81 kN/m³
Resistência característica do concreto	$f_{\{ck\}}$ = 25MPa
Módulo de elasticidade do concreto	E_c = 23.800 MPa
Módulo de elasticidade do aço	E_s = 206.000 MPa

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2020).

No movimento de abertura, o esforço de manobra no servomotor resulta da soma dos momentos devido ao peso e aos atritos, sendo apresentado na TABELA 3.1 para diferentes estágios de abertura, de 0% a 100%. Para garantir a segurança operacional, a capacidade do servomotor deve considerar um coeficiente de majoração de 1,15 sobre o maior esforço calculado (2,125 MN), resultando em uma capacidade mínima de 2,44 MN (meganewton).

TABELA 3.1 – ESFORÇOS PARA ABERTURA DA COMPORTA

Abertura (%)	**Esforço (MN)**
0	1,855
10	1,761
20	1,705
30	1,654
40	1,611
50	1,579
60	1,565
70	1,578
80	1,637
90	1,782
100	2,125

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2020).

3.5 GEOMETRIA DOS PILARES

A definição dos pilares do projeto piloto baseou-se na determinação dos esforços no munhão e nas paredes dos pilares, com um esforço calculado de 4.171,48 tf no munhão. Diante disso, conclui-se que pilares com 4,5 m de largura são adequados, pois já foram validados em projetos similares que suportam esforços superiores. Além da largura dos pilares, o esforço máximo na comporta também influencia as dimensões do munhão, estimadas em 3,5 m de base, 4,0 m de altura, 1,50 m de balanço e 9,00 m de comprimento para o projeto piloto.

3.6 CONDIÇÕES DO ESCOAMENTO

Visando avaliar as condições de escoamento na configuração proposta para o Projeto Piloto, realizaram-se algumas análises numéricas simplificadas no software FLOW-3D®, utilizando um modelo bidimensional e o modelo de turbulência $k - \varepsilon$. As simulações consideraram as características do perfil hidráulico do vertedouro e da comporta, com o objetivo de avaliar o comportamento do escoamento para diferentes aberturas e identificar a possível ocorrência de afogamento da comporta, em função dos níveis de jusante definidos pela curva chave de jusante.

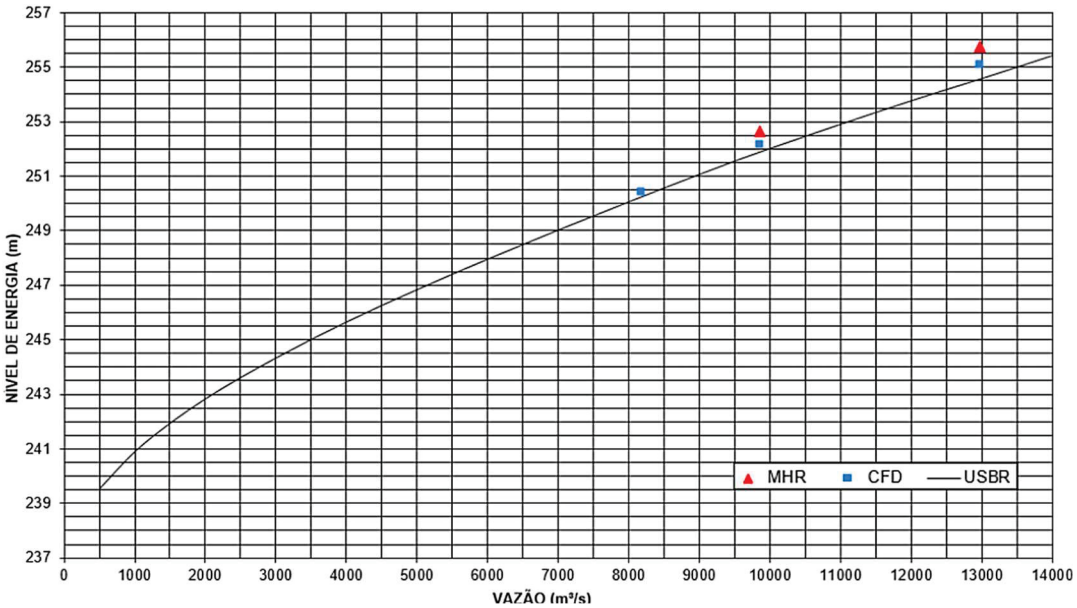
As análises das condições de escoamento considerando abertura total das comportas, para tempos de recorrência de 100, 500 e 10.000 anos, são apresentadas na TABELA 3.2 e FIGURA 3.6. Os resultados numéricos obtidos (marcador azul), apresentaram valores intermediários entre os valores teóricos do USBR (linha preta) e os obtidos nos ensaios em modelo reduzido (marcadores em vermelho).

TABELA 3.2 – RESULTADOS NUMÉRICOS – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA TOTAL DAS COMPORTAS

Recorrência (anos)	Vazão específica (m³/s)	Vazão (m³/s)	Nível de energia de montante	Nível de jusante (m)
100	90,86	8.177,4	250,42	248,30
500	109,51	9.855,9	252,18	249,43
10.000	144,17	12.975,3	255,07	251,30

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

FIGURA 3.6 – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA TOTAL DAS COMPORTAS



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

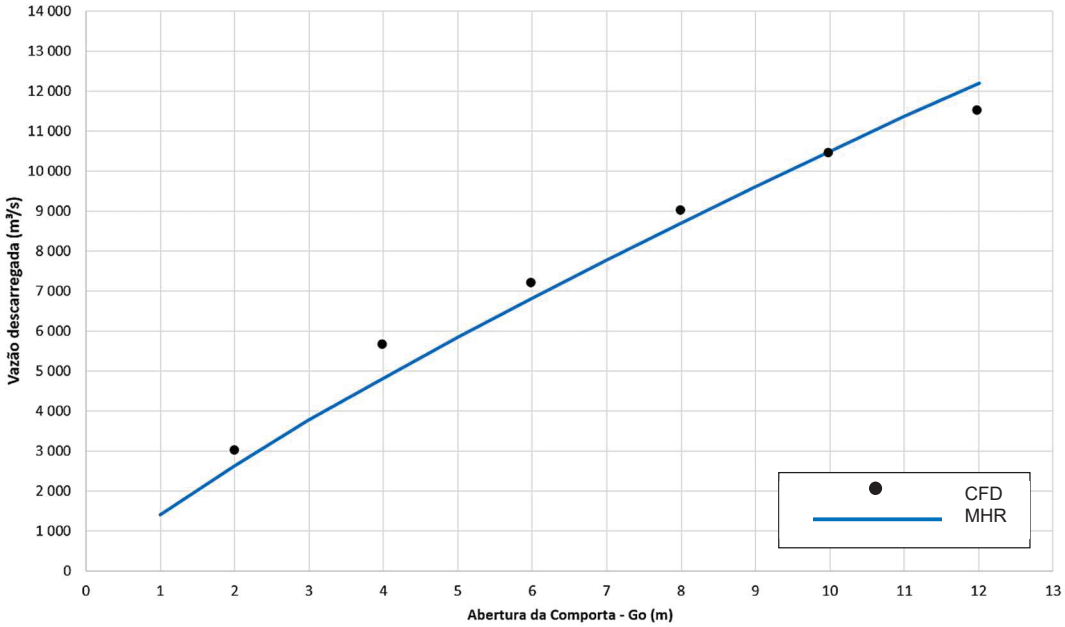
Para avaliar o escoamento com aberturas parciais da comporta (entre 2 e 12 m), adotou-se um processo iterativo, fixando o nível de montante em 255,80 m, determinando o nível de jusante a partir da curva-chave e ajustando a vazão especifica até a convergência dos resultados (TABELA 3.3). Posteriormente a capacidade de descarga foi comparada com os valores teóricos obtidos em ensaios de modelos hidráulicos reduzidos (FIGURA 3.7).

TABELA 3.3 – RESULTADOS NUMÉRICOS – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA PARCIAL DAS COMPORTAS

Abertura da comporta (Go)	Nível de energia de montante (m)	Vazão específica escoada (m³/s/m)	Nível de jusante (m)
2	255,71	33,19	243,67
4	255,82	62,42	246,30
6	255,83	79,88	247,57
8	255,81	99,79	248,85
10	255,96	115,92	249,80
12	255,64	127,46	250,43

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

FIGURA 3.7 – CAPACIDADE DE DESCARGA – ABERTURA PARCIAL DAS COMPORTAS



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

As análises numéricas revelaram que a comporta, em abertura total, apresentou maior capacidade de descarga em comparação ao modelo reduzido. Já as simulações com aberturas de 2 a 12 m indicaram afogamento apenas na abertura mínima, sugerindo operação livre de afogamento na maioria dos casos. Para estudos específicos de afogamento, recomenda-se a utilização de níveis de jusante superiores aos da curva-chave.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são detalhados os materiais e métodos utilizados nos estudos experimentais e numéricos. Inicialmente, é descrita a configuração da instalação experimental, incluindo as especificações do canal e dos equipamentos de instrumentação utilizados na aquisição de dados de vazão, níveis d'água, pressões e esforços, além da definição das condições hidráulicas a serem ensaiadas. Subsequentemente, é apresentada a metodologia adotada na modelagem computacional, abordando a definição da geometria e da malha, a especificação das condições de contorno e iniciais, bem como a determinação do modelo de simulação, do modelo de turbulência e do método de solução, utilizados na resolução das equações governantes.

4.1 MODELO FÍSICO

Este capítulo descreve os procedimentos experimentais utilizados para a medição das grandezas físicas no modelo hidráulico reduzido, abrangendo a caracterização do escoamento (vazão, velocidades e pressões), a análise da superfície livre (alturas de água e ressalto hidráulico) e a quantificação das forças hidrodinâmicas nas comportas. A execução do modelo hidráulico reduzido ficou sob responsabilidade da equipe do Laboratório de Hidráulica do LACTEC (CEHPAR), que conduziu tanto a construção quanto a operação dos ensaios. Os resultados obtidos no modelo físico foram repassados regularmente às instituições parceiras (Intertechne e Copel), para subsidiar o desenvolvimento do projeto.

4.1.1 Instalação do Modelo Hidráulico Reduzido

O canal experimental com aproximadamente 29 m de comprimento (em escala de modelo), ilustrado na FIGURA 4.1, foi construído no laboratório de hidráulica do Lactec (CEHPAR), em escala geométrica 1:25 com objetivo de simular o projeto piloto, de modo a permitir a instalação da instrumentação necessária para a medição de esforços na viga inferior da comporta.

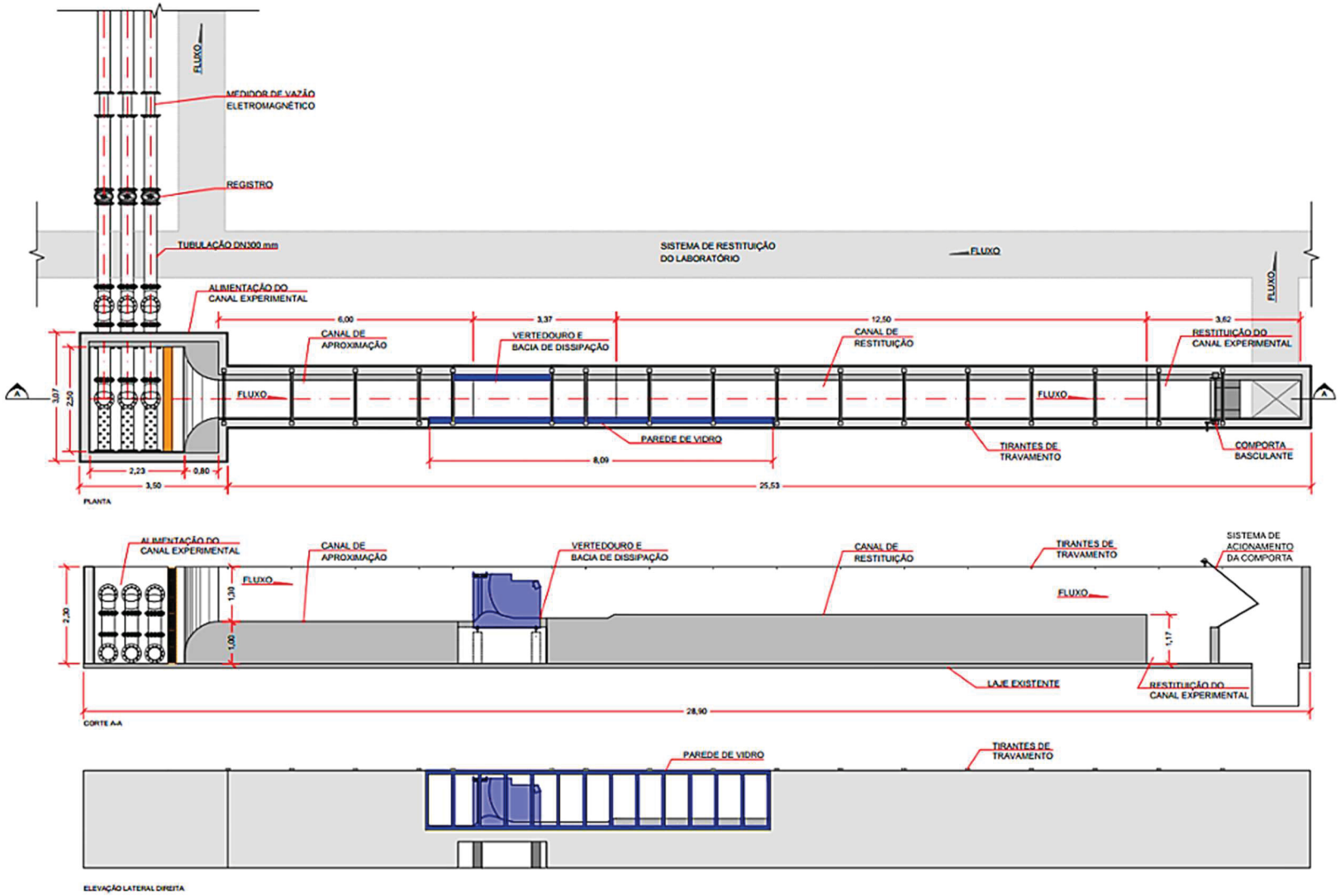
FIGURA 4.1 – CONSTRUÇÃO DO CANAL EXPERIMENTAL

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

O modelo físico reduzido do vertedouro foi projetado para reproduzir um vão completo de 0,72 m de largura, acompanhado por dois meios pilares de 0,18 m cada, totalizando 0,90 m de largura. Essa configuração foi escolhida para otimizar a representação do escoamento e garantir a estabilidade do ressalto hidráulico na bacia de dissipação, conforme verificado nos ensaios exploratórios. Além disso, a modelagem com um único vão, facilita a instrumentação da comporta, permitindo sua instalação direta nas paredes do canal experimental. A FIGURA 4.2 apresenta um croqui da vista superior e da elevação das estruturas que compõem o modelo reduzido, incluindo o sistema de alimentação, sistema de restituição, canal de aproximação, soleira do vertedouro, pilares, comporta segmento, bacia de dissipação e canal de restituição, em escala de modelo.

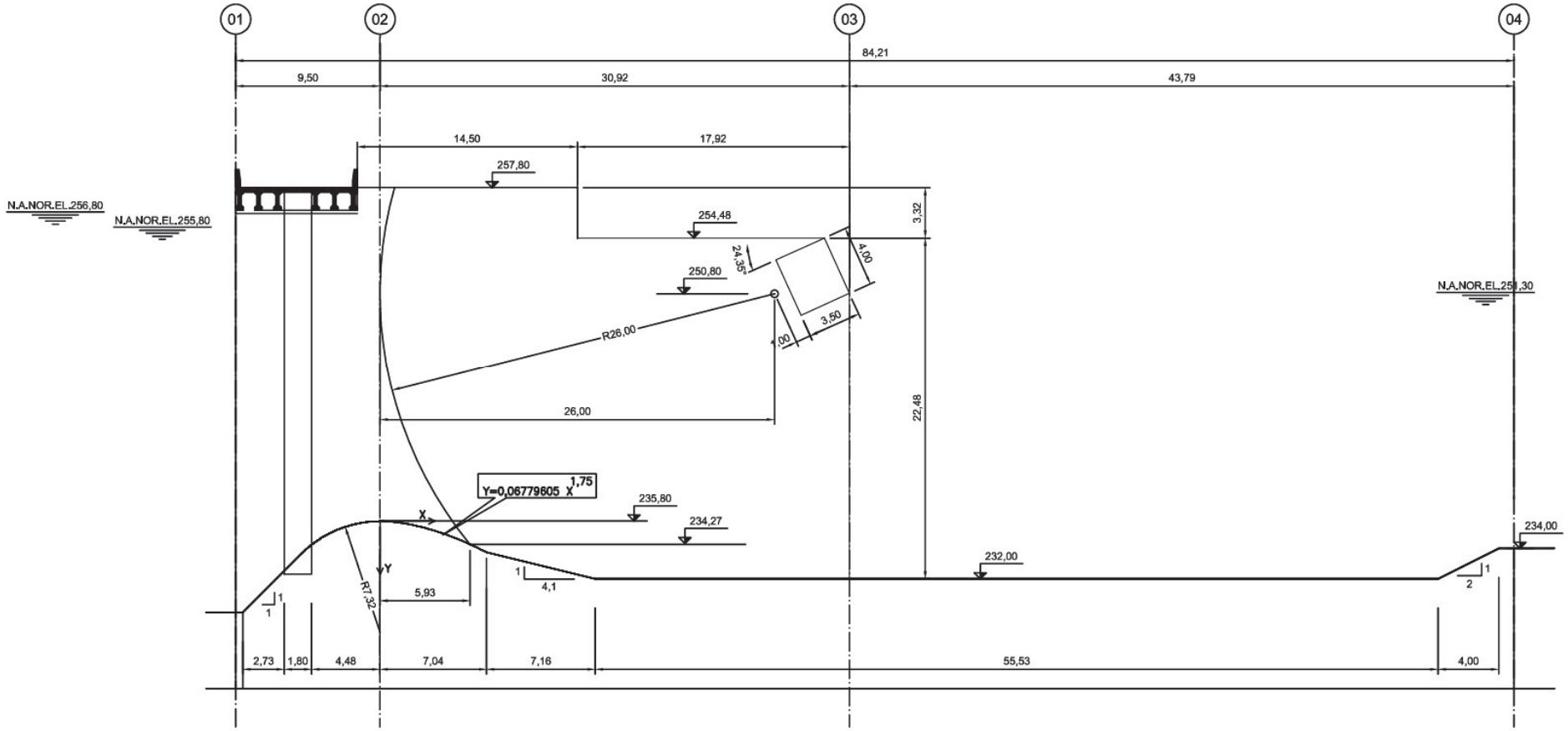
A definição da altura do canal experimental, em 1,30 m, foi essencial para garantir a simulação precisa das condições hidráulicas. Esse valor foi determinado levando em conta a profundidade do escoamento, a altura do pilar (257,80 m em escala real), as condições de aproximação do fluxo (canal de aproximação na Elv. 229,80 m) e o acesso adequado ao modelo físico. A FIGURA 4.3 mostra um corte longitudinal do vertedouro, destacando os níveis d'água de operação.

FIGURA 4.2 – PROJETO CONSTRUTIVO DO CANAL – PLANTA, CORTE E ELEVAÇÃO (DIMENSÕES EM ESCALA DE MODELO)



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

FIGURA 4.3 – PROJETO DO VERTEDOURO – CORTE LONGITUDINAL (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO)

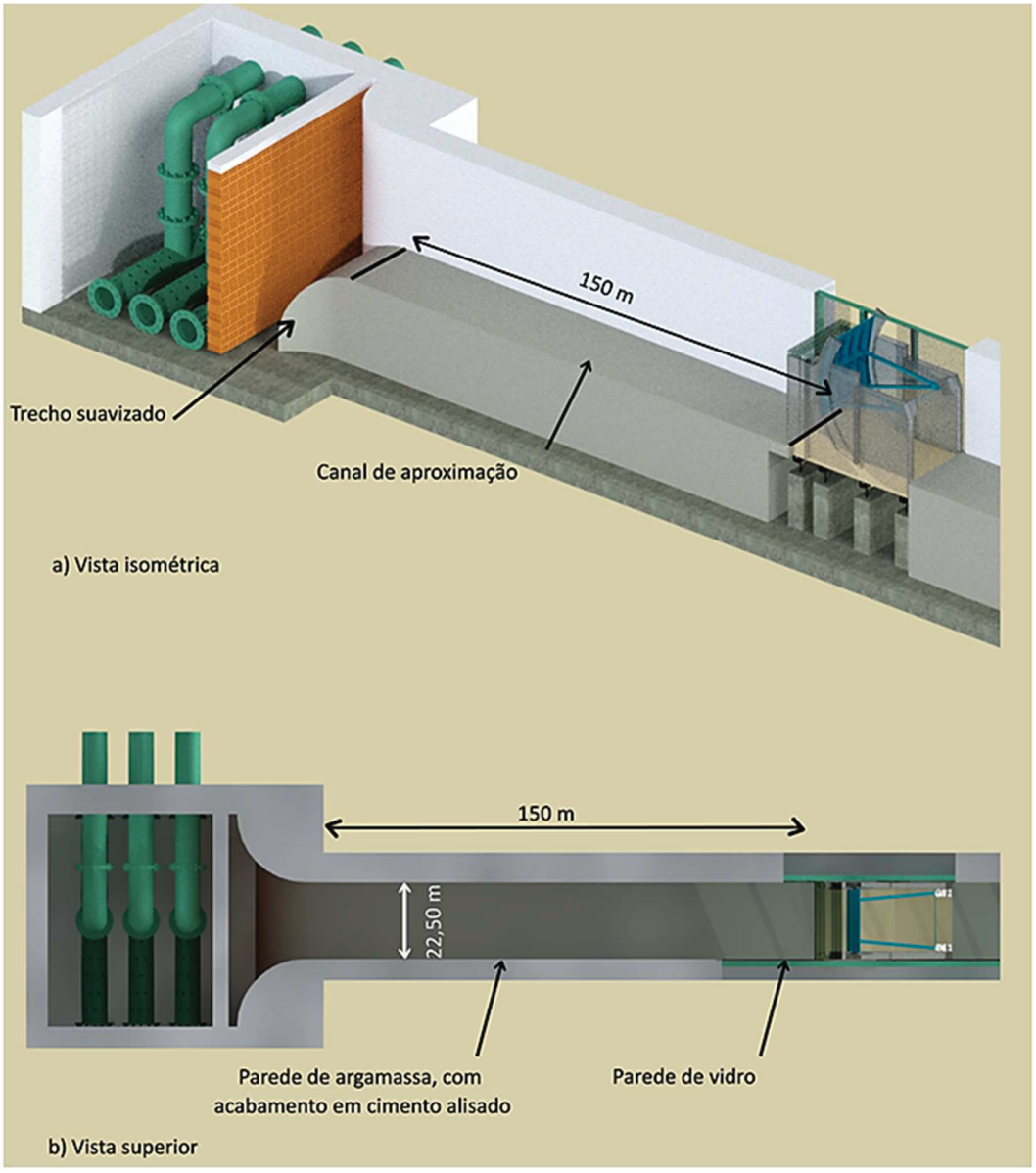


FONTE: PD-06491-0445/2017 (2020).

A alimentação do canal foi realizada por três linhas de tubos e conexões de 300 mm (diâmetro interno de 270 mm), com capacidade para fornecer vazões de até 650 l/s, controladas por registros de gaveta. Para acomodar as tubulações e garantir a tranquilização do escoamento de alimentação, foi necessário incluir uma profundidade de 1,00 m no modelo (totalizando 2,30 m de altura) e um comprimento de 3,02 m, conforme ilustrado na FIGURA 4.4. Para garantir a tranquilização do escoamento foi construída uma parede de tijolos com furos longitudinais, e a geometria da caixa foi suavizada com o acréscimo de abas arredondadas.

Em escala de protótipo, o canal de aproximação possui 22,5 m de largura e foi construído na Elv. 229,80 m, com um comprimento total de 150 m, conforme apresentado a seguir.

FIGURA 4.4 – SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO)



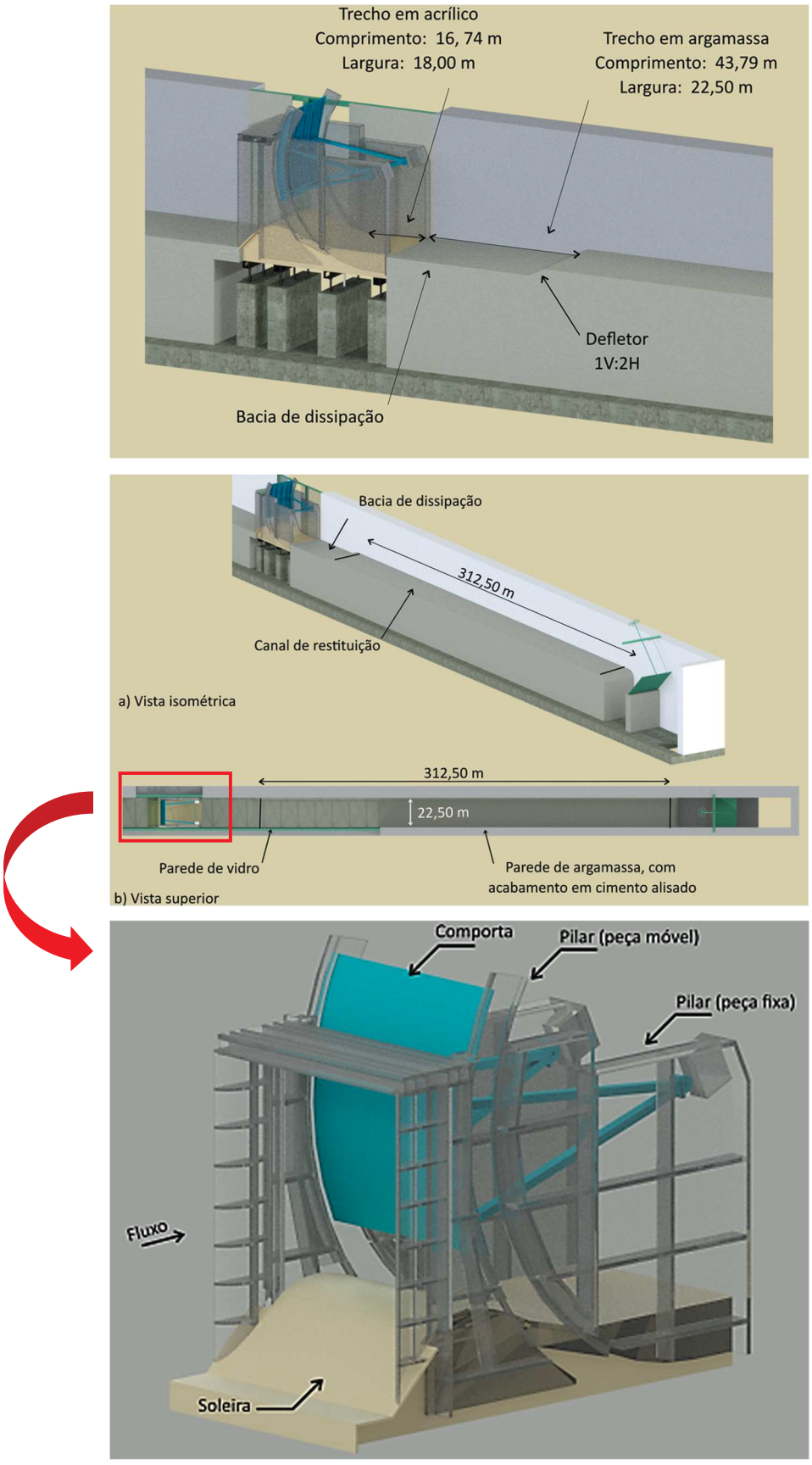
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

O modelo experimental apresenta também um canal de restituição, construído na Elv. de 234,00 m, com 312,5 m de comprimento e 22,5 m de largura (em escala de protótipo). A bacia de dissipação, integrada a este canal, é composta por duas seções: uma inicial em acrílico (16,74 m × 18,00 m), estendendo-se da soleira até os meios pilares, e uma subsequente em argamassa (43,79 m × 22,50 m), que se prolonga do final dos meios pilares até o canal de restituição. Para otimizar a dissipação de energia, um defletor de 4,00 m foi instalado no trecho final da bacia.

No final do modelo, foi construído um sistema de restituição, que incorpora uma comporta basculante para o controle do nível de jusante e retorno da água ao

circuito interno de recalque do laboratório. A FIGURA 4.5 ilustra a disposição do canal de restituição e detalha a configuração a bacia de dissipação.

FIGURA 4.5 – BACIA DE DISSIPAÇÃO E SISTEMA DE RESTITUIÇÃO (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO)



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

A comporta segmento, elemento central do estudo, foi instalada com estrutura em acrílico, reforçada para minimizar vibrações e equipada com instrumentos de medição de pressão. Os meios pilares foram projetados com partes fixas e móveis para garantir flexibilidade. As características da comporta serão detalhadas em escala de protótipo no próximo subitem.

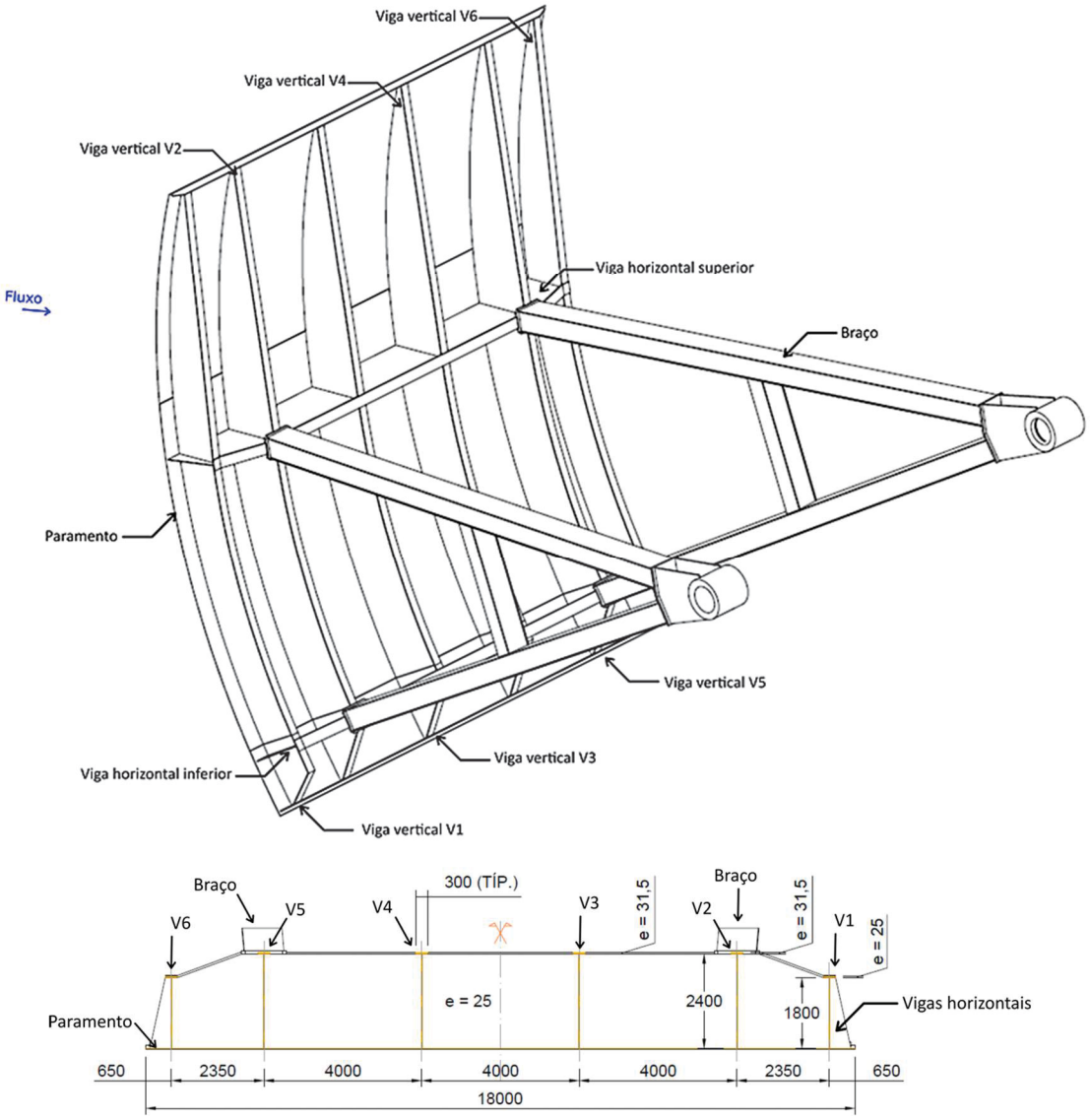
4.1.2 Comporta Segmento

A comporta segmento do modelo hidráulico reduzido é composta pelos seguintes elementos principais (FIGURA 4.6):

a) Paramento (tabuleiro): dimensionado com raio de 26 m, apresenta espessuras variáveis de 9,5 mm (superior), 12,5 mm (intermediário) e 16,0 mm (inferior);
b) Vigas verticais: as coordenadas lineares das vigas verticais V1, V2 e V3, medidas a partir da extremidade lateral do paramento da comporta, são 0,65 m, 3 m e 7 m;
c) Vigas horizontais: localizadas a 2 m e 13 m de distância da borda inferior da comporta, possuem almas de 25,0 mm e mesas de 50,0 mm de espessura;
d) Braços: com seção retangular de 0,7 m de altura x 1 m de largura, conectam-se à comporta na interseção das vigas verticais V2 e V5 com as vigas horizontais.

A transposição das dimensões da comporta segmento para a escala de modelo resultou em espessuras milimétricas. Essa restrição dimensional limitou as opções de material, exigindo uma solução que combinasse espessura adequada com rigidez estrutural, para suportar as condições de operação do modelo. Assim, foi definia a execução da comporta segmento a partir de chapas de aço galvanizado. Já os braços da comporta, com dimensões em escala de modelo de 28 mm de altura e 40 mm de largura, foram construídos utilizando tubos de aço de seção retangular com dimensões externas de 30 mm x 40 mm.

FIGURA 4.6 – GEOMETRIA DA COMPORTA SEGMENTO COM DETALHE DA VIGA HORIZONTAL (DIMENSÕES EM ESCALA DE PROTÓTIPO)



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

A partir da revisão bibliográfica sobre o uso de instrumentos para a medição de esforços na viga inferior de comportas, no projeto de pesquisa (P&D) identificaram-se como métodos mais adequados para o presente estudo os sensores eletrônicos de pressão, as células de carga, os sensores de pressão táteis e os acelerômetros. Após análise crítica desses métodos, considerando suas limitações e desafios de aplicação, foram selecionados os sensores eletrônicos de pressão e as células de carga como os instrumentos mais viáveis para o registro dos esforços hidrodinâmicos atuantes sobre a comporta segmento submetida a ondas de ressalto hidráulico. Considerando

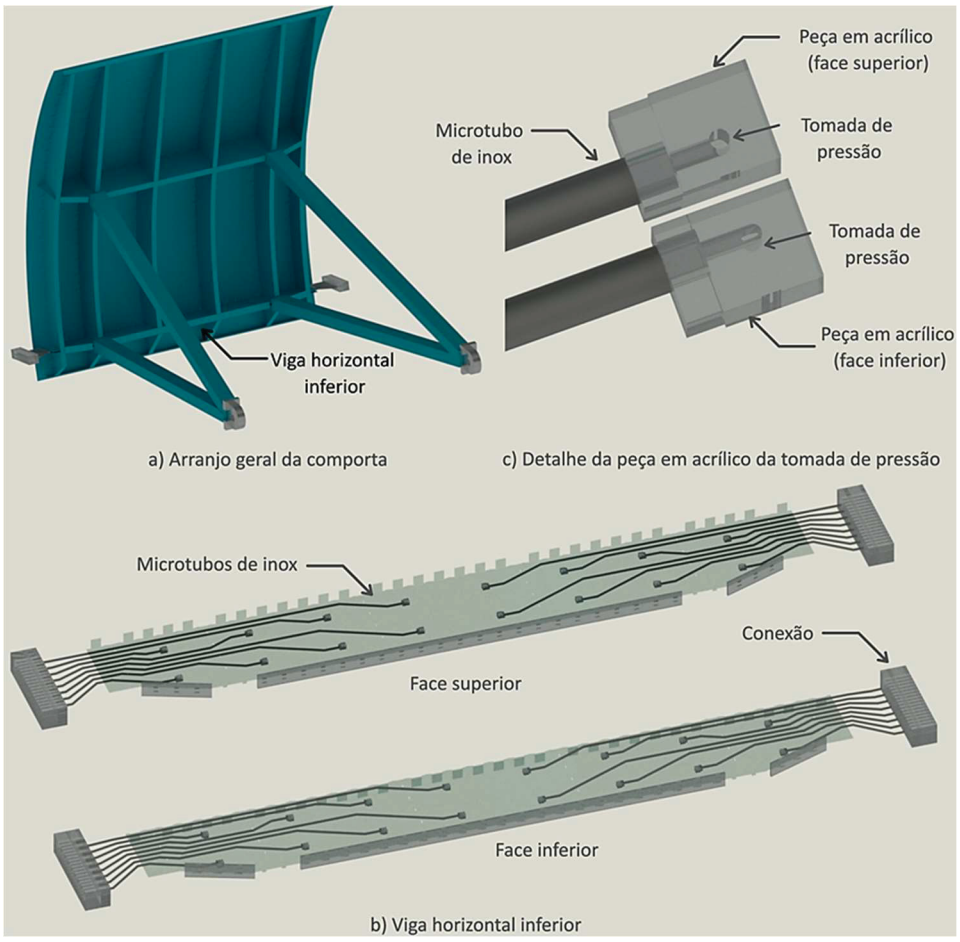
as exigências específicas de instalação de cada tipo de sensor, foram projetadas comportas distintas, dedicadas a cada método de medição adotado neste estudo.

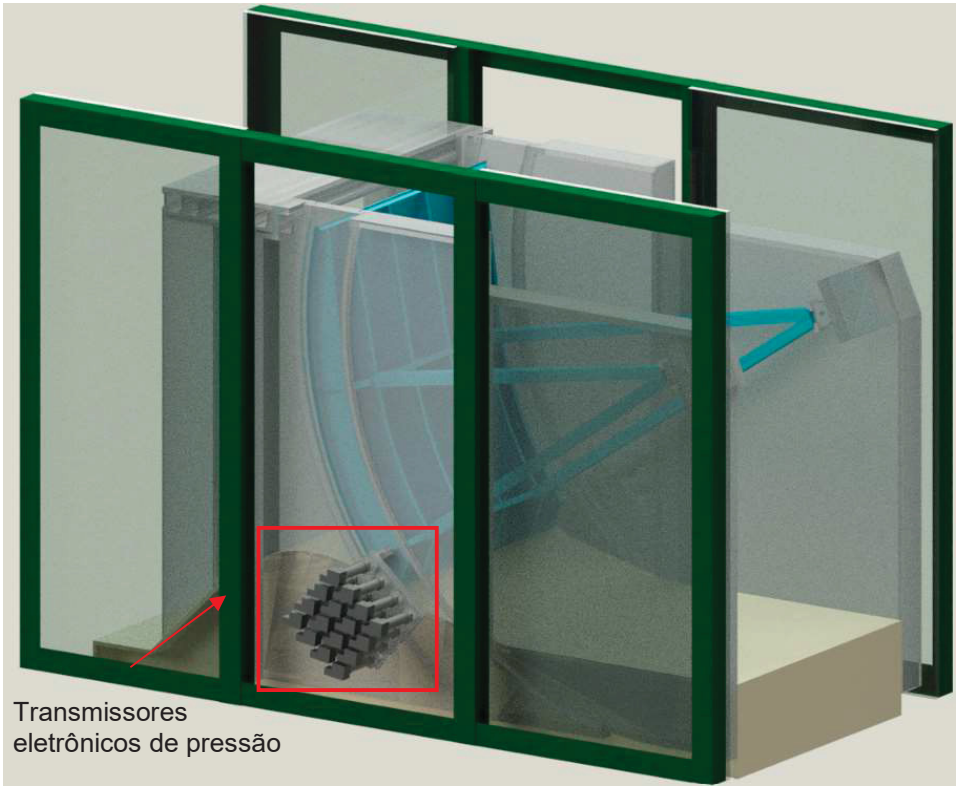
4.1.2.1 Comporta segmento projetada para uso de transmissores eletrônicos de pressão

A primeira versão da comporta segmento, foi projetada para acomodar transmissores eletrônicos de pressão, que, devido ao seu tamanho, foram posicionados na lateral externa dos meios pilares. Para conectá-los as tomadas de pressão em acrílico, foram instalados 16 microtubos de inox em cada extremidade (esquerda e direita), com 2,4 mm de diâmetro e 0,45 mm de espessura. A viga horizontal inferior foi projetada com espaço para os microtubos, exigindo a utilização de duas chapas de aço para proteção e fixação das vigas verticais, conforme ilustrado na FIGURA 4.7. As dimensões das peças de acrílico e das chapas de aço resultaram em uma espessura total da alma da viga de 5,90 mm (147,50 mm em escala de protótipo), com ajustes nas espessuras da alma e da mesa da viga para 0,95 mm e 1,95 mm, respectivamente, mantendo as dimensões das mesas do projeto piloto. Cabe ressaltar que a espessura total da viga horizontal inferior foi de 5,9 mm, equivalente a 147,5 mm em escala de protótipo.

A fixação das peças da viga horizontal inferior foi realizada com resina, uma vez que a soldagem poderia danificar as tomadas de pressão de acrílico, conforme demonstrado. A instalação da comporta segmento instrumentada no modelo hidráulico reduzido é apresentada na FIGURA 4.8.

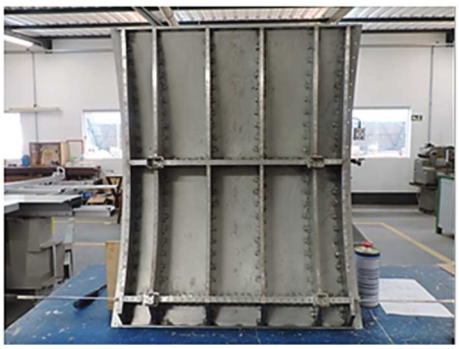
FIGURA 4.7 – PROJETO DA VIGA HORIZONTAL INFERIOR INSTRUMENTADA COM TRANSMISSORES ELETRÔNICOS DE PRESSÃO





FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

FIGURA 4.8 – PROCESSO DE INSTALAÇÃO DA COMPORTA INSTRUMENTADA COM TRANSMISSORES ELETRÔNICOS DE PRESSÃO



a) Comporta sem acabamento

b) Processo de pintura

c) Comporta instalada no modelo reduzido

d) Instalação de transmissores de pressão

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

4.1.2.2 Comporta segmento projetada para uso de células de carga

A segunda versão da comporta segmento foi projetada para possibilitar o uso de células de carga, o que exigiu o isolamento da viga horizontal em relação ao restante do sistema estrutural, a fim de garantir a liberdade necessária ao adequado funcionamento dos sensores. Essa modificação resultou em duas consequências principais: o desmembramento da viga horizontal em trechos limitados pelo paramento e pelas vigas verticais, e a redução da rigidez global do paramento. Para mitigar esse efeito, foi adicionada uma viga horizontal a 8 metros da borda inferior (em escala de protótipo), posicionada com base nos níveis mais elevados de água, de forma a não interferir nas condições de escoamento. Complementarmente, aumentou-se a espessura da chapa de aço do paramento, buscando recuperar parte da rigidez estrutural sem comprometer o comportamento hidráulico da estrutura. As células de carga, responsáveis pela medição dos esforços gerados pelo impacto das ondas do ressalto hidráulico na viga horizontal inferior, foram conectadas à viga horizontal por hastes de alumínio, distribuídas em cinco regiões de medição, delimitadas pelas vigas verticais. Cada trecho da viga foi projetado para operar de forma independente, sem contato com o paramento e as vigas verticais, minimizando a influência do atrito. As espessuras da alma e da mesa foram definidas em 1,50 mm e 1,95 mm (37,50 mm e 48,75 mm em dimensões de protótipo), escolhendo-se chapas de alumínio para reduzir peso e manter rigidez necessária ao modelo reduzido.

Para medição precisa dos esforços, as hastes de alumínio foram alinhadas perpendicularmente, exigindo instalação a montante e proteção com barras de aço ocas. A estabilidade das células de carga foi garantida por estrutura externa em pórtico. O processo de instalação das células de carga, são apresentados na FIGURA 4.9.

FIGURA 4.9 – PROCESSO DE INSTALAÇÃO DA COMPORTA INSTRUMENTADA COM CÉLULAS DE CARGA

a) Vista lateral

b) Vista de montante

c) Vista de jusante

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

4.1.3 Geometria das Alternativas

A investigação em modelo físico abrangeu três configurações de soleira vertente, visando uma análise detalhada do comportamento hidráulico e a otimização do projeto do vertedouro. O ensaio inicial, denominado Projeto Piloto, serviu como referência para a comparação com as duas geometrias alternativas: Alternativa 1 e Alternativa 2. A seguir, são apresentadas as características dessas configurações.

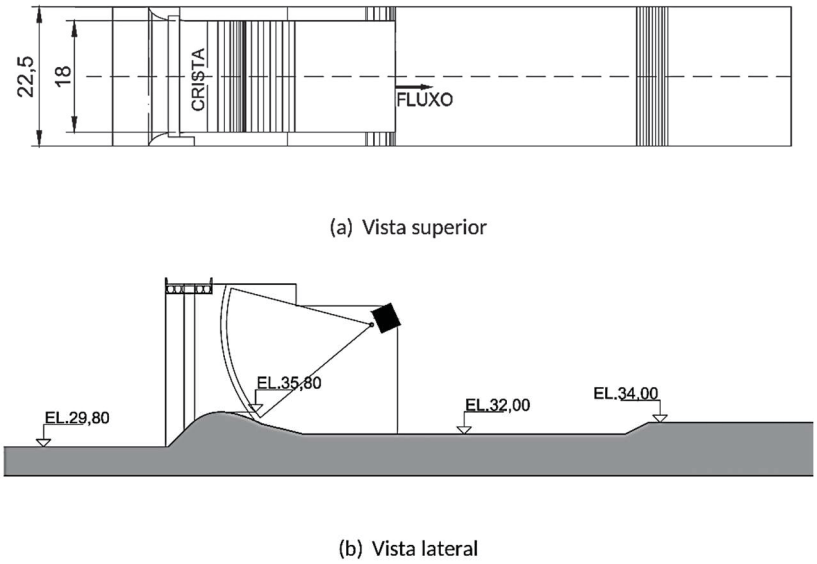
a) Projeto Piloto: a configuração do Projeto Piloto, ilustrada na FIGURA 4.10, foi inspirada no vertedouro da UHE Ercilândia e adaptada para o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com objetivo de permitir a generalização do critério empírico e da metodologia computacional. O perfil hidráulico do vertedouro de baixa queda foi ajustado para gerar afogamentos e esforços dinâmicos nas comportas. O canal experimental, que conta com dois meios pilares (totalizando 4,5 m de largura, em dimensões de modelo), foi projetado

para otimizar o escoamento, garantindo maior precisão na vazão e formação de um ressalto hidráulico mais estável na bacia de dissipação;

b) Alternativa 1: a segunda configuração geométrica investigada, introduziu uma modificação significativa em relação ao Projeto Piloto: o alteamento da bacia de dissipação, especificamente na região de transição entre a descontinuidade da curvatura da ogiva e o topo do *end sill*, conforme ilustrado na FIGURA 4.11. Nesta configuração geométrica, manteve-se a influência dos dois meios pilares, assim como no projeto piloto;

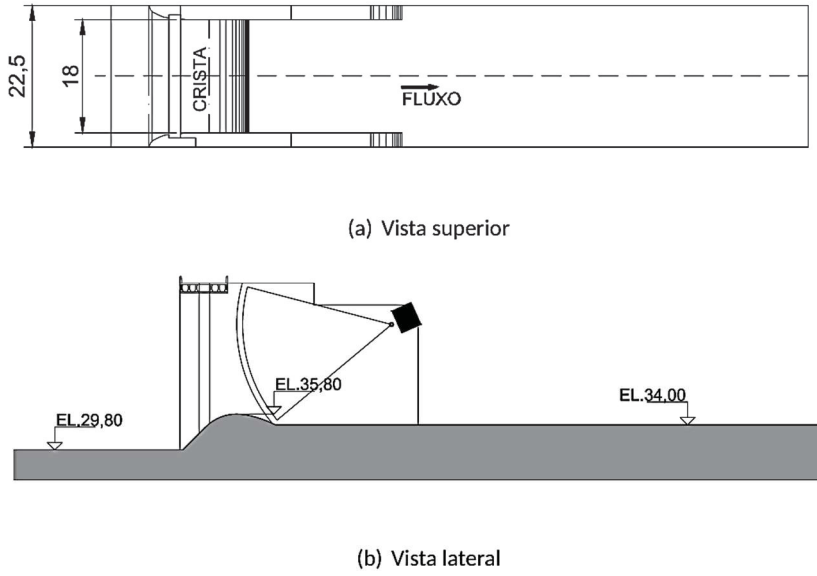
c) Alternativa 2: a geometria estudada na Alternativa 2 trouxe modificações significativas em relação às configurações anteriores, com o objetivo de analisar o comportamento de um canal completamente retangular. O canal foi estreitado e ajustado à largura entre os pilares (18 m), eliminando a influência da geometria dos pilares, e a soleira vertente foi substituída por uma soleira plana, removendo o impacto do vertedouro no escoamento. Essas mudanças, descritas na FIGURA 4.12, possibilitaram o estudo do escoamento em um canal retangular idealizado.

FIGURA 4.10 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – PROJETO PILOTO (DIMENSÕES EM PROTÓTIPO)



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.11 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 1 (DIMENSÕES EM PROTÓTIPO)

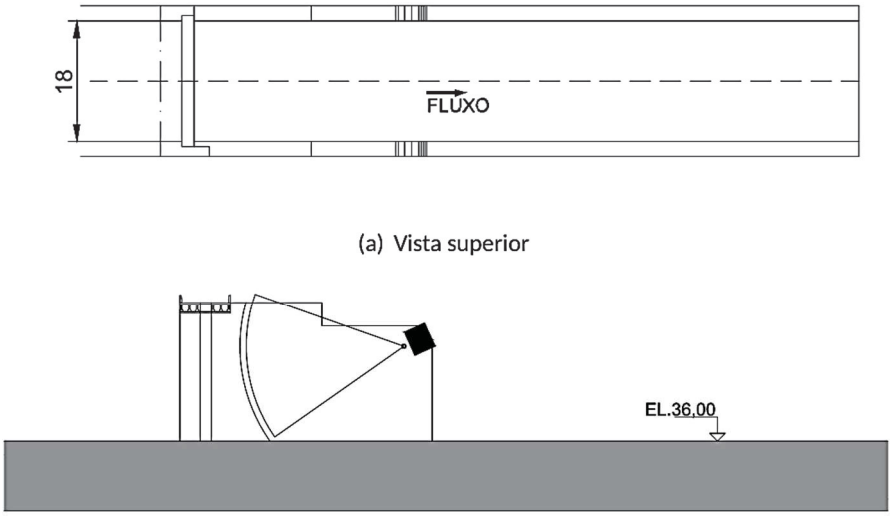


(a) Vista superior

(b) Vista lateral

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.12 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 2 (DIMENSÕES EM PROTÓTIPO)



(a) Vista superior

(b) Vista lateral

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

4.1.4 Medição de Resultados

Este item apresenta os equipamentos utilizados na medição de grandezas físicas no modelo hidráulico reduzido, com foco nos instrumentos empregados para

avaliar os esforços na viga horizontal inferior da comporta segmento. Para a realização dessas medições, foram utilizados os seguintes instrumentos:

4.1.4.1 Medidores de vazão

O modelo reduzido foi projetado para simular vazões de até 2.000 m³/s em escala de protótipo, correspondendo a aproximadamente 650 l/s, no modelo. Para isso, foram instaladas três linhas de recalque para alimentar o canal experimental. O controle de vazão é feito por três medidores eletromagnéticos Krohne-Conaut, cada um composto por um sensor OPTIFLUX 2000 e um conversor IFC 050W. Baseado na Lei de Faraday (lei de indução magnética), esses sensores medem a vazão detectando o campo eletromagnético gerado pelo fluxo de água. A tensão resultante, proporcional à velocidade média do fluxo, e, consequentemente, a vazão, é convertida em dados para registro. Os medidores utilizados possuem precisão de 0,5% para velocidades acima de 0,5 m/s. A FIGURA 4.13 apresenta os sensores eletromagnéticos e os conversores instalados.

FIGURA 4.13 – SENSORES ELETROMAGNÉTICOS DE VAZÃO E CONVERSORES DE SINAIS

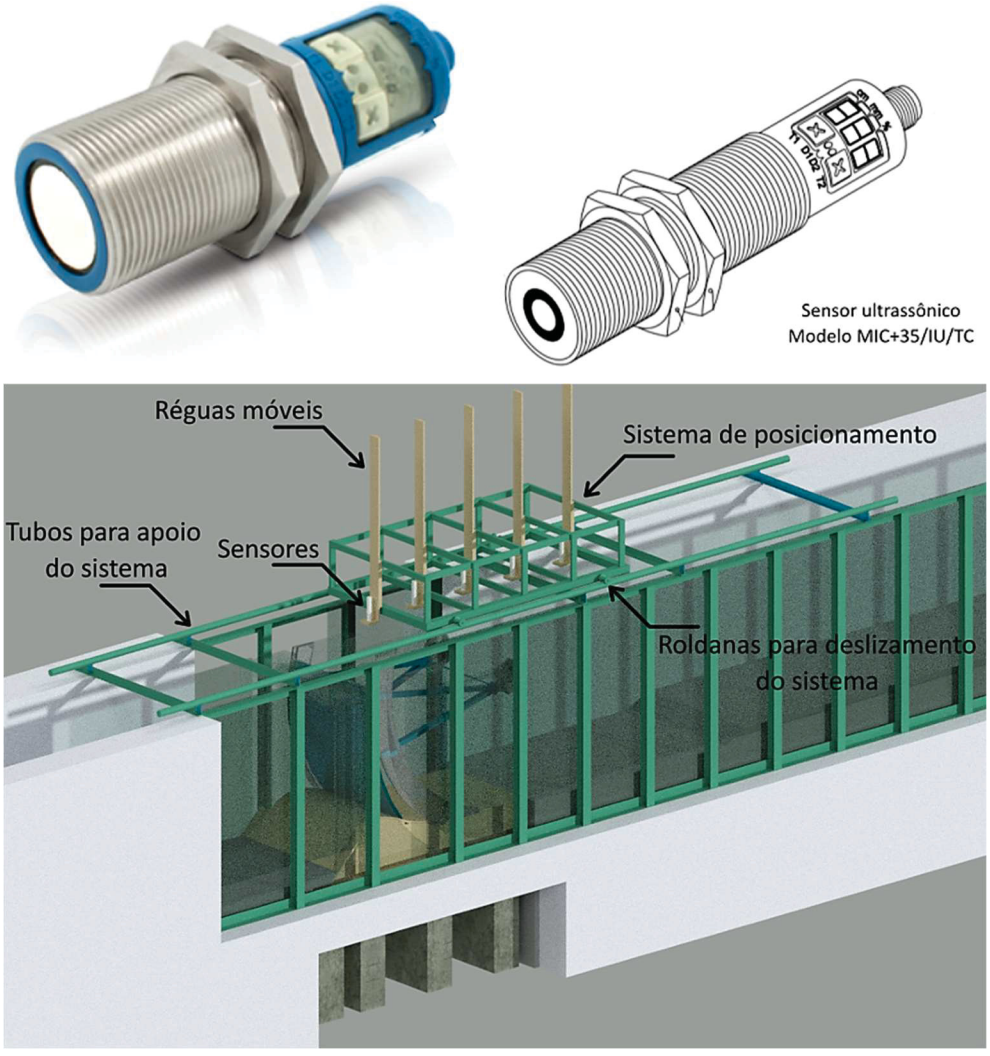
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

4.1.4.2 Medidores de níveis de água

Os níveis de água foram medidos por oito sensores ultrassônicos do fabricante Sense, modelo MIC+35/IU/TC, que operam por emissão e recepção de ondas sonoras, conforme ilustrado na FIGURA 4.14. Com uma faixa típica de operação de 350 mm, alcance máximo de 600 mm, uma zona cega de 65 mm e frequência de aquisições de 15,625 Hz, esses sensores foram instalados para

registrar o perfil de linha de água a jusante do vertedouro. Para isso, foi desenvolvido um sistema com réguas móveis e roldanas, fixadas em tubos metálicos ao longo das paredes do canal, permitindo ajuste vertical e deslocamento longitudinal. O espaçamento entre os sensores foi de 40 cm para evitar interferências entre leituras de sensores vizinhos, com possibilidade de sincronização para medições mais próximas. Complementando as leituras longitudinais, cinco sensores ultrassônicos foram utilizados para medir o nível de água transversal ao escoamento em cada ensaio, com objetivo de caracterizar o afogamento da comporta.

FIGURA 4.14 – SENSORES ULTRASSÔNICOS - SISTEMA DE POSICIONAMENTO

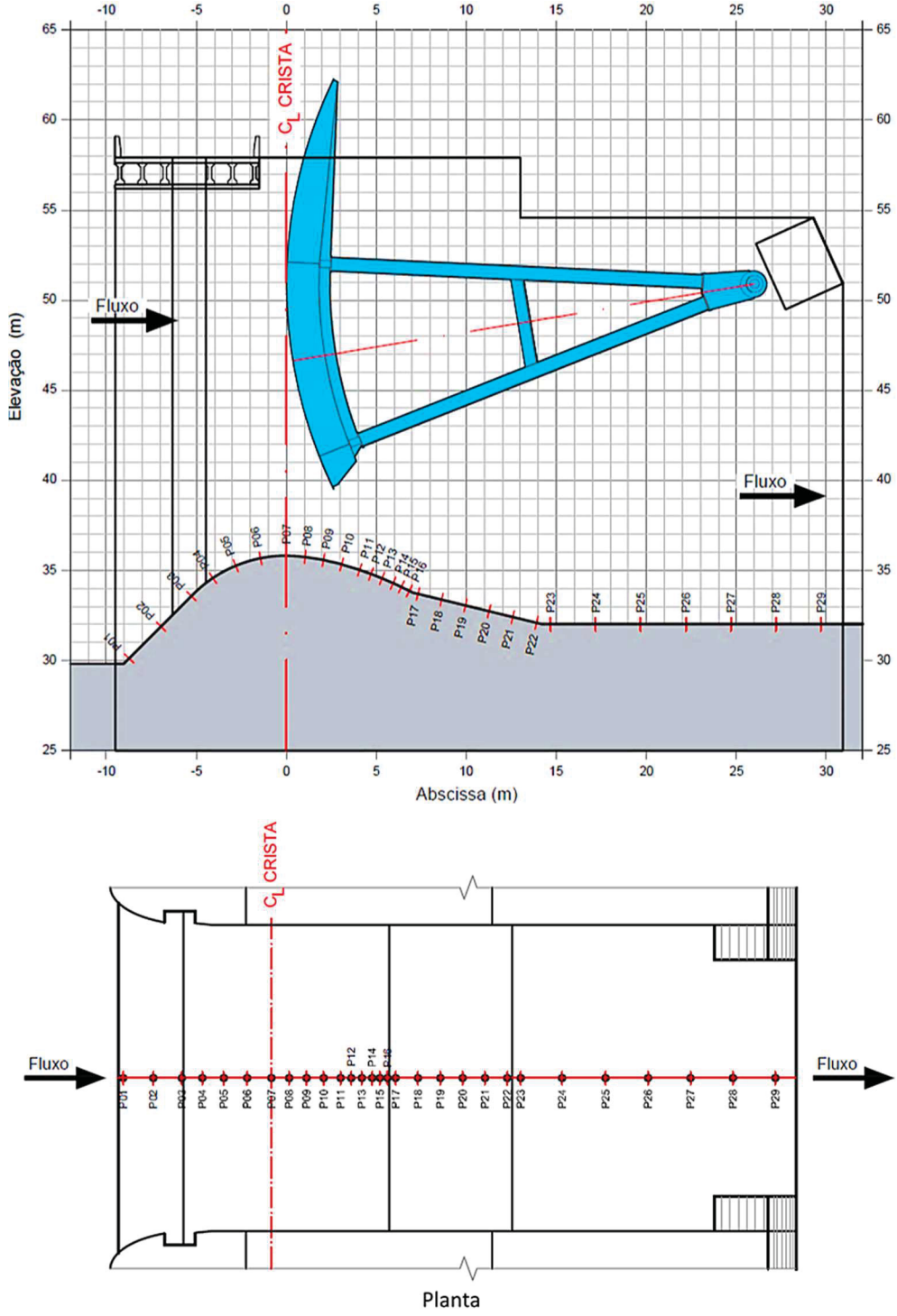


FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

4.1.4.3 Medidores de pressão

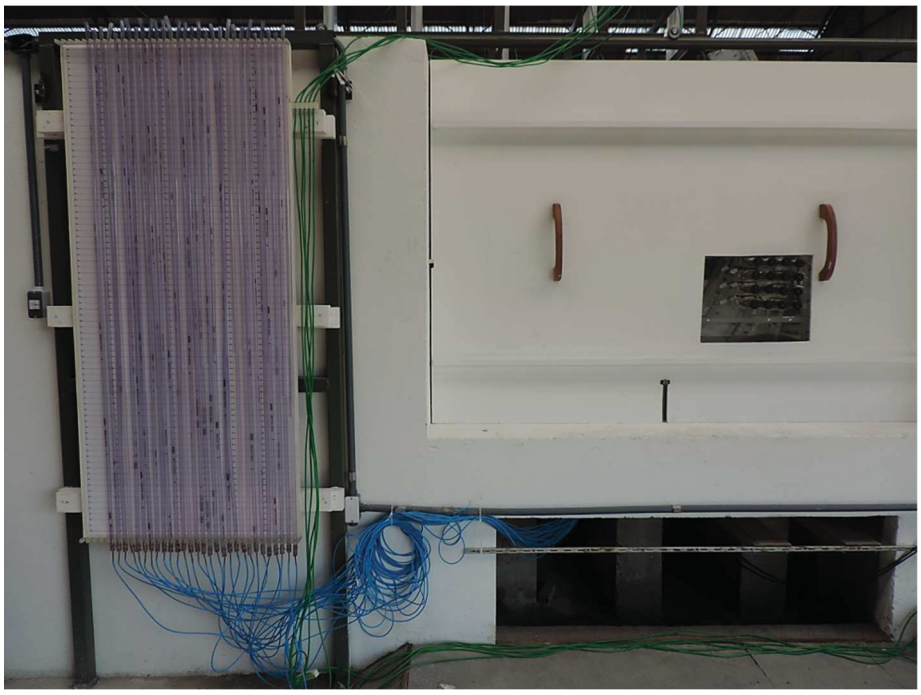
Para a medição das pressões no vertedouro, foram instaladas 29 tomadas de pressão estática (piezômetros) e 12 tomadas para pressão instantânea (transmissores eletrônicos). As tomadas foram instaladas ao longo do eixo central longitudinal do vertedouro e conectadas a um painel graduado para leitura piezométrica (FIGURA 4.15 e FIGURA 4.16). A conexão foi feita por meio de tubos de cobre flexíveis e mangueiras pneumáticas de poliuretano e PVC transparente, com comprimento aproximado de 3 m, definido conforme a distância entre as tomadas e o painel. Cabe ressaltar que na Alternativa 1, o alteamento da bacia de dissipação reduziu as leituras dos 29 piezômetros para apenas os 15 primeiros. Já na Alternativa 2, o nivelamento do piso na cota EL.36 m cobriu as tomadas de pressão, impossibilitando a medição das pressões estáticas.

FIGURA 4.15 – POSICIONAMENTO DOS PIEZÔMETROS



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

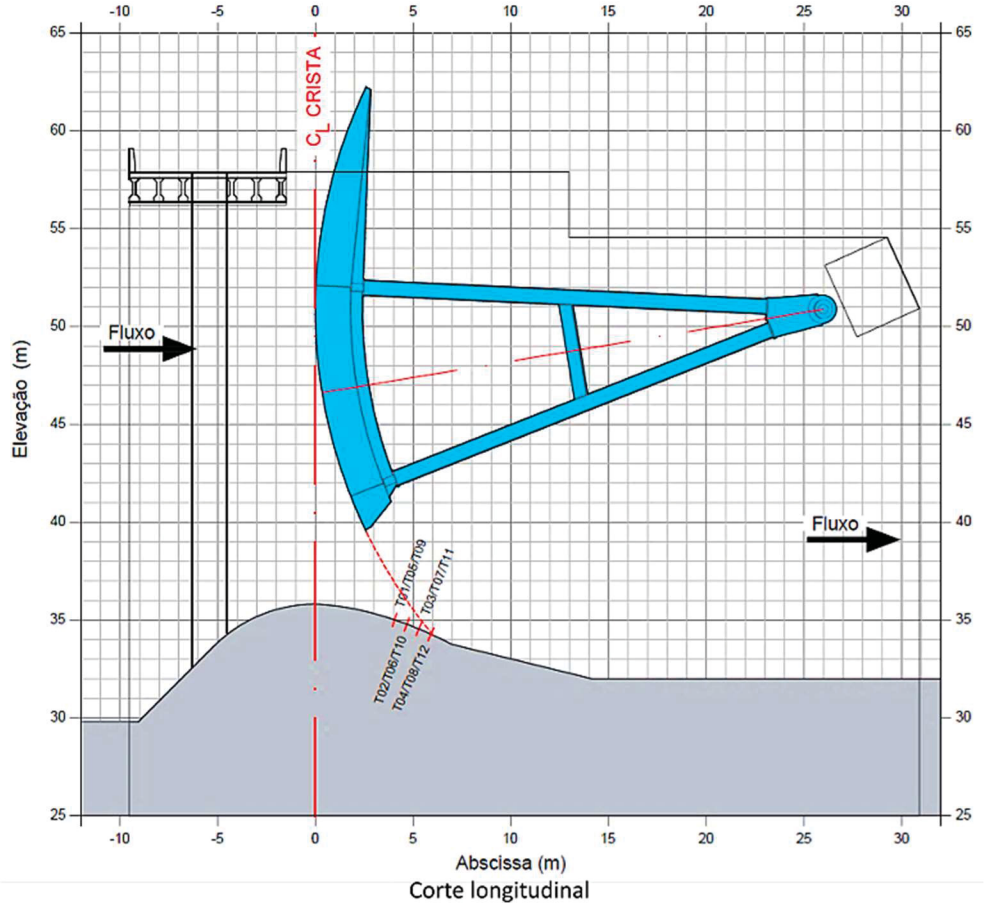
FIGURA 4.16 – PAINEL GRADUADO PARA LEITURA PIEZOMÉTRICA



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

Para a medição de pressões instantâneas na soleira do vertedouro, foram instaladas tomadas de pressão instrumentadas com transmissores eletrônicos de pressão (FIGURA 4.17) dos fabricantes Zürich e Hytronic, com faixa de medição de -0,5 a 1,0 m.c.a. e precisão de 0,1% do valor máximo da escala. A instalação envolveu furos de 1,0 mm na estrutura de acrílico, conectados aos transmissores fixados em uma placa por tubos de cobre. De maneira semelhante às medições de pressões estáticas, as pressões instantâneas foram registradas exclusivamente nas configurações geométricas do Projeto Piloto e da Alternativa 1.

FIGURA 4.17 – POSICIONAMENTO DAS TOMADAS DE PRESSÃO INSTANTÂNEA

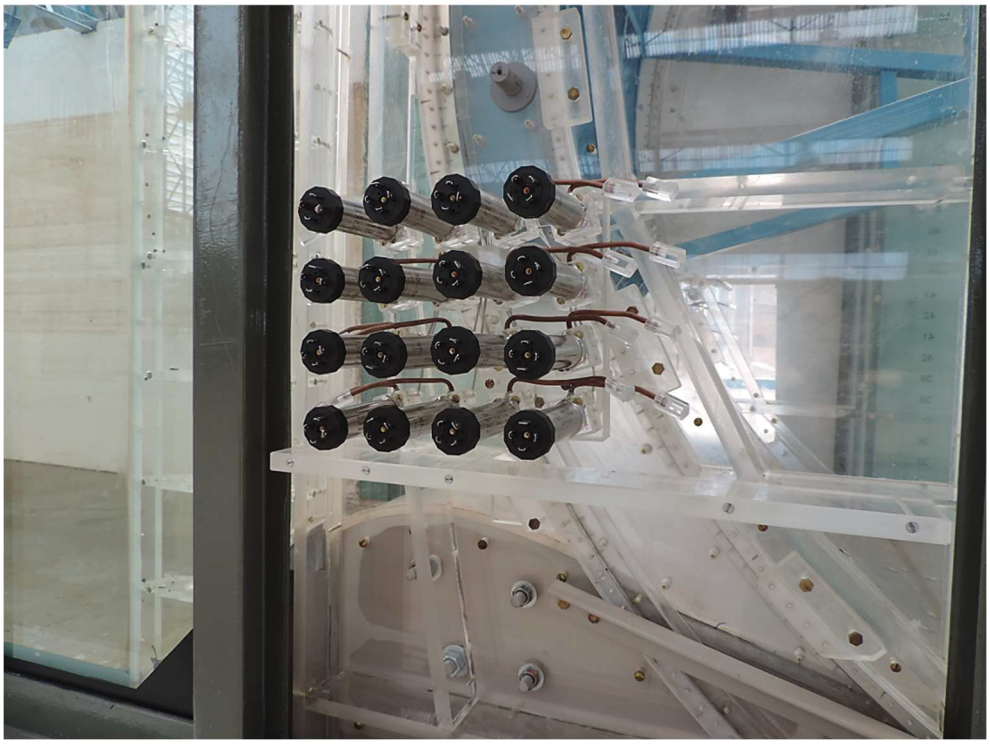


FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

4.1.4.4 Medidores de esforços

Para a medição precisa dos esforços gerados pelo impacto das ondas do ressalto hidráulico na viga inferior da comporta segmento, foram selecionados transmissores eletrônicos de pressão e células de carga, após a avaliação e descarte de outras tecnologias de medição, devido às limitações técnicas ou características do modelo físico. Foram adquiridos 35 transmissores Zürich (FIGURA 4.18), com faixa de medição de -0,5 a 0,5 m.c.a. (escala de modelo), equivalente a -12,5 a 12,5 m.c.a. em escala de protótipo, e precisão de 0,1% do fundo de escala. Esses dispositivos operam com base no efeito piezo-resistivo, que consiste na alteração da resistividade elétrica do material sob carga mecânica. A medição da deformação ocorre por meio de um diafragma sensível a pressão, equipado com sensores de deformação conectados a uma ponte de Wheatstone. Os transmissores foram instalados externamente nos pilares sobre bases de acrílico.

FIGURA 4.18 – TRANSMISSORES ELETRÔNICOS DE PRESSÃO



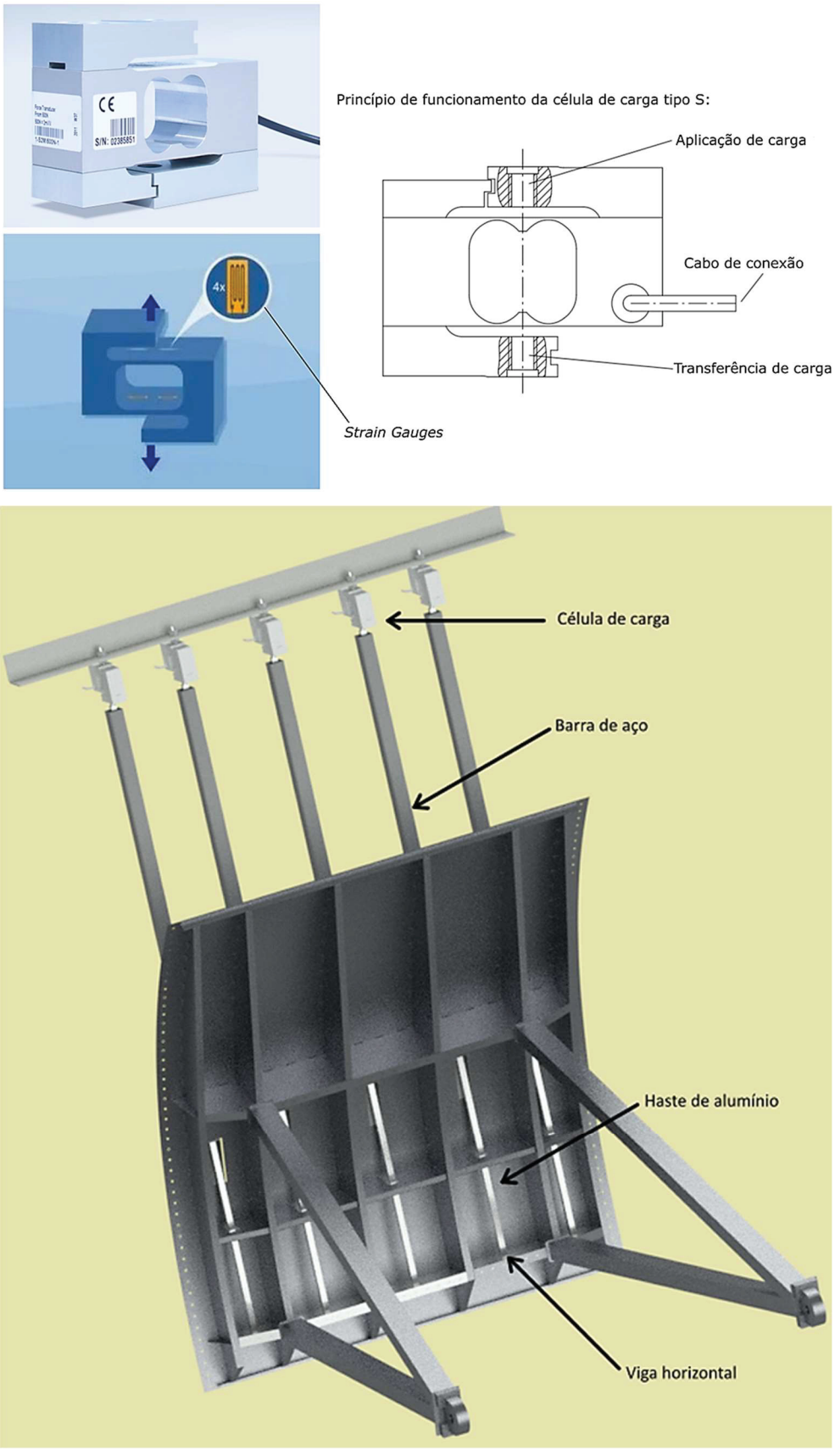
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

Foram adquiridas cinco células de carga do tipo “S” da fabricante HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH), modelo S2M (FIGURA 4.19), com força

nominal de 20 N (312.500 N em escala de protótipo) e classe de precisão 0,02, o que corresponde a um erro de 0,02% em relação ao fundo de escala. O corpo de medição é uma viga de flexão de alumínio, onde são instalados medidores de tensão (*strain gauges*), que detectam pequenas deformações resultantes do carregamento estático ou dinâmico. Os dados são transmitidos por um circuito do tipo ponte de *Wheatstone* para um amplificador de sinal. Esses *strain gauges*, sofrem variações na resistência elétrica conforme são tracionados ou comprimidos, permitindo a medição precisa dos esforços de tração e compressão a partir da variação da tensão elétrica.

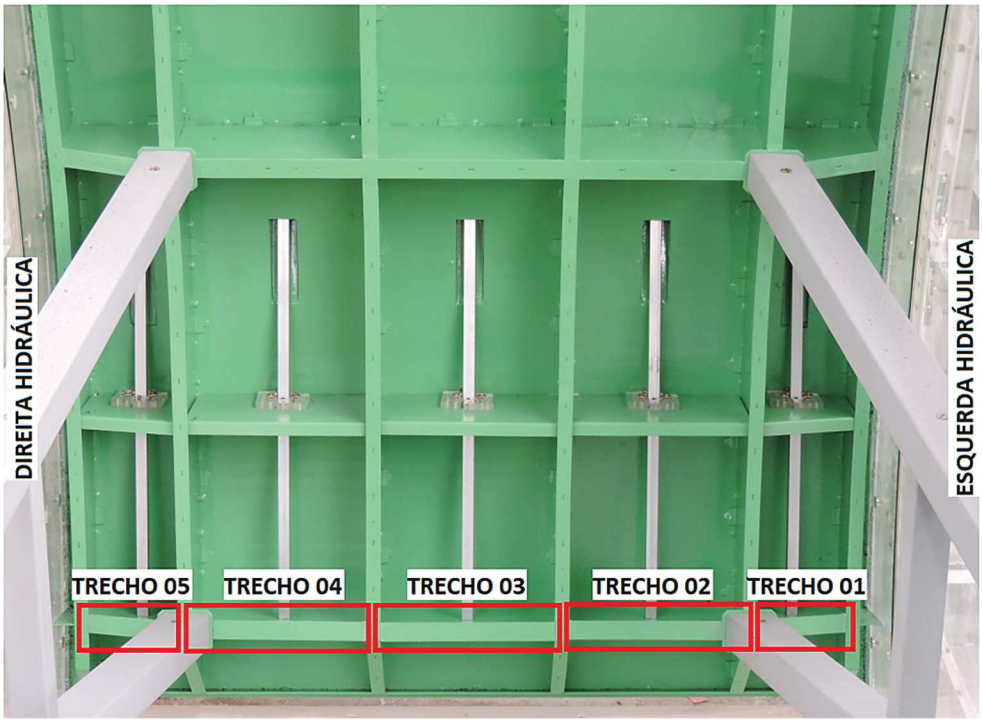
No Projeto Piloto e na Alternativa 1, foram utilizadas células de carga de 20 N. Já na Alternativa 2, devido aos maiores esforços hidrodinâmicos, foi necessária a adição de células de 50 N nos três trechos centrais da viga. A FIGURA 4.20 ilustra a segmentação da viga inferior da comporta em cinco trechos.

FIGURA 4.19 – CÉLULA DE CARGA DO FABRICANTE HBM S2M



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.20 – TRECHOS DA VIGA INFERIOR DA COMPORTA SEGMENTO



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

4.1.5 Definição dos Ensaios

A análise do afogamento da viga inferior da comporta foi realizada através de testes exploratórios, variando a abertura da comporta e o nível de água a jusante, enquanto o nível de energia no reservatório era mantido constante próximo à Elv. de 55,80 m. Essa variação controlada permitiu a geração de diversas condições de afogamento, das quais cinco foram identificadas como determinantes para a magnitude dos esforços hidrodinâmicos na viga. Essas condições foram classificadas de A a E, permitindo uma análise detalhada de cada cenário específico, conforme descrito a seguir:

- Condição A: Ondas do ressalto hidráulico raramente atingem a viga inferior da comporta;
- Condição B: Ondas do ressalto hidráulico atingem frequentemente a viga inferior da comporta;
- Condição C: Ondas do ressalto hidráulico afogam intermitentemente a viga inferior da comporta;

- Condição D: Ondas do ressalto hidráulico afogam frequentemente a viga inferior da comporta;
- Condição E: Ondas do ressalto hidráulico afogam permanentemente a viga inferior da comporta.

A TABELA 4.1 sintetiza as informações hidráulicas dos 92 ensaios realizados, abrangendo vazão específica (q), nível de energia a montante do vertedouro (N.A.R.) e nível de água a jusante (N.A.J.). Durante os testes, foram efetuadas medições dos níveis de água e das pressões a jusante da comporta do vertedouro, bem como dos esforços atuantes na viga inferior da comporta.

Para ilustrar as diferentes condições de escoamento ensaiadas nas três geometrias de vertedouro (Projeto Piloto, Alternativa 1 e Alternativa 2), as figuras dos ANEXO 1, ANEXO 2 e ANEXO 3, ilustram os resultados obtidos para as aberturas de 4 m, correspondente aos ensaios 1.4.1 a 1.4.6, 2.4.1 a 2.4.6 e 3.4.1 a 3.4.6, respectivamente.

No Projeto e Desenvolvimento (P&D), adotou-se uma filtragem conservadora dos dados de esforços adquiridos, com um nível de probabilidade de 99,9%. Essa abordagem assegura que apenas 0,1% dos valores extremos, possivelmente decorrentes de ruído ou eventos aleatórios, sejam descartados, eliminando medições que possam ser causadas por ruído ou outros fenômenos aleatórios.

TABELA 4.1 – CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DOS ENSAIOS REALIZADOS

Projeto Piloto				Alternativa 1				Alternativa 2			
Teste	Vazão específica (m³/s/m)	N.A.R. (m)	N.A.J. (m)	Teste	Vazão específica (m³/s/m)	N.A.R. (m)	N.A.J. (m)	Teste	Vazão específica (m³/s/m)	N.A.R. (m)	N.A.J. (m)
1.1.1	16,23	55,81	40,05	2.1.1	15,86	55,83	41,60	3.1.1	13,42	55,81	42,78
1.1.2	15,22	55,84	40,52	2.1.2	15,57	55,82	41,75	3.1.2	12,89	55,80	42,99
1.1.3	14,71	55,79	41,34	2.1.3	14,83	55,83	42,29	3.1.3	12,52	55,75	43,29
1.1.4	14,14	55,84	42,01	2.1.4	14,40	55,83	42,71	3.1.4	12,36	55,82	43,50
1.1.5	13,48	55,80	42,50	2.1.5	13,98	55,77	43,16	3.1.5	12,16	55,86	43,70
1.2.1	29,81	55,75	42,71	2.2.1	29,45	55,82	44,10	3.1.6	11,73	55,85	44,39
1.2.2	28,76	55,78	43,19	2.2.2	28,24	55,85	44,37	3.2.1	25,60	55,80	45,12
1.2.3	27,88	55,77	43,58	2.2.3	27,46	55,84	44,59	3.2.2	24,38	55,79	45,34
1.2.4	27,14	55,73	44,00	2.2.4	26,70	55,85	44,89	3.2.3	23,54	55,79	45,54
1.2.5	26,27	55,80	44,47	2.2.5	25,84	55,87	45,37	3.2.4	23,33	55,79	45,65
1.2.6	24,76	55,76	45,51	2.2.6	25,36	55,85	45,59	3.2.5	22,73	55,79	45,89
1.3.1	42,17	55,76	44,61	2.4.1	54,33	55,79	46,92	3.2.6	22,33	55,81	46,19
1.3.2	41,27	55,76	44,80	2.4.2	52,74	55,88	47,08	3.4.1	47,51	55,94	47,68
1.3.3	40,48	55,79	45,07	2.4.3	50,78	55,80	47,31	3.4.2	46,49	55,91	47,79
1.3.4	38,54	55,77	45,56	2.4.4	47,14	55,79	47,64	3.4.2B	45,23	55,78	47,89
1.3.5	37,00	55,81	46,08	2.4.5	45,96	55,80	47,95	3.4.3	43,36	55,92	48,13
1.3.6	35,68	55,74	46,70	2.4.6	44,70	55,82	48,35	3.4.4	41,87	55,91	48,34
1.4.1	55,49	55,76	45,75	2.5.1	73,87	55,80	49,01	3.4.5	40,06	55,89	48,68
1.4.2	52,74	55,77	46,12	2.5.1B	70,28	55,78	49,25	3.4.6	38,56	55,90	49,13
1.4.3	52,28	55,77	46,29	2.5.2	66,97	55,84	49,55	3.5.1	64,92	55,83	49,43
1.4.4	48,52	55,80	46,98	2.5.3	63,89	55,83	49,76	3.5.1B	61,58	55,77	49,70
1.4.5	47,19	55,84	47,40	2.5.4	61,97	55,82	49,91	3.5.2	57,39	55,82	49,97
1.4.6	45,40	55,79	47,68	2.5.5	60,42	55,82	50,08	3.5.3	56,38	55,83	50,08
1.5.1	75,60	55,84	48,01	2.6.1	89,39	55,82	50,44	3.5.4	54,77	55,81	50,31
1.5.2	70,27	55,76	48,50	2.6.2	81,02	55,77	50,93	3.5.5	53,46	55,84	50,46
1.5.3	66,13	55,77	48,98	2.6.3	77,03	55,84	51,02	3.6.1	78,70	55,79	50,42
1.5.4	62,96	55,85	49,53	2.6.4	73,94	55,88	51,40	3.6.1B	74,17	55,78	50,80
1.5.5	58,00	55,75	50,24	2.6.5	69,27	55,77	51,65	3.6.2	71,70	55,82	50,97
1.6.1	90,93	55,92	49,77					3.6.3	68,54	55,79	51,31
1.6.2	84,51	55,89	50,21					3.6.4	65,82	55,78	51,53
1.6.3	77,24	55,66	50,70					3.6.5	61,96	55,81	51,97
1.6.4	72,42	55,70	51,20								
1.6.5	68,39	55,78	51,72								

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

4.2 MODELO COMPUTACIONAL

A metodologia computacional adotada estruturou-se nos seguintes procedimentos:

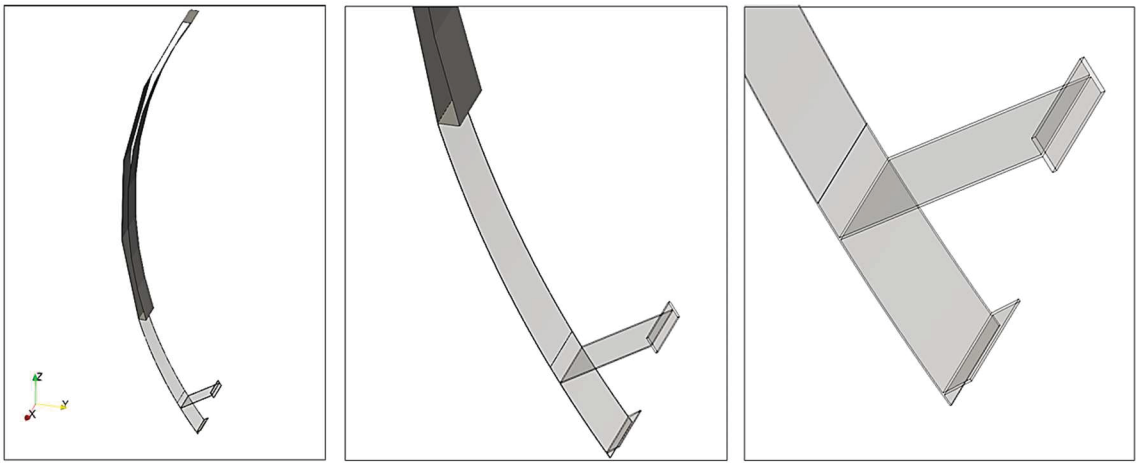
- Modelagem do domínio físico e dos fenômenos físicos, através da definição das geometrias das alternativas estudadas e dos *Baffles*, e análise de sensibilidade do modelo de turbulência;
- Discretização do domínio computacional através da geração da malha computacional, condições de contorno, condições iniciais, discretização das equações e definição das soluções numéricas;
- Definição dos tipos de aquisição dos resultados;
- Definição dos cenários a serem simulados.

4.2.1 Modelagem do Domínio Físico e dos Fenômenos Físicos

4.2.1.1 Geometria das Alternativas

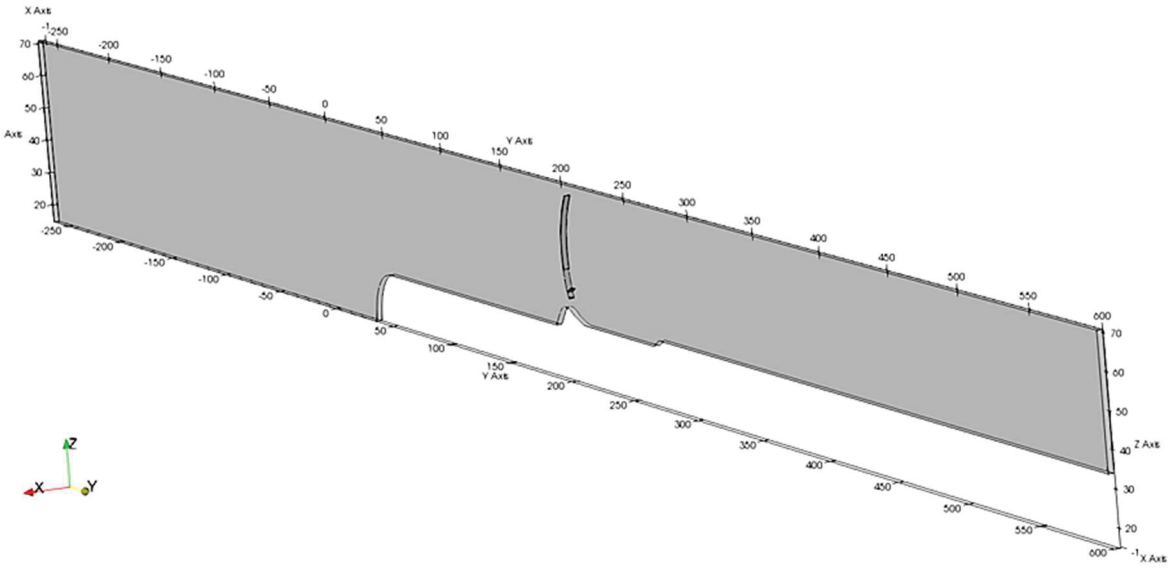
A modelagem do domínio físico, incluindo a geometria do canal, da soleira e da comporta, foi inicialmente desenvolvida no software AutoCAD Civil 3D 2018. Em seguida, o modelo foi exportado em formato STL (*Stereolithography*) e importado na ferramenta de pré-processamento SALOME versão 9.6.0. Nesse ambiente, foram definidos os componentes da malha, gerando-se arquivos STL individuais para cada contorno. A visualização desses arquivos foi realizada no *ParaView* versão 5.11.2 (FIGURA 4.21 e FIGURA 4.22), enquanto a verificação da estanqueidade e integridade das superfícies trianguladas das geometrias foi conduzida por meio do utilitário *surfaceCheck*.

FIGURA 4.21 – REPRESENTAÇÃO DA GEOMETRIA DA COMPORTA SEGMENTO - PARAVIEW



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.22 – REPRESENTAÇÃO DA GEOMETRIA DO VERTEDOURO - PARAVIEW



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

O modelo computacional adotou uma estratégia de discretização tridimensional simplificada, limitada a uma seção transversal com 1,2 m de espessura, subdividida no eixo das abscissas em seis elementos de 0,2 m, e estendida longitudinalmente por 864 m. Essa abordagem teve como objetivo reproduzir as características de uma modelagem bidimensional extrudada, permitindo incorporar a espessura das chapas da comporta (1,25 cm, conforme detalhado no item 4.1.2), por meio de intervenções manuais na malha. A simplificação adotada, no entanto, desconsidera efeitos tridimensionais do escoamento, como singularidades

geométricas e variações provocadas pelas contrações e expansões induzidas pelos pilares de apoio.

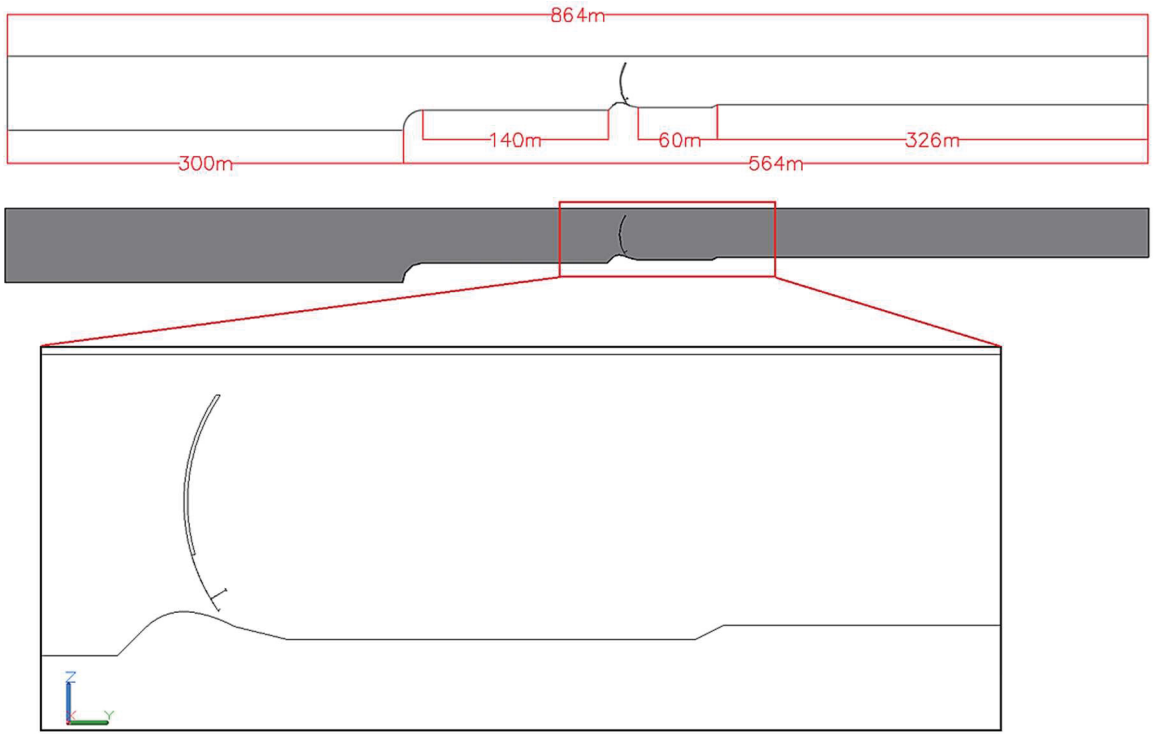
Outra simplificação adotada na representação da comporta foi a padronização da espessura do paramento superior em 0,5 m, nas regiões onde a influência do escoamento é desprezível (Elv. 50,50 m, aproximadamente), adotando-se essa mesma configuração em todas as configurações geométricas analisadas.

O sistema de referência altimétrico adotado no modelo matemático correspondeu exatamente ao utilizado no modelo hidráulico reduzido. O eixo longitudinal (y) foi alinhado à direção predominante do escoamento, o eixo transversal (x) representou a direção da largura do canal, e o eixo vertical (z) foi orientado segundo a direção da gravidade.

Seguindo a mesma abordagem adotada no modelo físico, a metodologia computacional contemplou a análise comparativa entre três configurações distintas de soleira vertente. A configuração inicial, denominada Projeto Piloto, foi utilizada como referência para a avaliação de outras duas geometrias alternativas: Alternativa 1 e Alternativa 2. As características geométricas dessas três configurações são apresentadas a seguir:

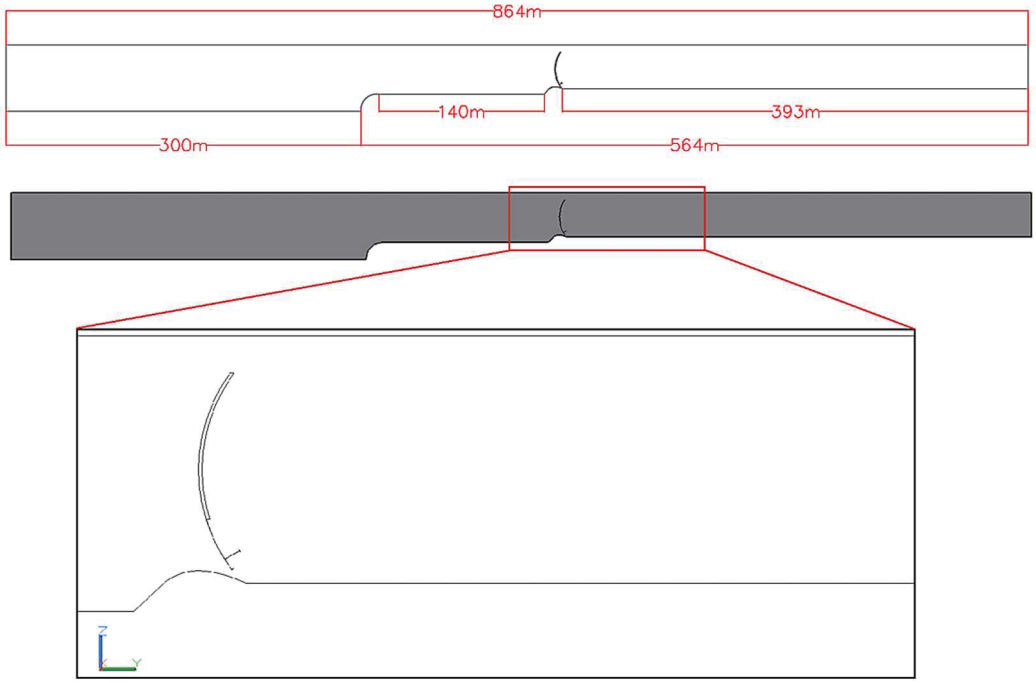
a) Projeto Piloto: o perfil hidráulico adotado para o vertedouro do Projeto Piloto foi desenvolvido em conformidade com a configuração típica de vertedouros de baixa altura de queda. O sistema hidráulico é composto por um canal de aproximação com soleira na cota 29,80 m, uma crista posicionada na cota de 35,80 m, uma bacia de dissipação com fundo na Elv. de 32,00 m e um canal de restituição com soleira na cota 34,00 m, conforme ilustra a FIGURA 4.23.
b) Alternativa 1: a configuração geométrica da Alternativa 01 é semelhante à do Projeto Piloto, diferenciando-se principalmente pela ausência da bacia de dissipação. Como consequência, o canal de restituição tem início imediatamente após a ogiva do vertedouro, com a soleira posicionada na cota 34,00 m, mantendo continuidade altimétrica em relação à soleira do canal de restituição do Projeto Piloto, conforme ilustrado na FIGURA 4.24.
c) Alternativa 2: diferentemente das demais configurações analisadas, a Alternativa 02 incorpora um canal de seção retangular, com soleira horizontal posicionada na cota 36,00 m, conforme ilustrado na FIGURA 4.25.

FIGURA 4.23 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – PROJETO PILOTO



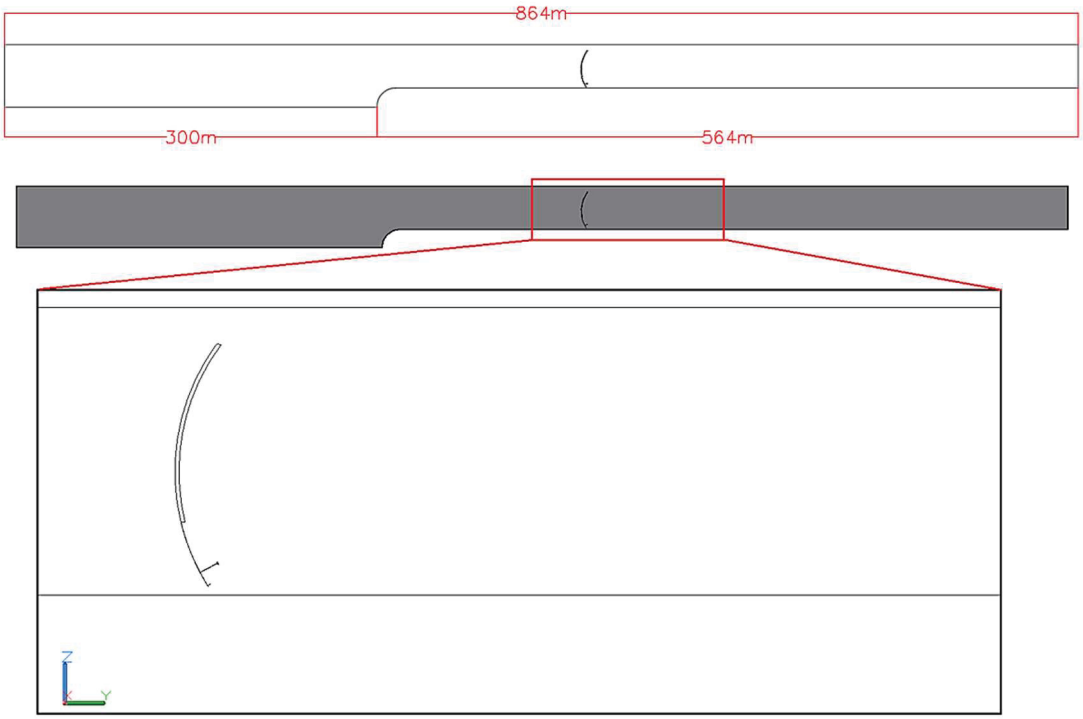
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.24 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 1



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.25 – CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA – ALTERNATIVA 2



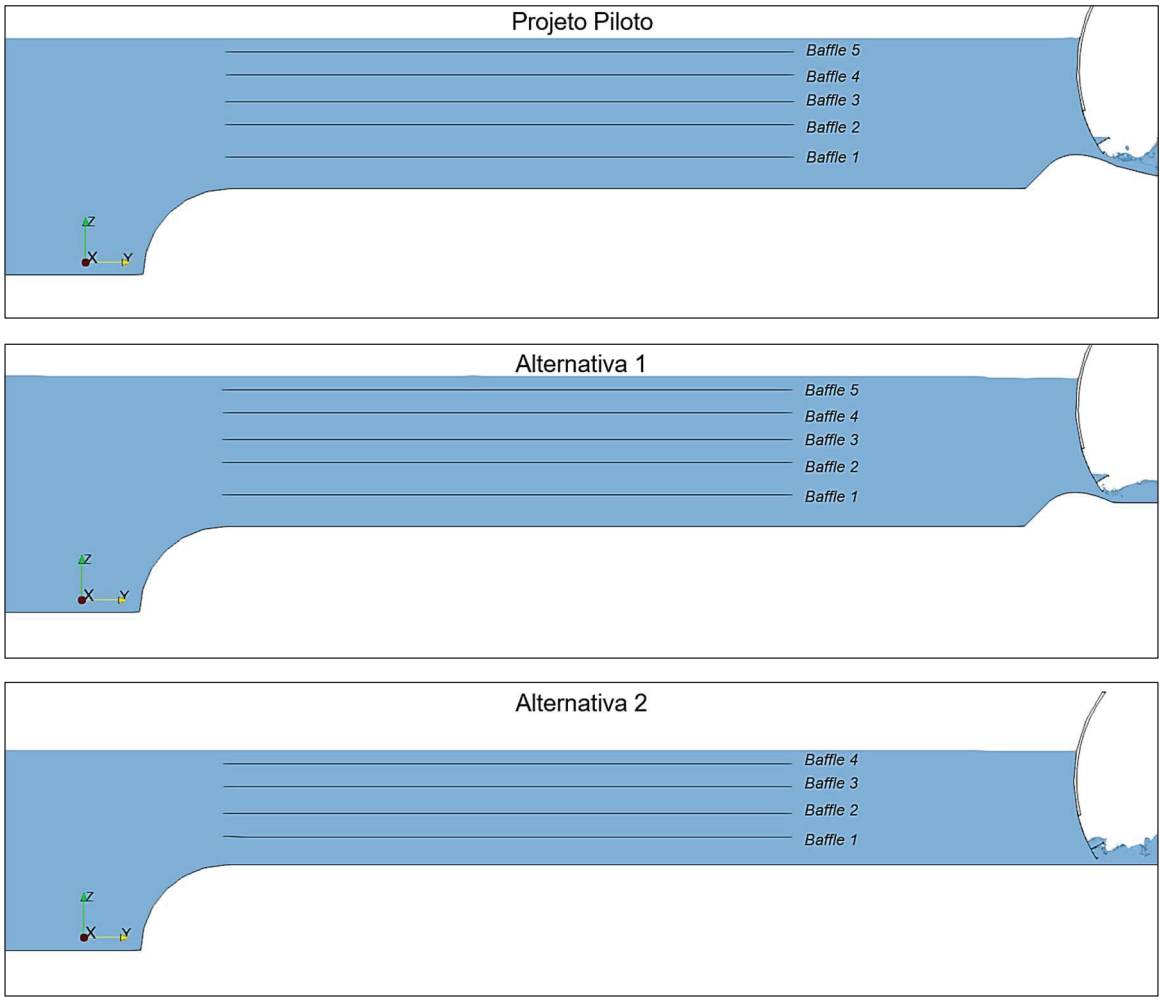
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

4.2.1.2 *Baffles*

Conforme descrito na documentação do OpenFOAM® (OPENFOAM FOUNDATION, 2024), *baffles* são superfícies artificiais de espessura nula que atuam como descontinuidades internas no domínio computacional. Sua implementação não altera a topologia da malha, nem duplica pontos, permitindo simular obstáculos ou barreiras fluidodinâmicas sem a necessidade de criação de regiões separadas. Essas superfícies são definidas por meio do arquivo *createBaffleDict*, localizado no diretório *system*.

Com o intuito de atenuar oscilações nos níveis d'água previstas na região de aproximação do escoamento, assim como ao longo de todo o trecho a montante da comporta, foram implementadas essas superfícies internas. Para as configurações geométricas correspondentes ao Projeto Piloto e à Alternativa 1, foram inseridos cinco *baffles*. Na Alternativa 2, contudo, a quantidade foi reduzida para quatro, em decorrência da elevação da soleira para a cota de 36 m, o que resultou na sobreposição de uma das estruturas originalmente previstas. A disposição dessas estruturas encontra-se representada na FIGURA 4.26.

FIGURA 4.26 – *BAFFLES*



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

4.2.1.3 Análise de Sensibilidade do Modelo de Turbulência

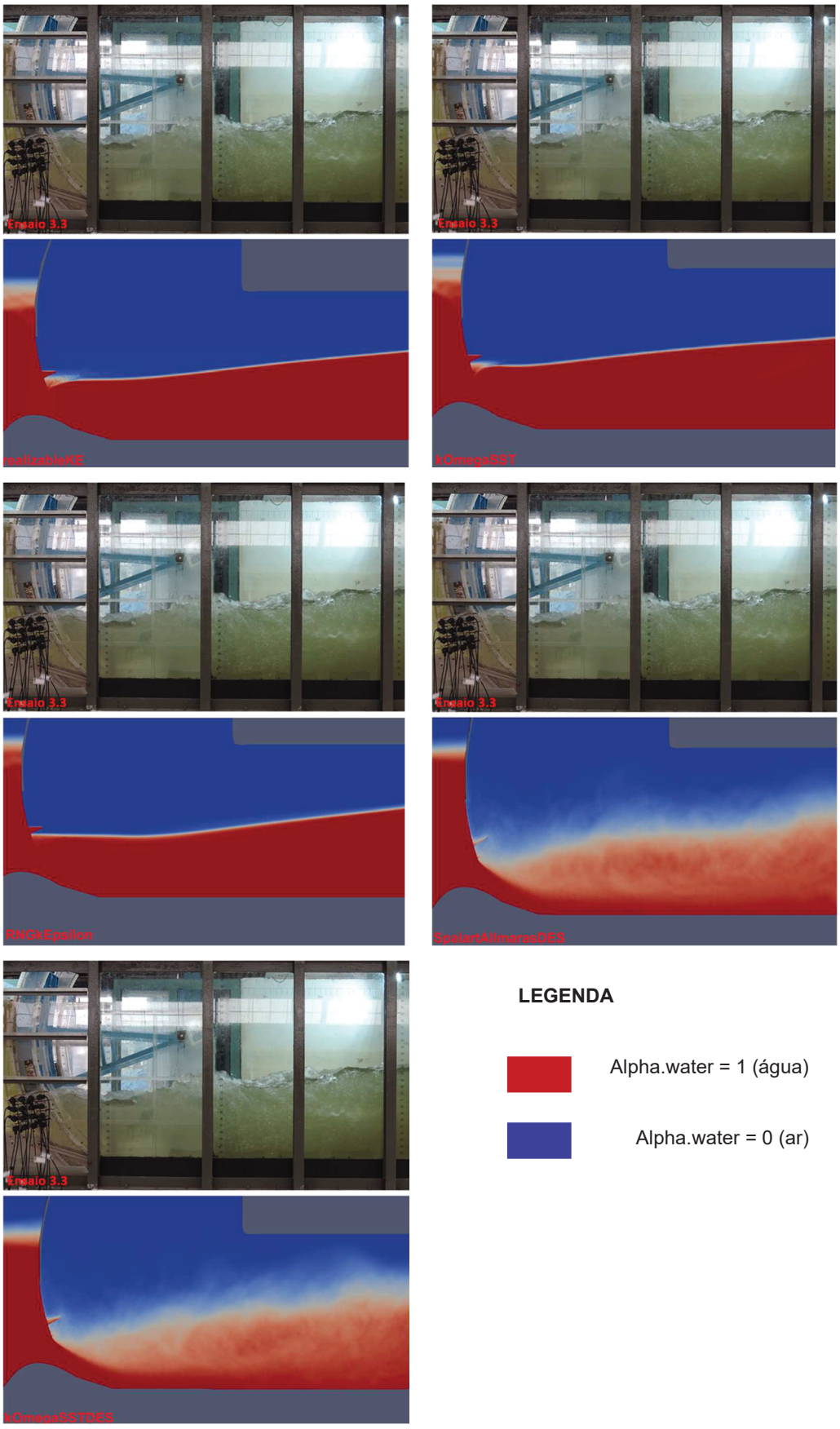
Inicialmente, foram realizadas análises de sensibilidade preliminares dos modelos de turbulência no software FLOW-3D®, utilizando uma simulação bidimensional com a geometria do Projeto Piloto e abertura da comporta de 1 m. As análises contemplaram três modelos do tipo RANS ($k-\varepsilon$, $k-\omega$ e RNG) e um modelo do tipo LES. Como esperado, a avaliação do comportamento transiente do escoamento demonstrou que os modelos RANS resultaram em simulações predominantemente estáticas, incapazes de reproduzir as flutuações turbulentas necessárias para a análise dos esforços hidrodinâmicos incidentes sobre a comporta. Em contraste, o modelo LES foi capaz de capturar as variações turbulentas ao longo do tempo. No entanto, a limitação da malha estruturada do FLOW-3D® na discretização de geometrias complexas e delgadas, como a comporta segmento, foi

um dos fatores que motivaram a adoção do software OpenFOAM® nas simulações finais, devido à sua flexibilidade no uso de malhas não estruturadas.

No OpenFOAM®, foram estudados três modelos de turbulência do tipo RANS (realizableKE, kOmegaSST e RNGkEpsilon) e dois modelos híbridos DES (SpalartAllmarasDDES e kOmegaSSTDES). A análise do escoamento se caracterizou pela comparação com os resultados obtidos em modelo físico reduzido (FIGURA 4.27), confirmando as observações previamente verificadas no FLOW-3D®: os modelos RANS resultaram em simulações predominantemente estáticas, enquanto os modelos DES foram capazes de capturar, de forma mais representativa, as flutuações turbulentas do escoamento. Dessa forma, o modelo de turbulência híbrido DES foi selecionado para a análise dos esforços hidrodinâmicos, nas simulações finais com a fatia tridimensional.

O modelo de turbulência híbrido DES (*Detached Eddy Simulation*), descrito no item 2.5.7, foi adotado nas análises computacionais finais como uma estratégia para equilibrar a precisão do modelo LES em regiões com separações de escoamento e grandes instabilidades, com a eficiência computacional do RANS em regiões onde a turbulência pode ser representada de forma estatística (próximo aos contornos solidos). Associado à simulação DES, foi utilizado o modelo de fechamento da turbulência $k-\omega$ SST DES (*Shear Stress Transport*), que caracteriza a turbulência com base na energia cinética turbulenta (k) e na taxa de dissipação específica (ω), sendo esta última interpretada como o inverso da escala temporal do processo dissipativo (ANDERSSON *et al*., 2012).

FIGURA 4.27 – ASPECTO DO ESCOAMENTO – MODELOS DE TURBULÊNCIA



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

4.2.2 Discretização do Domínio

4.2.2.1 Malha Computacional

Após a definição do domínio físico, a geração da malha computacional compreendeu as seguintes etapas: criação da malha base por meio do utilitário *blockMesh*, verificação do envolvimento geométrico do STL pela malha base no *ParaView*, extração de arestas características do STL com o utilitário *surfaceFeatures*, geração da malha final utilizando o *snappyHexMesh* e, por fim, a avaliação da qualidade da malha com o *checkMesh*.

A qualidade da malha computacional é crucial para garantir a precisão e a estabilidade das simulações CFD. Portanto, este capítulo apresenta as malhas geradas para as geometrias analisadas, abrangendo a análise de sensibilidade, a caracterização dos refinamentos e os controles de qualidade aplicados. Esses elementos fundamentam a escolha das configurações adotadas, visando assegurar a confiabilidade dos resultados numéricos.

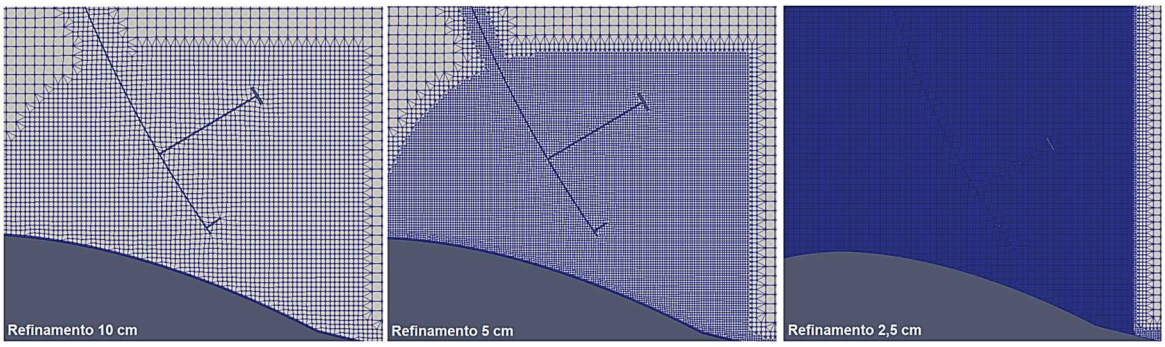
4.2.2.1.1 Análise de Sensibilidade da Malha

Com o objetivo de verificar a capacidade da malha computacional em representar o escoamento com precisão, foi realizada uma análise de sensibilidade baseada em uma configuração de malha híbrida. Essa malha consistiu em um bloco geral com elementos de 0,80 m, adequado para representar as regiões mais afastadas da comporta com menor custo computacional, associado a três níveis de refinamento local na região da viga inferior da comporta segmento, com elementos de 0,10 m, 0,05 m e 0,025 m, conforme ilustrado na FIGURA 4.28. O tamanho dos elementos foi escolhido para garantir precisão na análise dos esforços hidrodinâmicos, equilibrando qualidade numérica e desempenho computacional. A avaliação da sensibilidade da malha foi realizada por meio da comparação dos níveis de água a montante e a jusante, bem como das vazões de entrada e saída do domínio computacional.

Nos testes de sensibilidade da malha, adotou-se uma representação geométrica bidimensional simplificada, baseada na configuração do Projeto Piloto com abertura de 6 m, utilizando-se o modelo de turbulência RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), com o objetivo de reduzir o custo computacional associado as

análises. Ressalta-se que a mesma metodologia foi empregada nas avaliações das configurações com aberturas de 1 m e 4 m.

FIGURA 4.28 – MALHAS UTILIZADAS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MALHA

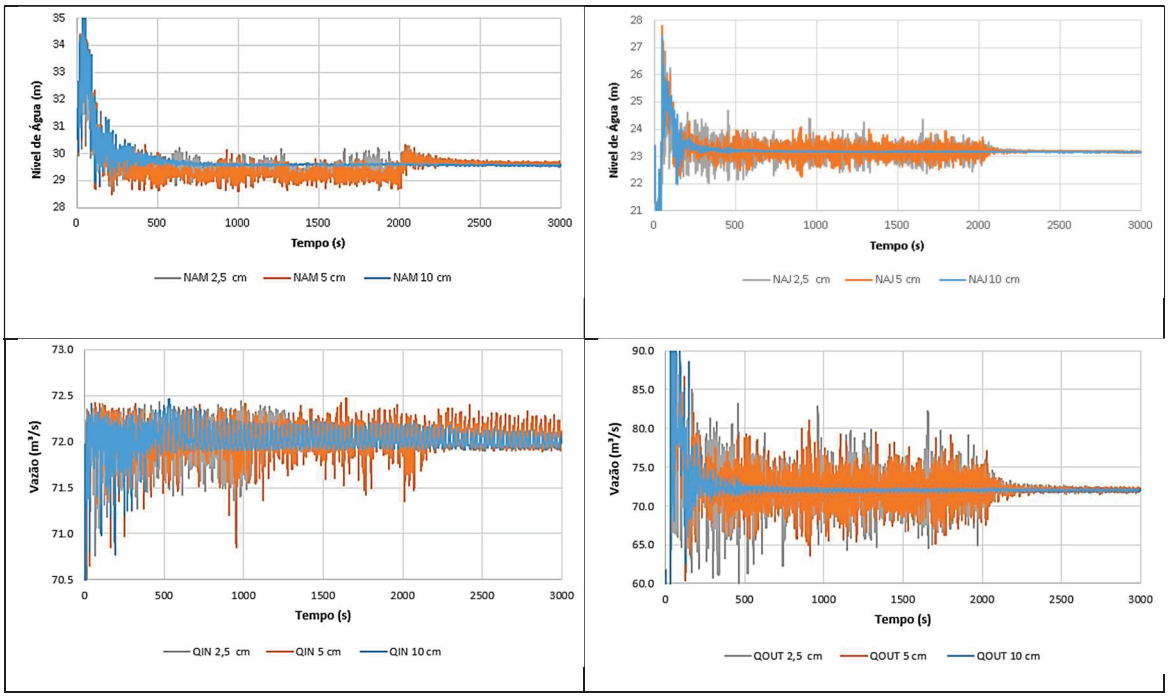


FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

Os resultados médios obtidos nos últimos 100 segundos de simulação, apresentados na FIGURA 4.29 e TABELA 4.2, demonstram que a malha com elementos de 0,05 m apresentou boa aderência a malha mais refinada, de 0,025 m, com diferenças máximas de 1% nos níveis de água e 0,75% no coeficiente de descarga. Além disso, a variação de vazão entre a malha mais grosseira e a mais refinada, mostrou-se insignificante, com variação inferior a 0,08% para a abertura de 6 m. Cabe destacar que o tempo de processamento aumentou significativamente com o refinamento da malha. Ao se reduzir a resolução de 10 cm para 5 cm, o tempo de processamento aproximadamente dobrou. Já ao se refinar de 5 cm para 2,5 cm, o tempo de processamento apresentou um aumento ainda mais expressivo, sendo quase seis vezes maior.

As análises de sensibilidade indicaram que as malhas geraram níveis de água e vazão muito semelhantes entre si, com diferenças da ordem de 7 cm no nível de água do reservatório entre as malhas com refinamento de 0,025 cm e 0,05 m. Com base nesses resultados, optou-se por adotar a malha com refinamentos de 0,05 m como configuração padrão nas análises das demais geometrias, a qual apresentou uma diferença de 2,21% entre o coeficiente de descarga do modelo físico e numérico. Essa escolha baseou-se na melhor relação entre a precisão dos resultados obtidos e o tempo de processamento, indicando a independência da solução em relação à malha, dentro de uma margem de variação considerada aceitável.

FIGURA 4.29 – RESULTADOS OBTIDOS NA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MALHA



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

TABELA 4.2 – RESULTADOS OBTIDOS – ABERTURA 6 m

Descrição	Modelo Físico	Malha 2,5 cm	Malha 5 cm	Malha 10 cm
Nível de água Montante (m)	54,44	54,37	54,55	54,36
Nível de água Jusante (m)	48,05	47,95	47,97	47,96
Vazão de entrada (m³/s)	72,50	71,99	72,05	72,00
Vazão de saída (m³/s)	72,50	72,02	72,05	72,00
Coeficiente de descarga	0,663	0,680	0,679	0,680
Máquina utilizada	-	192.168.2.21	192.168.2.21	192.168.2.21
Quantidade de elementos	-	332.628	135.395	85.625
Tempo de processamento para 24 processadores (h)	-	246	48	23

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2022).

4.2.2.1.2 Caracterização das Malhas Analisadas

A discretização do domínio, foi realizada através da geração da malha computacional, utilizando os utilitários *blockMesh* e *snappyHexMesh* do OpenFOAM®. Inicialmente, o *blockMesh* gerou uma malha base composta por elementos hexaédricos de 0,80 m. Em seguida, essa malha foi adaptada as geometrias definidas

nos arquivos STL, através do *snappyHexMesh*, que aplicou refinamentos de até 0,05 m, nas regiões de interesse hidrodinâmico.

A estratégia de discretização foi aplicada de forma consistente em todas as configurações geométricas analisadas, resultando em malhas com aproximadamente 800.000 células, variando de 700.000 para as alternativas com abertura de 1 m até 1 milhão de células para as alternativas com abertura da comporta em 8 m, conforme detalhado na TABELA 4.3. Cabe destacar que, devido às limitações de tempo, a configuração com abertura de 3 m não foi considerada nas Alternativas 1 e 2.

TABELA 4.3 – QUANTIDADE DE CÉLULAS RESULTANTES

Geometria	**Abertura da Comporta (m)**					
	1	**2**	**3**	**4**	**6**	**8**
Projeto Piloto	763.422	770.484	790.062	819.570	867.768	1.027.374
Alternativa 01	737.136	744.126	-	791.742	830.346	952.122
Alternativa 02	665.520	667.068	-	670.194	695.202	1.021.044

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

Na geometria correspondente ao Projeto Piloto, as regiões de interesse hidrodinâmico foram refinadas por meio da aplicação de blocos e cilindros de refinamento, com tamanhos de células variando entre 0,40 m e 0,05 m, visando otimizar a discretização nas áreas de interesse. Conforme ilustrado na FIGURA 4.30, no Projeto Piloto, com abertura de 2 m, o Bloco 1 (canal de aproximação) utilizou células de 0,40 m, o Bloco 2 (bacia de dissipação) células de 0,20 m, o Bloco 3 (região da restituição) 0,40 m e o Bloco 4 (região da viga inferior) 0,05 m. Já os cilindros 5 e 6, situados na região de aproximação do fluxo, próximos a ogiva do vertedouro e a viga inferior da comporta, utilizaram células de 0,20 m e 0,050 m, respectivamente.

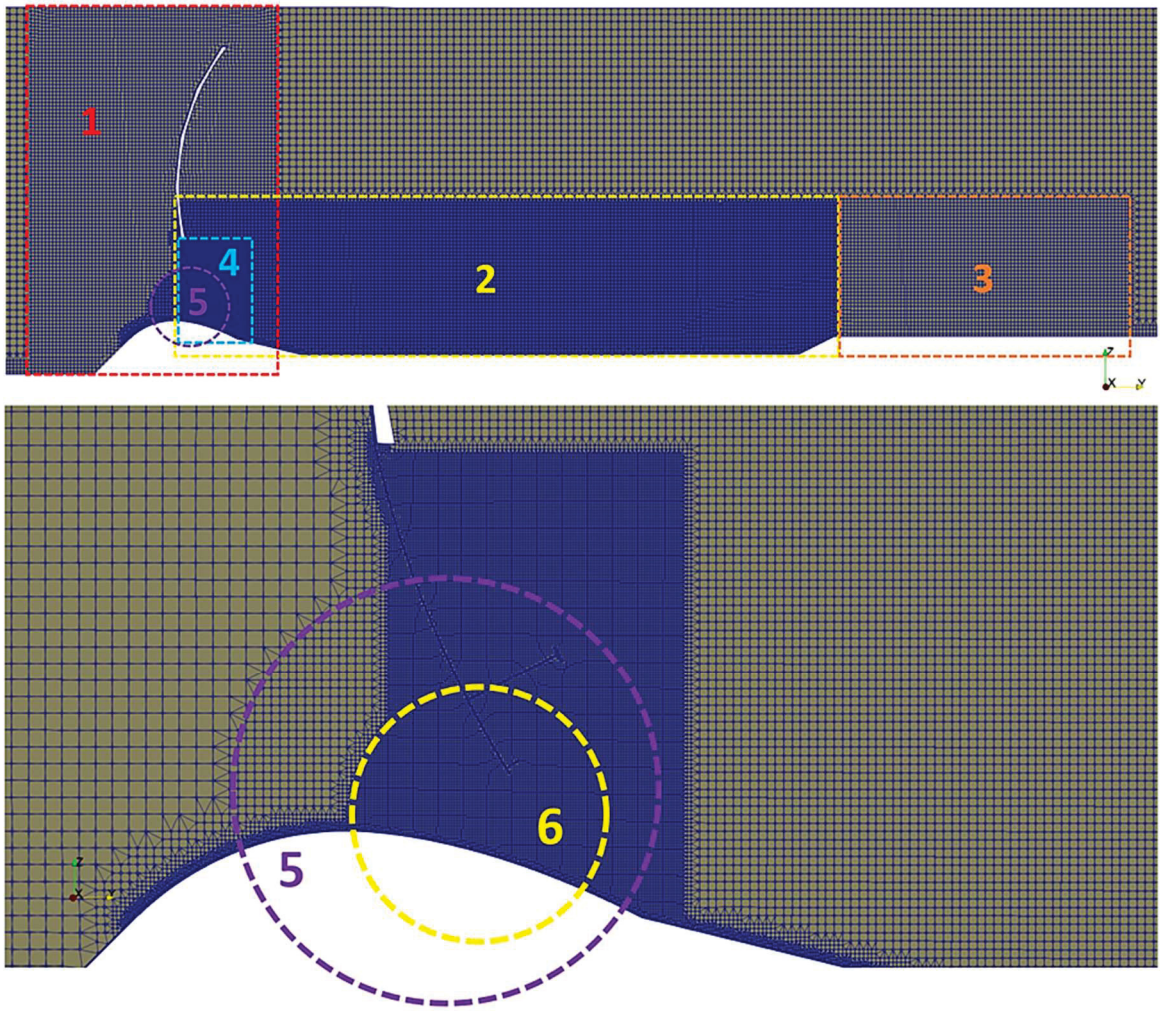
Já na geometria da Alternativa 1 conforme ilustrado na FIGURA 4.31, a malha computacional da Alternativa 1, com abertura de 2 m, foi construída com refinamentos semelhantes aos adotados no Projeto Piloto: o Bloco 1 (canal de aproximação) utilizou células de 0,40 m, o Bloco 2 (bacia de dissipação) células de 0,20 m, o Bloco 3 (região da restituição) 0,40 m e o Bloco 4 (região da viga inferior) 0,05 m. Já os cilindros 5 e 6, situados na região de aproximação do fluxo, próximos a ogiva do vertedouro e a viga inferior da comporta, utilizaram células de 0,20 m e 0,050 m, respectivamente.

Por fim, a malha computacional da Alternativa 2 (FIGURA 4.32), com abertura de 2 m, foi construída com refinamentos semelhantes aos das demais alternativas: o Bloco 1 (canal de aproximação) utilizou células de 0,40 m, o Bloco 2 (bacia de

dissipação) células de 0,20 m, o Bloco 3 (região da restituição) 0,40 m e o Bloco 4 (região da viga inferior) 0,05 m. Já o cilindro 5, situado na região de aproximação do fluxo, próximo à ogiva e à viga inferior da comporta, utilizou células de 0,20 m, sem a necessidade de adicionar um segundo cilindro, pois toda a área do paramento da comporta foi coberta pelo Bloco 4.

A FIGURA 4.33 ilustra a discretização final da malha computacional na região da viga inferior da comporta segmento, correspondente a abertura de 6 m na configuração da Alternativa 2. Ressalta-se, que a mesma metodologia de refinamento da malha computacional, apresentada anteriormente, foi aplicada as demais aberturas, mantendo-se as configurações dos blocos e cilindros de refinamento.

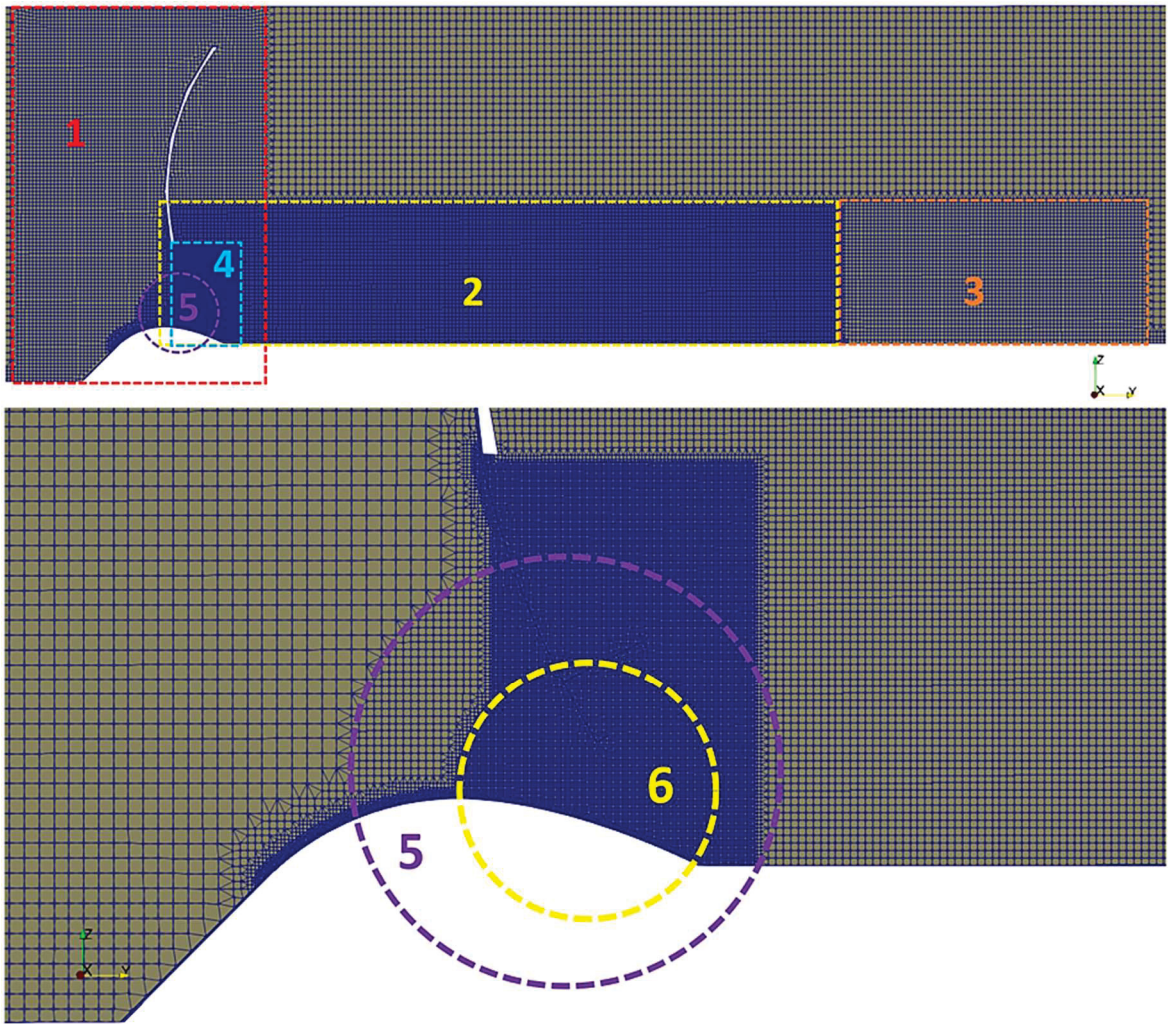
FIGURA 4.30 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA – PROJETO PILOTO – ABERTURA DE 2 M



Direção		Blocos e Cilindros					
		1	2	3	4	5	6
X	$X_{mínimo}$ (m)	-3	-3	-3	-3	-3	-3
	$X_{máximo}$ (m)	3	3	3	3	3	3
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20	0,05
Y	$Y_{mínimo}$ (m)	185	200	274	201	204	204
	$Y_{máximo}$ (m)	210	274	306	208	204	204
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20	0,05
Z	$Z_{mínimo}$ (m)	27,6	31,8	32,8	28,8	35,8	35,8
	$Z_{máximo}$ (m)	70,8	48,8	48,8	44,8	35,8	35,8
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20	0,05
-	Raio (m)	-	-	-	-	7	4

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

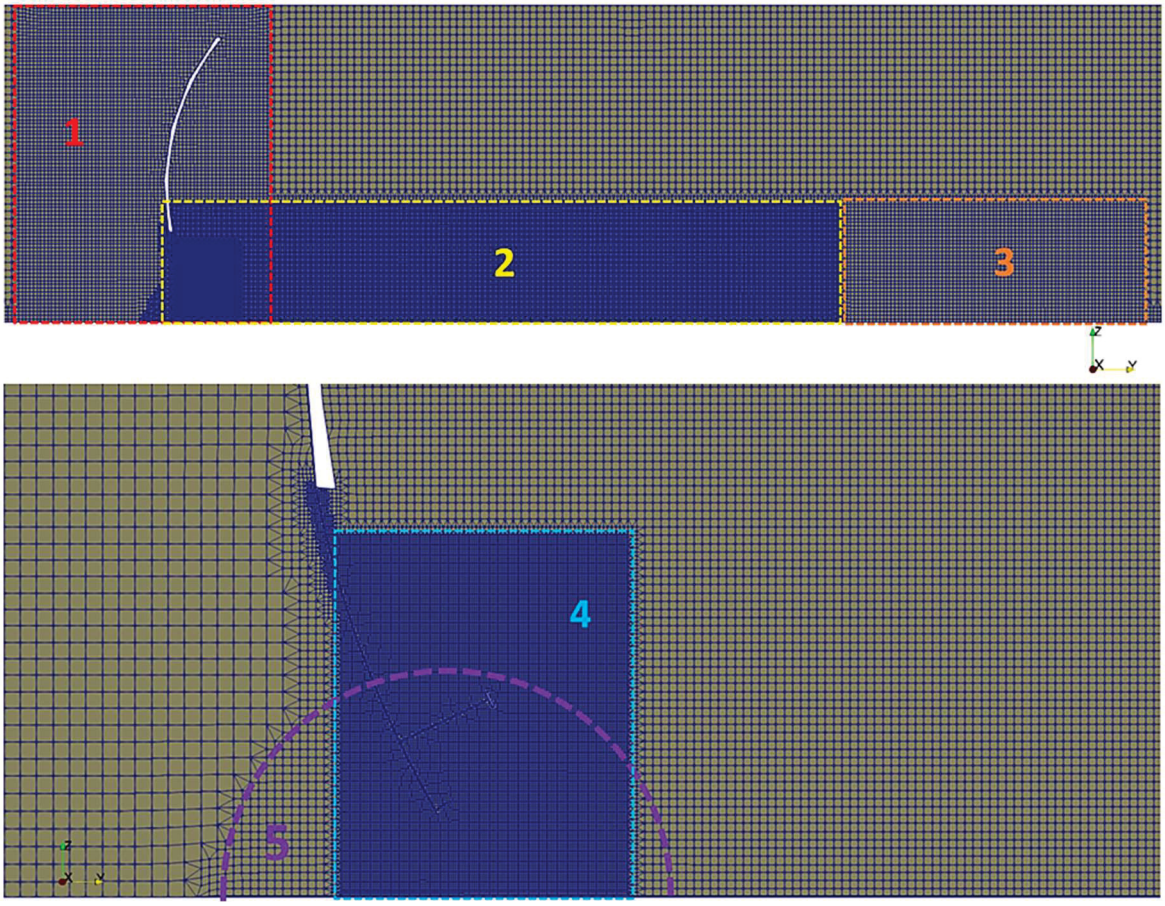
FIGURA 4.31 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA – ALTERNATIVA 1 – ABERTURA DE 2 M



Direção		Blocos e Cilindros					
		1	2	3	4	5	6
X	$X_{mínimo}$ (m)	-3	-3	-3	-3	-3	-3
	$X_{máximo}$ (m)	3	3	3	3	3	3
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20	0,05
Y	$Y_{mínimo}$ (m)	185	200	274	201	204	204
	$Y_{máximo}$ (m)	210	274	306	208	204	204
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20	0,05
Z	$Z_{mínimo}$ (m)	27,6	31,8	32,8	28,8	35,8	35,8
	$Z_{máximo}$ (m)	70,8	48,8	48,8	44,8	35,8	35,8
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20	0,05
-	Raio (m)	-	-	-	-	7	4

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

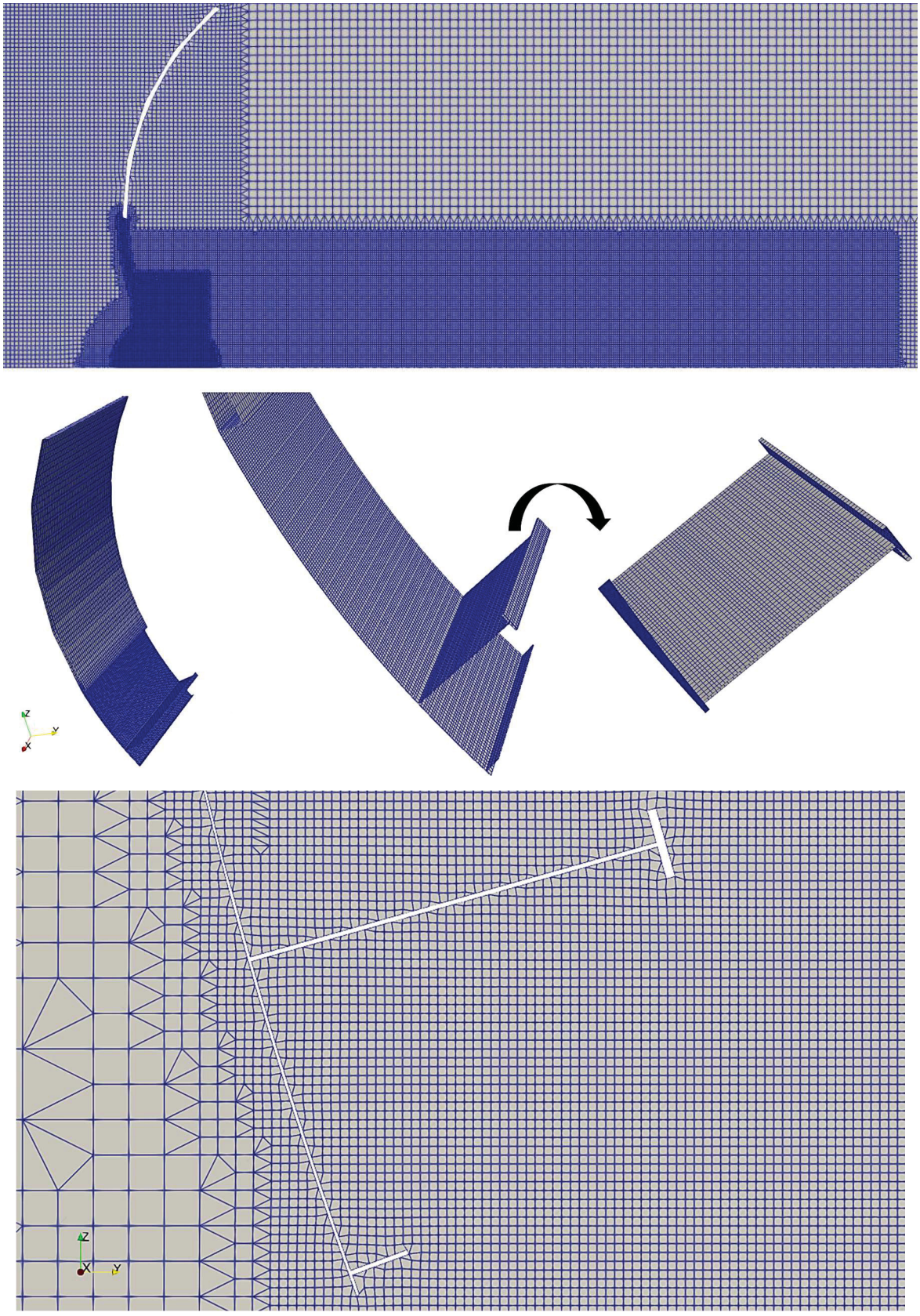
FIGURA 4.32 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA – ALTERNATIVA 2 – ABERTURA DE 2 M



Direção		Blocos e Cilindros				
		1	2	3	4	5
X	$X_{mínimo}$ (m)	-3	-3	-3	-3	-3
	$X_{máximo}$ (m)	3	3	3	3	3
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20
Y	$Y_{mínimo}$ (m)	185	200	274	201	204
	$Y_{máximo}$ (m)	210	274	306	208	204
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20
Z	$Z_{mínimo}$ (m)	27,6	31,8	32,8	28,8	35,8
	$Z_{máximo}$ (m)	70,8	48,8	48,8	44,8	35,8
	Tamanho (m)	0,40	0,20	0,40	0,05	0,20
-	Raio (m)	-	-	-	-	6

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.33 – DISCRETIZAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL



FONTE: A autora (2025).

4.2.2.1.3 Controles de Qualidade da Malha

Conforme detalhado no item 2.4.2, os parâmetros definidos no *meshQualityControls* do OpenFOAM® são fundamentais para garantir que a malha gerada atenda aos critérios e limites geométricos e numéricos exigidos, impactando diretamente na estabilidade, na precisão e na eficiência da simulação. Além da otimização da malha, obtida por meio de refinamentos específicos em áreas de interesse e de análises de sensibilidade, a qualidade da malha foi verificada com o uso da ferramenta *checkMesh* do OpenFOAM®.

A ferramenta *checkMesh* foi aplicada a cada uma das geometrias estudadas, realizando verificações geométricas e topológicas conforme os limites definidos no arquivo *meshQualityControls*. As verificações confirmaram a adequação das malhas geradas aos critérios de qualidade estabelecidos, com a validação de todos os parâmetros avaliados. Cabe ressaltar que, no OpenFOAM®, caso a malha não seja validada pelo *checkMesh*, são emitidas mensagens de alerta ou erro, recomendando que o usuário realize os devidos ajustes antes de prosseguir com as etapas subsequentes da modelagem computacional.

A FIGURA 4.34 ilustra uma verificação de malha realizada com o *checkMesh* para a geometria da Alternativa 2 com abertura de 6 m, confirmando a conformidade da malha com os limites estabelecidos (mensagem "OK") e indicando a ausência de alertas ou erros durante a análise.

FIGURA 4.34 – MENSAGEM DE SAIDA DO *CHECKMESH*

```
Checking topology...
    Boundary definition OK.
    Cell to face addressing OK.
    Point usage OK.
    Upper triangular ordering OK.
    Face vertices OK.
    Number of regions: 1 (OK).

Checking patch topology for multiply connected surfaces...
                  Patch    Faces   Points               Surface topology
             atmosphere     3342     4460  ok (non-closed singly connected)
                  inlet     1131     1512  ok (non-closed singly connected)
                 outlet      135      184  ok (non-closed singly connected)
               concrete     5325     7104  ok (non-closed singly connected)
                direita   115867   118615  ok (non-closed singly connected)
               esquerda   115867   118615  ok (non-closed singly connected)
            comportainf     1089     1464  ok (non-closed singly connected)
            comportasup      366      492  ok (non-closed singly connected)
                   back      186      252  ok (non-closed singly connected)
               face_inf      153      208  ok (non-closed singly connected)
               face_sup      147      200  ok (non-closed singly connected)
       placa_EL_41_owner      375      504  ok (non-closed singly connected)
    placa_EL_41_neighbour      375      504  ok (non-closed singly connected)
       placa_EL_45_owner      375      504  ok (non-closed singly connected)
    placa_EL_45_neighbour      375      504  ok (non-closed singly connected)
       placa_EL_50_owner      375      504  ok (non-closed singly connected)
    placa_EL_50_neighbour      375      504  ok (non-closed singly connected)
       placa_EL_54_owner      375      504  ok (non-closed singly connected)
    placa_EL_54_neighbour      375      504  ok (non-closed singly connected)

Checking geometry...
    Overall domain bounding box (2.8 -264 21) (3.4 600 70.800947)
    Mesh has 3 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 1)
    Mesh has 3 solution (non-empty) directions (1 1 1)
    Boundary openness (-6.5006852e-13 -1.8879415e-18 3.6125505e-17) OK.
    Max cell openness = 2.6021373e-16 OK.
    Max aspect ratio = 21.311737 OK.
    Minimum face area = 0.00054945. Maximum face area = 0.75728212.  Face area magnitudes OK.
    Min volume = 0.00010989. Max volume = 0.15145642.  Total volume = 20764.565.  Cell volumes OK.
    Mesh non-orthogonality Max: 41.206573 average: 1.9805855
    Non-orthogonality check OK.
    Face pyramids OK.
    Max skewness = 2.9330426 OK.
    Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.

End
```

FONTE: A autora (2025).

4.2.2.2 Condições de Contorno

A definição das condições de contorno do modelo computacional buscou reproduzir os fenômenos físicos observados no modelo hidráulico reduzido. Para isso, foram aplicadas condições de contorno do tipo *symmetry, patch e wall*, conforme descrito no item 2.4.3. Essas condições foram atribuídas as faces correspondentes de cada região do domínio computacional, conforme detalhado a seguir e na tabela da FIGURA 4.35:

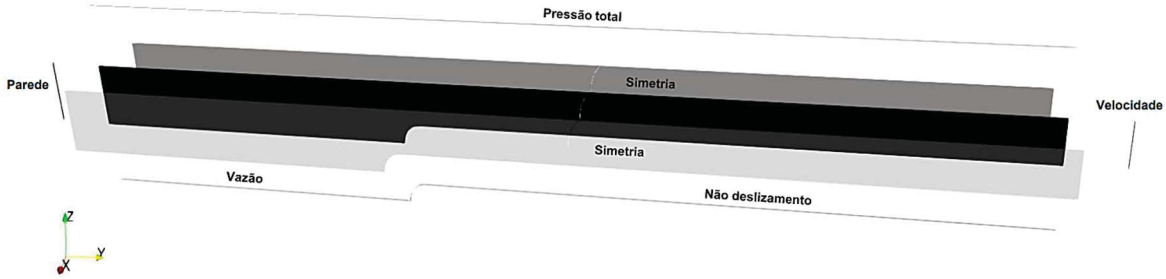
- Entrada: foi adotada a condição de contorno do tipo *inletOutlet*, na qual a maioria das variáveis utilizaram as condições *fixedValue,* que impõe um valor fixo na face de entrada e *calculated*, que calcula o valor da variável a partir de outras condições de contorno. Para as variáveis de pressão modificada (p_rgh)

e velocidade (U), foram aplicadas respectivamente, as condições *fixedFluxPressure*, que ajusta o gradiente de pressão com base no fluxo de velocidade, e *flowRateInletVelocity*, utilizada para impor a velocidade de entrada com base na vazão volumétrica, ambas obtidas nos ensaios do modelo físico;

- Saída: assim como na condição de contorno de entrada, adotou-se o tipo *inletOutlet* para a saída. Para a pressão modificada (p_rgh) e a fração volumétrica de água (*alpha.water*), aplicou-se a condição *zeroGradient*, permitindo que as variáveis se ajustassem ao gradiente local, caracterizando uma saída livre. Para a velocidade (U), utilizou-se a condição *outletPhaseMeanVelocity*, garantindo compatibilidade com o escoamento bifásico, por meio do ajuste da velocidade conforme o transporte das fases. Para as demais variáveis adotaram-se as condições *inletOutlet* e *calculated;*
- Atmosfera: foi adotada a condição de contorno do tipo *inletOutlet*, aplicando-se predominantemente as condições *inletOutlet* e *calculated* para a maioria das variáveis. Para a pressão modificada (p_rgh), utilizou-se a condição *totalPressure*, que calcula a pressão total (estática + dinâmica). Já para a velocidade (U), foi empregada a condição *pressureInletOutletVelocity*, ideal para escoamentos bifásicos, permitindo que o fluxo seja naturalmente conduzido pela diferença de pressão entre as fases;
- Contornos sólidos: para representar as superfícies sólidas, com as quais o fluido interage, foi adotada a condição de contorno do tipo *wall*, a qual exige a definição de condições específicas para cada variável (normalmente identificadas pelo nome da variável seguido de *WallFunction*). Para as variáveis de pressão modificada (p_rgh) e velocidade (U), foram aplicadas respectivamente, as condições *fixedFluxPressure* e *noSlip,* que impõem aderência total do fluido a superfície sólida. Para a fração volumétrica de água (*alpha.water*), aplicou-se a condição *zeroGradient*;
- *Baffles*: para os *Baffles* foram adotadas as mesmas configurações utilizadas nos contornos sólidos, com exceção da variável de velocidade (U), para a qual foi aplicada a condição de contorno *wall* do tipo *slip*. Essa definição permitiu o deslizamento total do fluido sobre a superfície dos *baffles*, assegurando que a componente normal da velocidade seja nula, sem restrição à componente tangencial;

- Direita e esquerda: em ambas as faces laterais do domínio, foi aplicada a condição de contorno do tipo *symmetry*, representando planos de simetria tanto da geometria quanto do escoamento. Essa condição impede o fluxo normal ao plano, bem como gradientes normais das variáveis, refletindo o comportamento simétrico do escoamento nesses limites.

FIGURA 4.35 – CONDIÇÕES DE CONTORNO



Fronteira/Variável	$alpha.water$	ϵ	k	ν_t
Entrada	*fixedValue*	*fixedValue*	*fixedValue*	*calculated*
Atmosfera	*inletOutlet*	*inletOutlet*	*inletOutlet*	*calculated*
Saída	*zeroGradient*	*inletOutlet*	*inletOutlet*	*calculated*
Contornos Sólidos	*zeroGradient*	*epsilonWallFunction*	*kqRWallFunction*	*nutkRoughWallFunction*
Baffles	*zeroGradient*	*epsilonWallFunction*	*kqRWallFunction*	*nutkWallFunction*
Direita	*symmetry*	*symmetry*	*symmetry*	*symmetry*
Esquerda	*symmetry*	*symmetry*	*symmetry*	*symmetry*

Fronteira/Variável	ω	p_rgh	U
Entrada	*fixedValue*	*fixedFluxPressure*	*flowRateInletVelocity*
Atmosfera	*inletOutlet*	*totalPressure*	*pressureInletOutletVelocity*
Saída	*inletOutlet*	*zeroGradient*	*outletPhaseMeanVelocity*
Contornos Sólidos	*omegaWallFunction*	*fixedFluxPressure*	*noSlip*
Baffles	*omegaWallFunction*	*fixedFluxPressure*	*slip*
Direita	*symmetry*	*symmetry*	*symmetry*
Esquerda	*symmetry*	*symmetry*	*symmetry*

Notas:
$alpha.water$: fração de volume de água [-];
ϵ: taxa de dissipação de energia cinética turbulenta [m^2/s^3];
k: energia cinética turbulenta [m^2/s^2];
ν_t: viscosidade turbulenta [m^2/s];
ω: taxa de dissipação específica [1/s];
p_rgh: pressão modificada subtraída de $\rho \cdot g \cdot h$ [Pa];
U: velocidade [m/s].

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

A representação das rugosidades superficiais no modelo computacional foi implementada por meio dos parâmetros especificados no arquivo *nut*, localizado no diretório “0” do OpenFOAM®, o qual descreve o campo de viscosidade turbulenta cinemática em todo o domínio computacional. Os valores de rugosidade foram definidos com base em estimativas representativas das condições do protótipo, por

meio da aplicação da função de parede do tipo *nutkRoughWallFunction*, conforme detalhado na FIGURA 4.35. Para as superfícies em concreto, incluindo os canais de aproximação e restituição, bem como a ogiva do vertedouro, foi adotada uma altura de rugosidade equivalente (K_s) de 0,5 mm. Para a estrutura da comporta, confeccionada em aço, estabeleceu-se $K_s = 0{,}1$ mm. O coeficiente de rugosidade (C_s), utilizado na formulação da função de parede, foi fixado em 0,5, para ambas as condições, valor considerado adequado, conforme literatura consagrada.

4.2.2.3 Condições Iniciais

As condições iniciais do escoamento, correspondentes ao tempo zero, foram definidas utilizando as ferramentas *mapFields* e *setFields* para a manipulação dos campos da simulação. A ferramenta *mapFields* foi empregada para importar as condições finais de simulações preexistentes com configurações hidráulicas similares à desejada, transferindo campos como nível de água, velocidade, pressão e vazão. Em seguida, o *setFields* foi utilizado para ajustar os níveis de água inicialmente transferidos, suavizando variações acentuadas desses níveis de água em todo o domínio. Após a aplicação das ferramentas, cujo objetivo foi se aproximar da condição final desejada e acelerar a convergência numérica, a simulação foi iniciada, aplicando-se no tempo zero as condições hidráulicas definidas no diretório "0", incluindo, vazão, níveis de água, pressão, velocidade e parâmetros de turbulência.

4.2.2.4 Discretização das Equações

O método de discretização adotado no OpenFOAM® para as análises computacionais foi o Método dos Volumes Finitos (FVM), conforme detalhado no item 2.4.2. As principais características dessa abordagem foram:

- Utilização de malha não estruturada para a discretização do domínio computacional, permitindo melhor adaptação às geometrias complexas envolvidas;
- A definição do passo de tempo nas simulações computacionais foi orientada pela condição de estabilidade numérica, adotando-se como critério o número de Courant igual a 0,5 no intervalo final da simulação, de forma a garantir a

precisão temporal dos resultados sem comprometer a estabilidade da solução. O intervalo de tempo (time step) entre cada iteração, considerado na resolução das equações foi definido como 0,0001 s;

- As simulações foram conduzidas com duração total de 300 segundos, divididas em duas etapas: na primeira, correspondente aos 150 segundos iniciais, foi adotado um número de Courant igual a 2,0; já na segunda etapa, referente aos 150 segundos finais, o número de Courant foi reduzido para 0,5, com objetivo de aumentar a precisão nas fases finais do escoamento;
- Aplicação do esquema Crank-Nicolson para a discretização temporal, que combina os métodos de Euler explícito e implícito, proporcionando maior precisão e estabilidade numérica nas simulações.

4.2.2.5 Soluções Numéricas

Na etapa de soluções numéricas da modelagem computacional, foram definidos parâmetros essenciais para assegurar a convergência, a estabilidade e a precisão das simulações, conforme descrito a seguir.

O solver iterativo escolhido para a soluções numéricas foi o interFoam, adequado para simulações envolvendo dois fluidos incompressíveis, isórtermicos e imiscíveis. Esse solver adota uma abordagem de captura de interface, baseada no método da fração de volume (VOF - *Volume of Fluid*), conforme detalhado no item 2.4.2.

O acoplamento entre pressão e velocidade foi realizado por meio do algoritmo PIMPLE, recomendado para simulações em que o número de Courant é superior a 1. Para valores inferiores a esse limiar, foi empregado o algoritmo PISO.

O critério de convergência adotado no método iterativo baseou-se na definição de erros residuais para cada campo analisado (fração de volume de água, pressão, velocidade e variáveis de turbulência como k, ε, ω), definidos no diretório *fvSolution*, com tolerâncias variando entre 10^{-6} e 10^{-8}. Quando os resíduos atingem valores inferiores aos limites de tolerância especificados, o solver interrompe o processo iterativo, assegurando que o erro esteja dentro de um nível aceitável para cada campo.

O número máximo de iterações por passo de tempo foi ajustado conforme a necessidade de convergência de cada simulação, sendo definido no arquivo

fvSolution com um limite de até 15 iterações. Esse parâmetro controla o esforço computacional por etapa temporal, assegurando que o solver busque a convergência dos campos solucionados dentro do número máximo estabelecido.

Nas etapas finais da simulação (últimos 150 segundos), foi imposto um limite máximo de 0,5 para o número de Courant (CFL), a fim de garantir maior estabilidade e precisão na solução transiente, controlando a relação entre o avanço no tempo e o deslocamento do fluido em uma célula da malha.

4.2.3 Pontos e Regiões de Aquisição de Resultados

Este item detalha os pontos de aquisição temporal das principais grandezas físicas monitoradas durante a simulação, tais como: nível de água, vazão, perfil da linha d'água, velocidade, pressão e esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior da comporta segmento. Os pontos de medição do modelo computacional foram posicionados nas mesmas coordenadas utilizadas no modelo físico, de modo a viabilizar a comparação entre os resultados numéricos e experimentais.

4.2.3.1 Medidores de Níveis de Água

A aquisição dos níveis de água teve como principal objetivo a determinação do perfil da linha d'água a jusante do vertedouro. Para cada geometria analisada, foram definidos 19 pontos de medição ao longo da soleira e no eixo do vertedouro. Adicionalmente, os níveis d'água foram monitorados a montante, no canal de aproximação, e a jusante, no canal de restituição, conforme as posições indicadas na FIGURA 4.36.

4.2.3.2 Medidores de Pressão

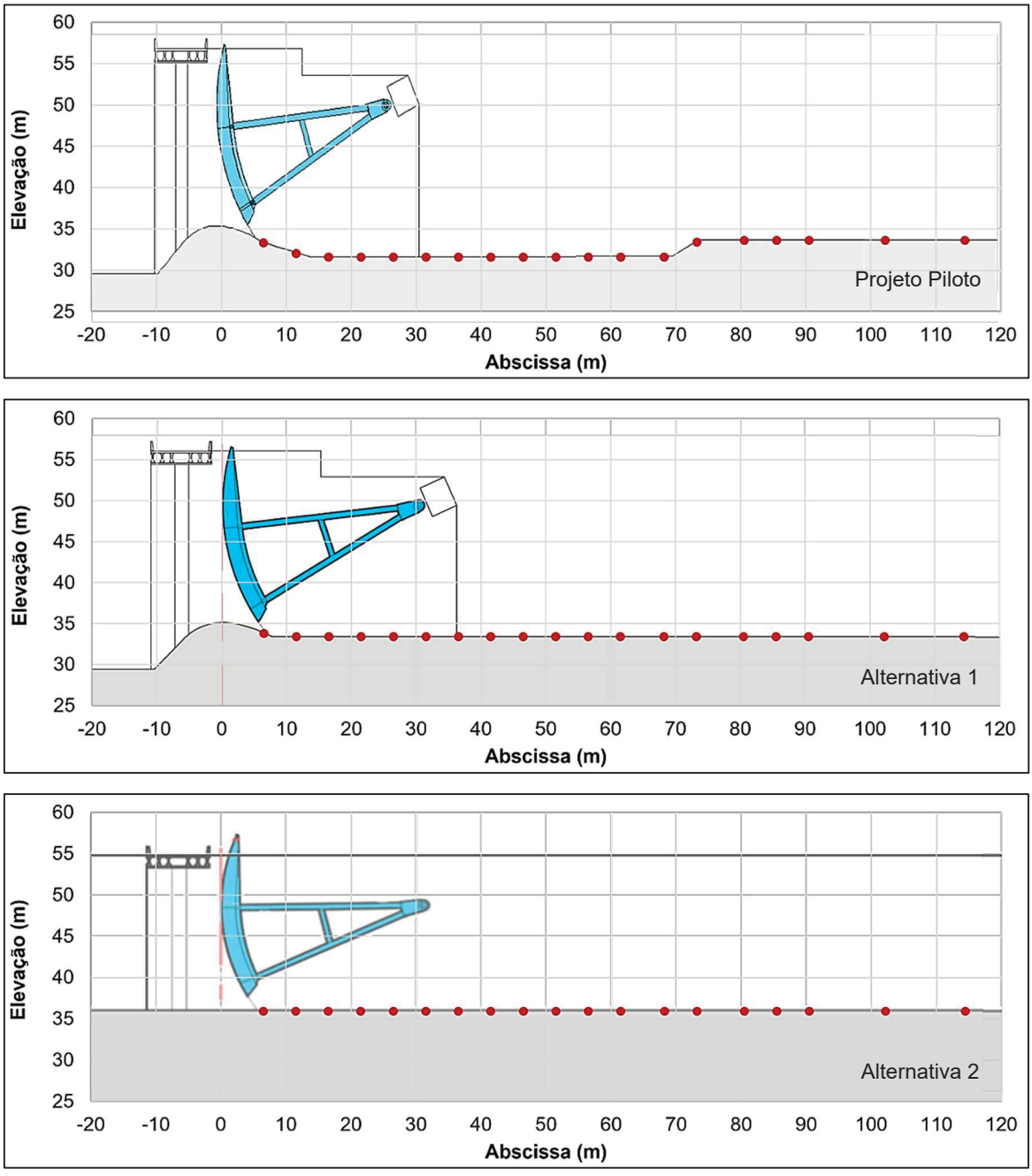
A aquisição de pressão foi realizada ao longo da soleira do vertedouro e da bacia de dissipação, posicionada no eixo central do modelo computacional. O número de pontos de medição variou conforme a configuração geométrica adotada: no Projeto Piloto, foram considerados 29 pontos conforme ilustrado na FIGURA 4.37; na Alternativa 1, devido à elevação da soleira, os pontos P16 e P29 foram suprimidos, totalizando 27 pontos; já na Alternativa 2, não foram realizadas medições de pressão

ao longo do canal, uma vez que a elevação da soleira inviabilizou o acesso aos pontos de aquisição.

4.2.3.3 Medidores de Esforços

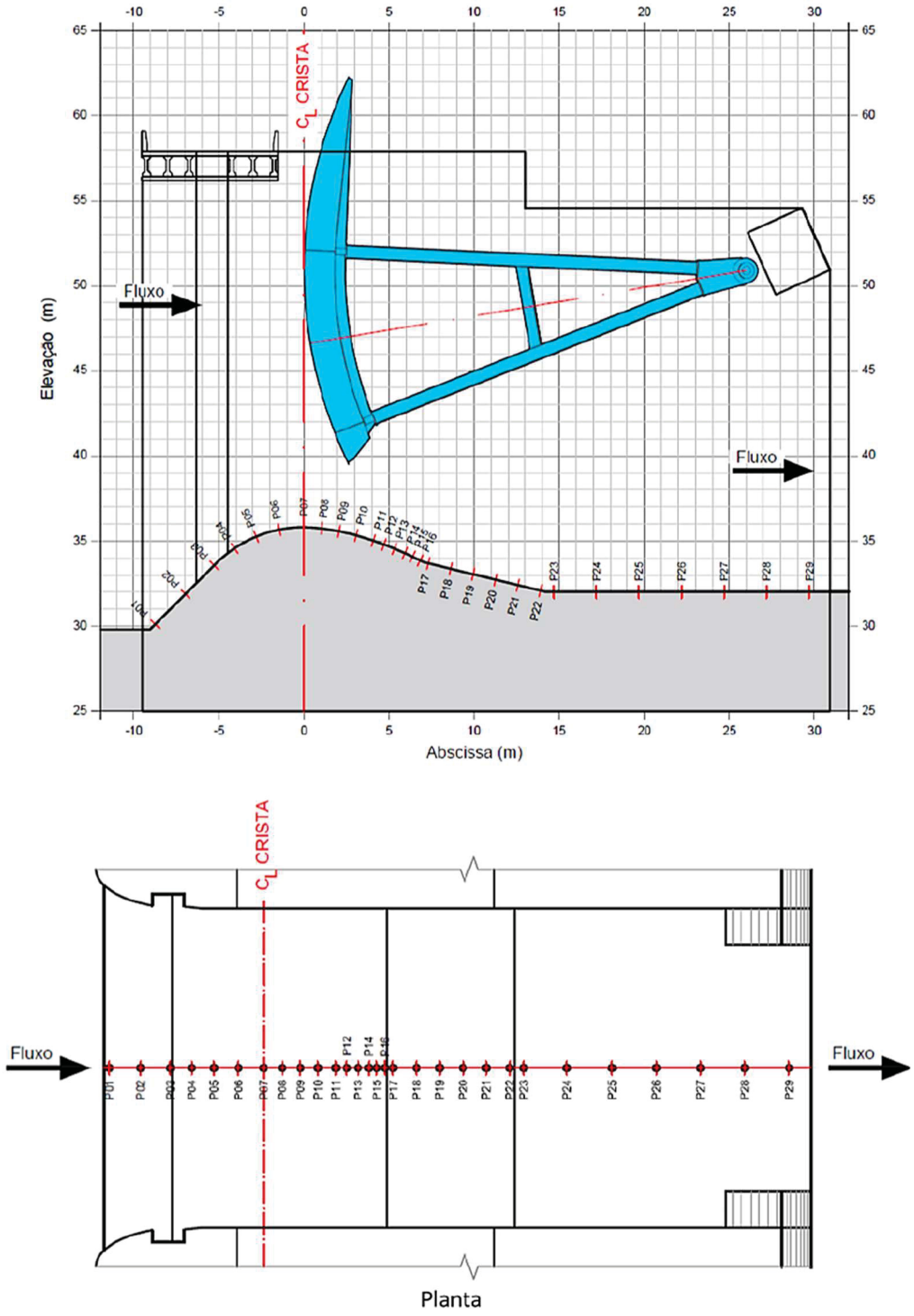
A aquisição de dados de força atuantes na viga inferior da comporta segmento teve como objetivo analisar os esforços hidrodinâmicos gerados pelas ondas do ressalto hidráulico. As medições foram realizadas nas faces superior e inferior da viga, possibilitando a determinação da direção da força resultante, conforme ilustrado na FIGURA 4.38. Após a aquisição dos dados, os dados foram filtrados, eliminando 0,10% dos valores extremos registrados.

FIGURA 4.36 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE AQUISIÇÃO DE NIVEL DE ÁGUA



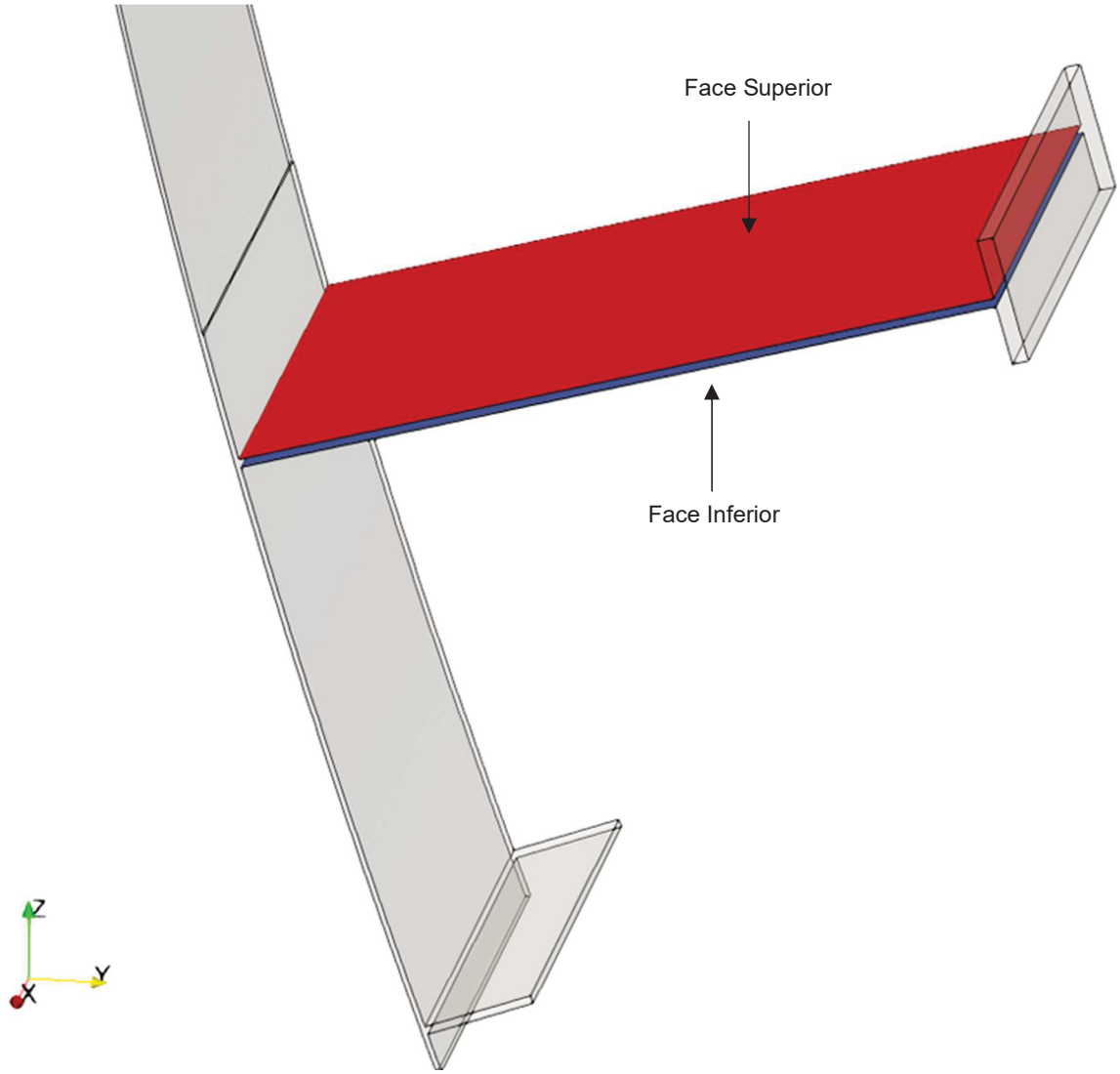
FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.37 – POSICIONAMENTO DOS PONTOS DE AQUISIÇÃO DE PRESSÃO



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4.38 – POSICIONAMENTO DAS REGIÕES DE AQUISIÇÃO DE ESFORÇOS



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

4.2.4 Definição das Simulações

Conforme apresentado no item 4.1.5, foram simuladas no modelo computacional as mesmas condições hidráulicas ensaiadas em modelo físico, abrangendo cinco diferentes condições de afogamento da viga inferior da comporta. Essas condições, classificadas de A a E e resumidas na TABELA 4.1, resultaram em um total de 33 simulações para a geometria do Projeto Piloto, 28 para a Alternativa 1 e 31 para a Alternativa 2, totalizando 92 simulações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 COMPARATIVO ENTRE O MODELO FÍSICO E COMPUTACIONAL

Este capítulo apresenta as análises comparativas entre os resultados obtidos nos modelos físico e computacional, para cada configuração geométrica avaliada. Os parâmetros considerados nas análises foram: vazões de entrada e saída, níveis de água, perfis longitudinais da linha de água, pressões estáticas ao longo da soleira do vertedouro e os esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior da comporta segmento.

5.1.1 Projeto Piloto

As análises comparativas realizadas para a geometria do Projeto Piloto consideraram aberturas da comporta variando de 1,0 m a 8,0 m, para as diferentes condições de afogamento da sua viga inferior, conforme apresentado na TABELA 4.1.

A TABELA 5.1 descreve a comparação dos níveis de água no trecho de montante (reservatório) e de jusante (restituição), além da capacidade de descarga do vertedouro, com a indicação da diferença percentual entre os dois modelos.

As FIGURA 5.1, FIGURA 5.2 e FIGURA 5.3 ilustram o comparativo dos perfis médios de linha de água, das pressões médias e das pressões instantâneas a jusante da comporta segmento, para a abertura de 1 m. Os resultados referentes as demais aberturas, encontram-se disponíveis nos ANEXO 4 e ANEXO 5. Nas representações gráficas, os dados obtidos no modelo físico são representados em azul claro, enquanto os resultados obtidos no modelo computacional são apresentados em azul escuro.

Por fim, os esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior da comporta segmento, no sentido vertical, foram obtidos numericamente para uma estrutura com 1,2 m de largura, enquanto, no modelo físico, foram medidos por meio de cinco células de carga, totalizando 18 m de largura em escala de protótipo. Para possibilitar a comparação entre os modelos, os resultados são apresentados por unidade de largura (kgf/m), correspondentes ao período estabilizado da simulação (últimos 150 segundos). As FIGURA 5.4 e FIGURA 5.5, a título ilustrativo, apresentam a análise

para a abertura de 1 m, incluindo as respectivas curvas de permanência. Os resultados correspondentes às demais aberturas estão disponíveis nos ANEXO 6 e ANEXO 7.

TABELA 5.1 – COMPARATIVO DA CAPACIDADE DE DESCARGA – PROJETO PILOTO

Ensaio	Vazão Específica ($m^3/s/m$)	Modelo Físico			Modelo Computacional			Diferença entre Coeficientes
		N.A.M. (m) (1)	N.A.J. (m) (2)	C ($m^{1/2}/s$)(3)	N.A.M. (m)	N.A.J. (m)	C ($m^{1/2}/s$)	
1.1.1	16,24	55,81	40,05	0,811	56,19	40,12	0,803	0,9%
1.1.2	15,67	55,84	40,52	0,782	56,00	40,60	0,779	0,4%
1.1.3	14,94	55,79	41,34	0,746	55,40	41,34	0,754	1,0%
1.1.4	14,53	55,84	42,01	0,725	55,83	42,03	0,725	0,0%
1.1.5	14,15	55,80	42,50	0,707	55,42	42,43	0,713	0,9%
1.2.1	29,81	55,75	42,71	0,761	55,60	42,76	0,764	0,4%
1.2.2	28,75	55,78	43,19	0,734	55,44	43,28	0,740	0,9%
1.2.3	27,88	55,77	43,58	0,712	55,36	43,69	0,719	1,1%
1.2.4	27,15	55,73	44,00	0,694	55,39	44,07	0,700	0,9%
1.2.5	26,27	55,80	44,47	0,670	55,32	44,52	0,678	1,2%
1.2.6	**24,76**	**55,76**	**45,51**	**0,632**	**55,09**	**45,31**	**0,643**	**1,7%**
1.3.1	42,16	55,76	44,61	0,731	55,56	44,68	0,735	0,5%
1.3.2	41,27	55,76	44,80	0,716	55,43	44,95	0,722	0,9%
1.3.3	40,47	55,79	45,07	0,702	55,41	45,17	0,709	1,0%
1.3.4	38,54	55,77	45,56	0,668	55,28	45,59	0,677	1,3%
1.3.5	37,00	55,81	46,08	0,641	55,25	46,06	0,651	1,5%
1.3.6	35,68	55,74	46,70	0,619	55,26	46,60	0,627	1,3%
1.4.1	55,49	55,76	45,75	0,734	55,81	45,77	0,733	0,1%
1.4.2	52,74	55,77	46,12	0,698	55,47	46,26	0,704	0,8%
1.4.3	52,28	55,77	46,29	0,692	55,54	46,42	0,696	0,6%
1.4.4	48,53	55,80	46,98	0,641	55,43	47,04	0,648	1,0%
1.4.5	47,18	55,84	47,40	0,623	55,81	47,57	0,624	0,1%
1.4.6	45,40	55,79	47,68	0,600	55,40	47,77	0,607	1,1%
1.5.1	75,60	55,84	48,01	0,687	55,72	48,02	0,690	0,4%
1.5.2	70,27	55,76	48,50	0,640	55,54	48,52	0,645	0,7%
1.5.3	66,14	55,77	48,98	0,603	55,63	49,15	0,605	0,5%
1.5.4	62,95	55,85	49,53	0,572	55,67	49,64	0,576	0,6%
1.5.5	58,00	55,75	50,24	0,529	55,65	50,33	0,531	0,4%
1.6.1	90,93	55,92	49,77	0,639	56,16	49,92	0,634	0,7%
1.6.2	84,51	55,89	50,21	0,594	55,83	50,26	0,595	0,2%
1.6.3	77,25	55,66	50,70	0,547	55,57	50,77	0,549	0,3%
1.6.4	72,42	55,70	51,20	0,512	55,58	51,31	0,514	0,4%
1.6.5	68,39	55,78	51,72	0,482	55,65	51,78	0,484	0,4%
							Média	**0,73%**

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

NOTAS: (1) N.A.M. = Nível de Água de Montante;

(2) N.A.J. = Nível de Água de Jusante;

(3) C = $\left(\frac{q}{G_0 \times \sqrt{2 \times 9{,}81 \times H}}\right)$;

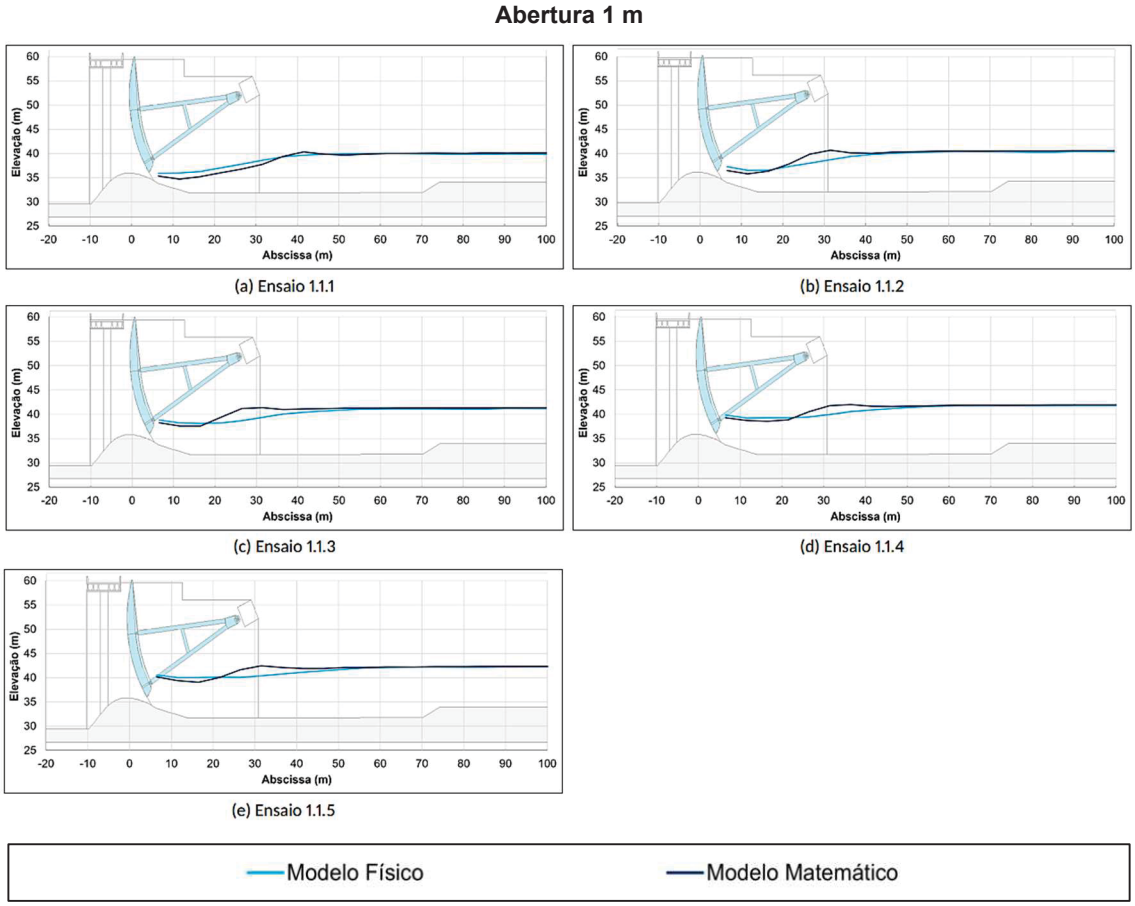
C = Coeficiente de Descarga;

q = Vazão para 1 vão;

G_0 = Abertura da Comporta;

H = Carga Hidráulica.

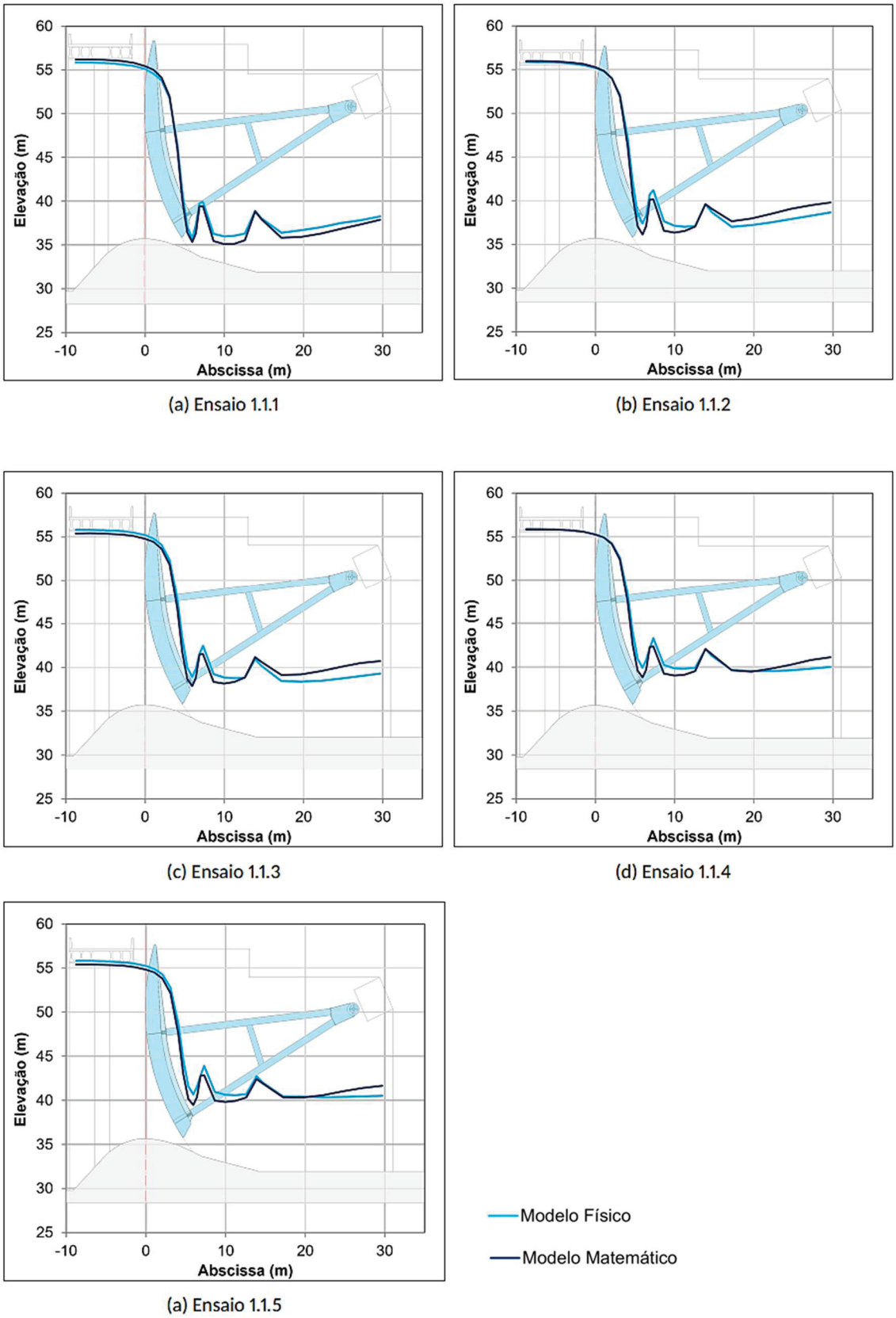
FIGURA 5.1 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – PROJETO PILOTO – 1M



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

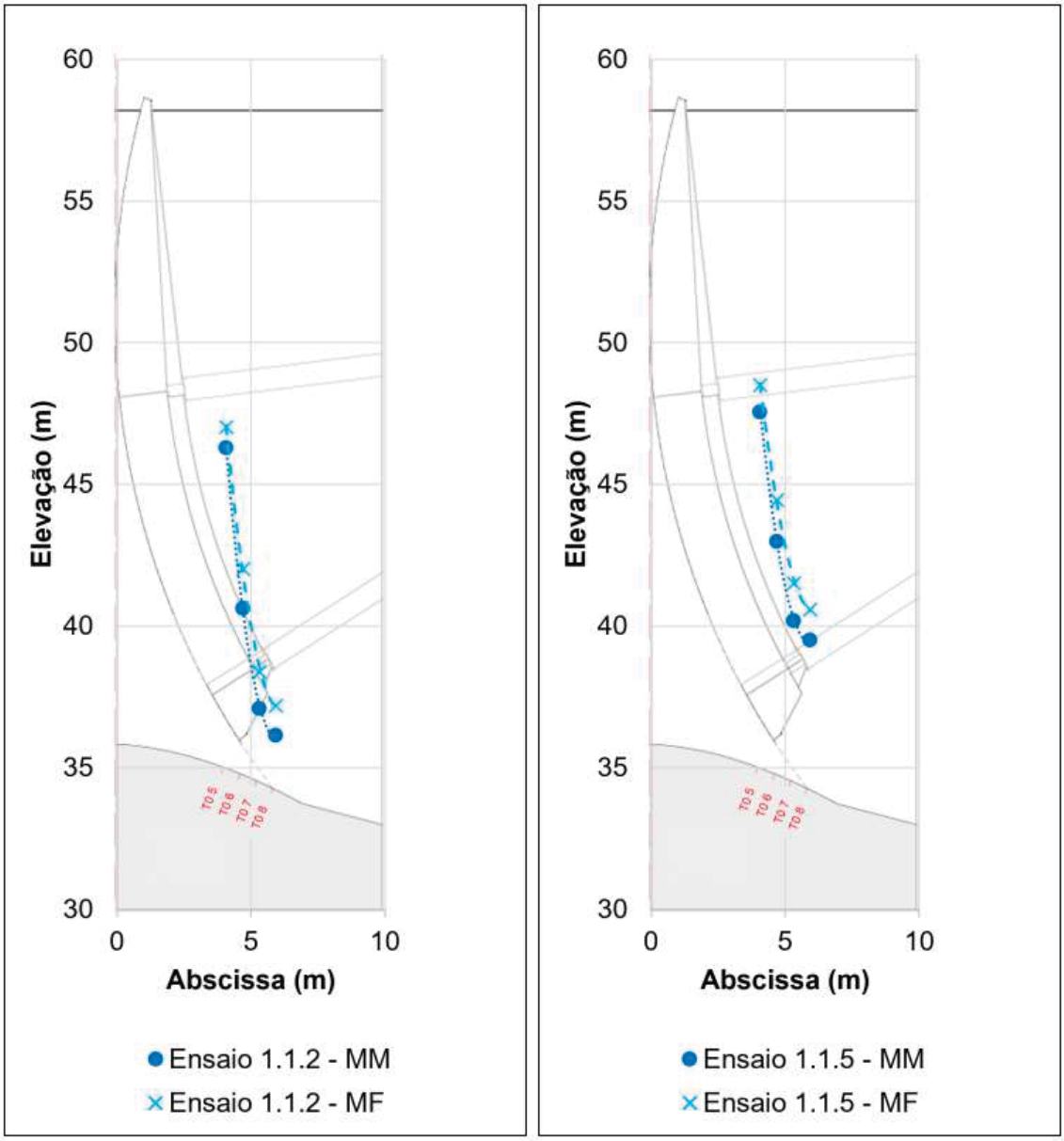
FIGURA 5.2 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS – PROJETO PILOTO – 1M

Abertura 1 m



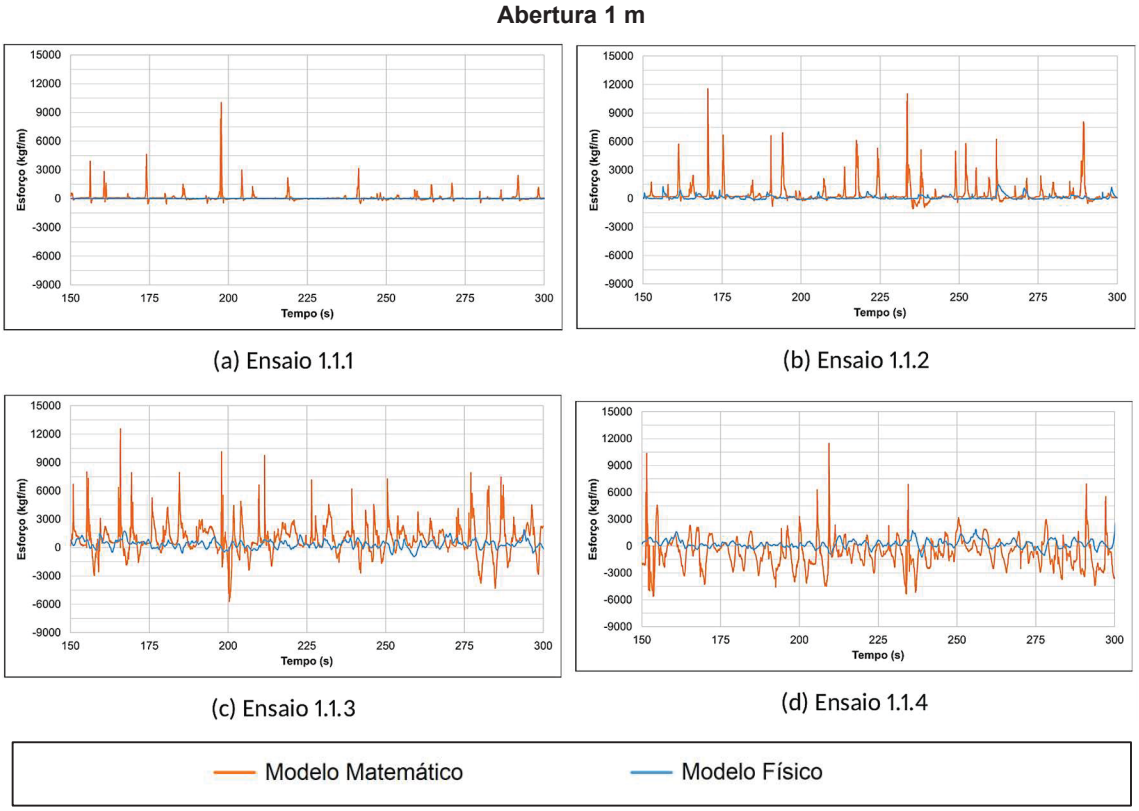
FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.3 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES INSTANTÂNEAS – PROJETO PILOTO – 1M



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

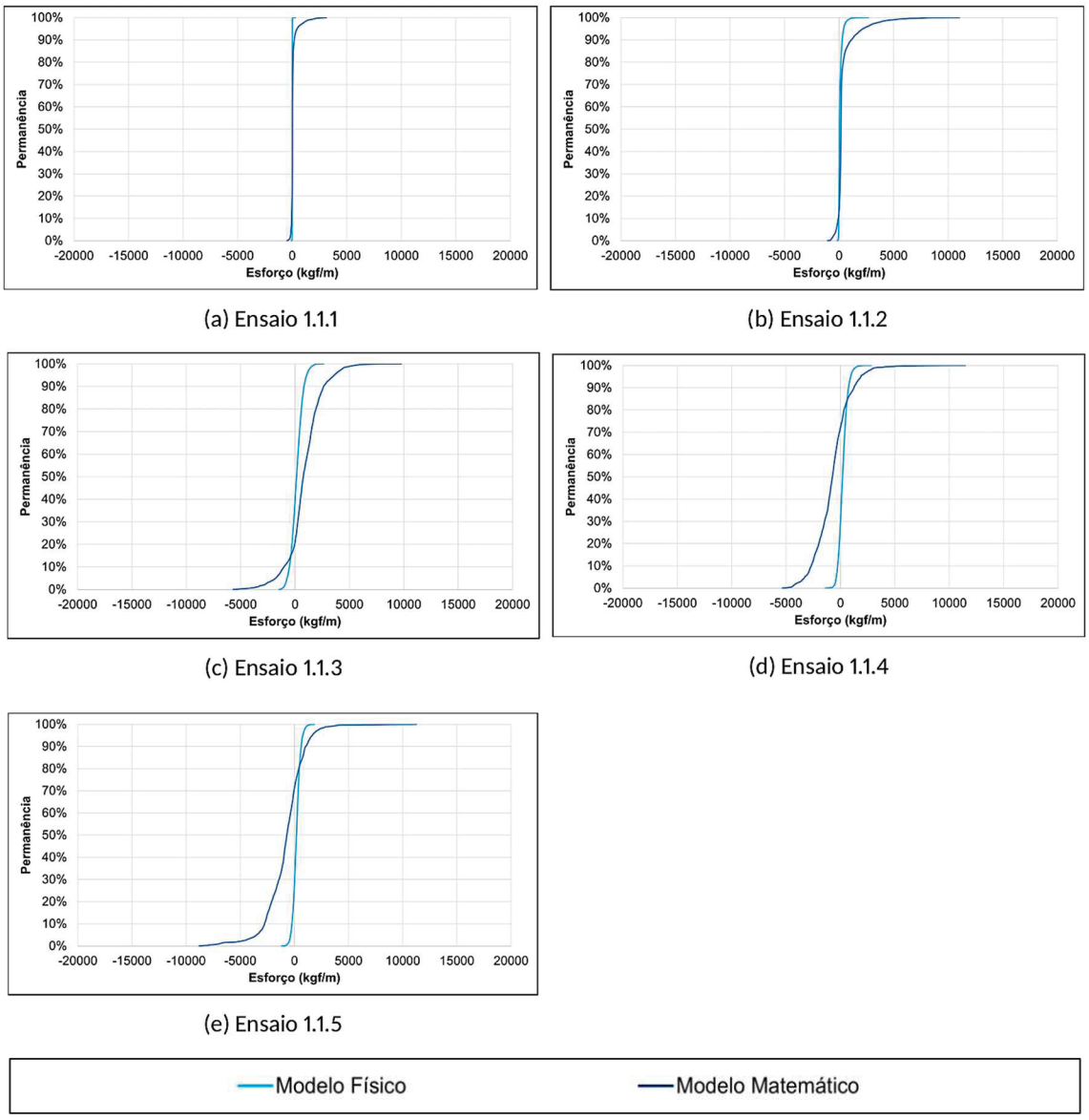
FIGURA 5.4 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO – 1M



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.5 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO – 1M

Abertura 1 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

5.1.1 Alternativa 1

Seguindo a mesma metodologia adotada no Projeto Piloto, as análises comparativas realizadas para a geometria da Alternativa 1 consideraram aberturas da comporta variando de 1,0 m a 8,0 m, para as diferentes condições de afogamento da sua viga inferior, conforme apresentado na TABELA 4.1.

A TABELA 5.2 descreve a comparação dos níveis de água no trecho de montante (reservatório) e de jusante (restituição), além da capacidade de descarga do vertedouro, com a indicação da diferença percentual entre os dois modelos.

As figuras dos ANEXO 6 e ANEXO 7 ilustram o comparativo dos perfis médios de linha de água, das pressões médias e das pressões instantâneas a jusante da comporta segmento. Os resultados obtidos no modelo físico são representados em azul claro, enquanto os resultados obtidos no modelo computacional são representados em azul escuro.

As FIGURA 5.6, FIGURA 5.7 e FIGURA 5.8 ilustram o comparativo dos perfis médios de linha de água, das pressões médias e das pressões instantâneas a jusante da comporta segmento, para a abertura de 1 m. Os resultados referentes as demais aberturas, encontram-se disponíveis nos ANEXO 8 e ANEXO 9. Nas representações gráficas, os dados obtidos no modelo físico são representados em azul claro, enquanto os resultados obtidos no modelo computacional são apresentados em azul escuro.

Por fim, os esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior da comporta segmento, no sentido vertical, foram obtidos numericamente para uma estrutura com 1,2 m de largura, enquanto, no modelo físico, foram medidos por meio de cinco células de carga, totalizando 18 m de largura. Para possibilitar a comparação entre os modelos, os resultados são apresentados por unidade de largura (kgf/m), correspondentes ao período estabilizado da simulação (últimos 150 segundos). As FIGURA 5.9 e FIGURA 5.10, a título ilustrativo, apresentam a análise para a abertura de 1 m, incluindo as respectivas curvas de permanência. Os resultados correspondentes às demais aberturas estão disponíveis nos ANEXO 10 e ANEXO 11.

TABELA 5.2 – COMPARATIVO DA CAPACIDADE DE DESCARGA – ALTERNATIVA 1

Ensaio	Vazão Específica ($m^3/s/m$)	Modelo Físico			Modelo Computacional			Diferença entre Coeficientes
		N.A.M. (m) (1)	N.A.J. (m) (2)	C ($m^{1/2}/s$)(3)	N.A.M. (m)	N.A.J. (m)	C ($m^{1/2}/s$)	
2.1.1	15,85	55,83	41,60	0,791	55,84	41,74	0,791	0,0%
2.1.2	15,57	55,82	41,75	0,777	55,83	41,85	0,777	0,0%
2.1.3	14,83	55,83	42,29	0,740	55,80	42,44	0,741	0,1%
2.1.4	14,40	55,83	42,71	0,719	55,75	42,82	0,720	0,2%
2.1.5	13,98	55,77	43,16	0,699	55,44	43,18	0,704	0,8%
2.2.1	29,45	55,82	44,10	0,751	55,64	44,17	0,754	0,4%
2.2.2	28,24	55,85	44,37	0,719	55,95	44,55	0,718	0,2%
2.2.3	27,46	55,84	44,59	0,700	55,41	44,67	0,708	1,1%
2.2.4	26,70	55,85	44,89	0,680	55,66	45,04	0,683	0,5%
2.2.5	25,84	55,87	45,37	0,658	55,87	45,49	0,658	0,0%
2.2.6	25,36	55,85	45,59	0,646	55,90	45,75	0,645	0,1%
2.4.1	54,34	55,79	46,92	0,718	55,77	47,09	0,719	0,1%
2.4.2	52,74	55,88	47,08	0,696	55,63	47,22	0,700	0,7%
2.4.3	50,78	55,80	47,31	0,671	55,55	47,43	0,676	0,7%
2.4.4	47,14	55,79	47,64	0,623	55,33	47,82	0,631	1,3%
2.4.5	45,95	55,80	47,95	0,607	55,44	48,07	0,613	1,0%
2.4.6	44,69	55,82	48,35	0,590	55,42	48,33	0,597	1,1%
2.5.1	73,86	55,80	49,01	0,672	55,70	49,00	0,675	0,4%
2.5.1B	70,27	55,78	49,25	0,640	55,56	49,17	0,645	0,7%
2.5.2	66,97	55,84	49,55	0,609	55,55	49,46	0,615	0,9%
2.5.3	63,89	55,83	49,76	0,581	55,43	49,73	0,588	1,2%
2.5.4	61,97	55,82	49,91	0,564	55,42	49,92	0,571	1,2%
2.5.5	**60,43**	**55,82**	**50,08**	**0,550**	**55,37**	**50,04**	**0,557**	**1,4%**
2.6.1	89,39	55,82	50,44	0,630	55,85	50,54	0,629	0,1%
2.6.2	81,02	55,77	50,93	0,572	55,68	50,92	0,573	0,3%
2.6.3	77,04	55,84	51,02	0,542	55,70	51,14	0,545	0,4%
2.6.4	73,95	55,88	51,40	0,520	55,69	51,42	0,523	0,6%
2.6.5	69,27	55,77	51,65	0,489	55,53	51,66	0,492	0,7%
							Média	**0,58%**

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

NOTAS (1) N.A.M. = Nível de Água de Montante;

(2) N.A.J. = Nível de Água de Jusante;

(3) C = $\left(\frac{q}{G_0 \times \sqrt{2 \times 9{,}81 \times H}}\right)$;

C = Coeficiente de Descarga;

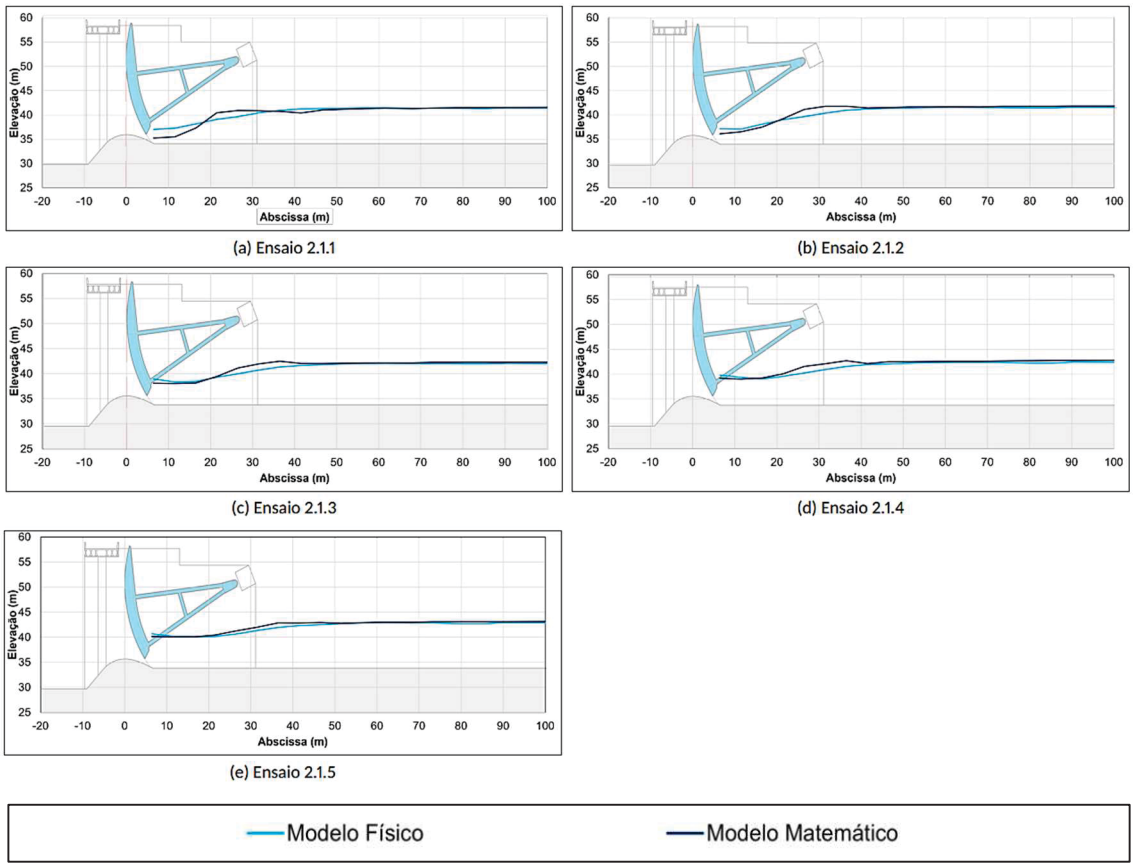
q = Vazão para 1 vão;

G_0 = Abertura da Comporta;

H = Carga Hidráulica.

FIGURA 5.6 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 1 – 1M

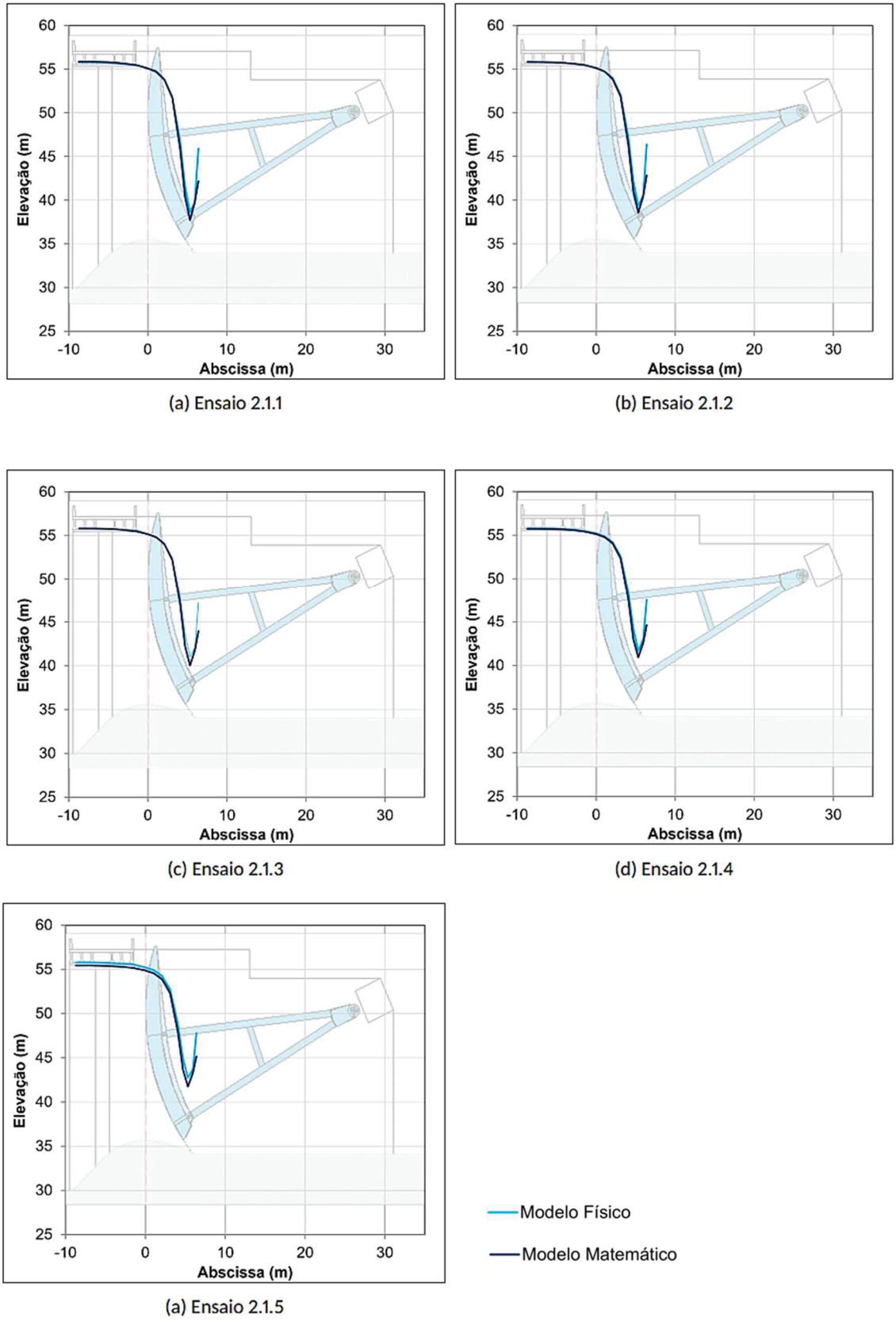
Abertura 1 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

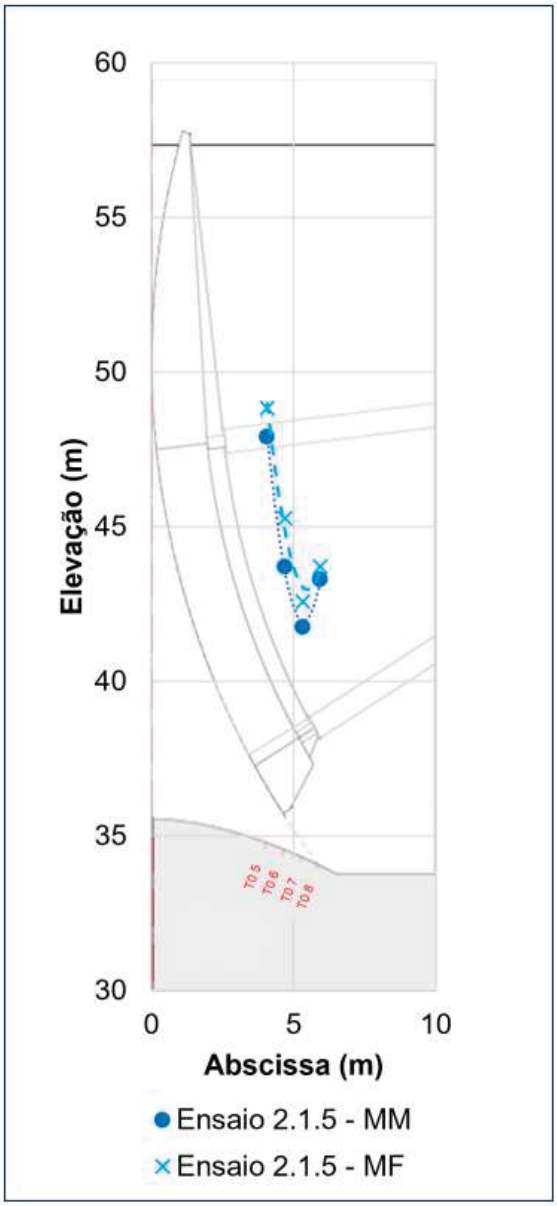
FIGURA 5.7 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS – ALTERNATIVA 1 – 1M

Abertura 1 m – Pressão Média



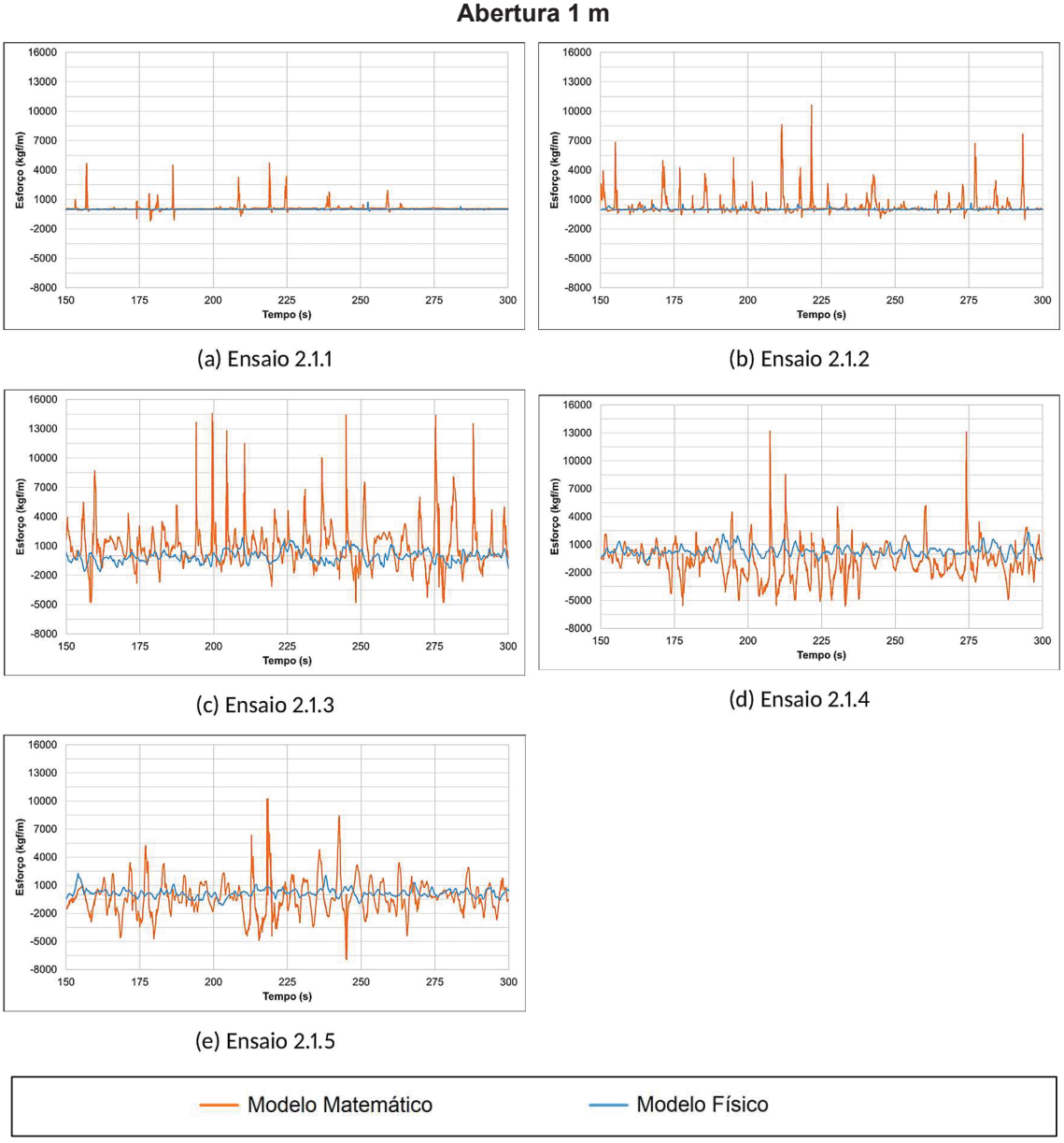
FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.8 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES INSTANTÂNEAS – ALTERNATIVA 1 – 1M



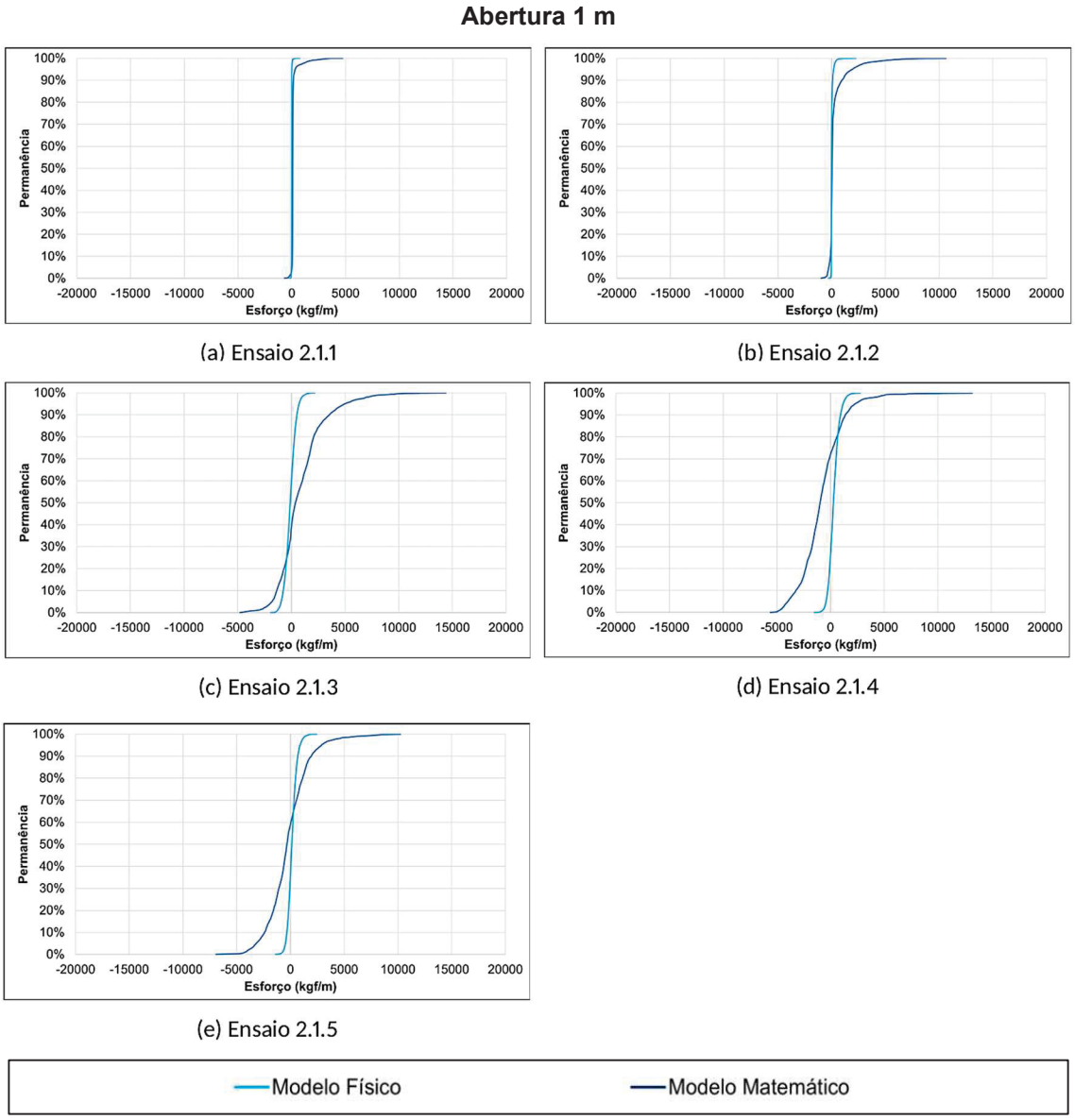
FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.9 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 1 – 1M



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.10 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 1 – 1M



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

5.1.2 Alternativa 2

Por fim, seguindo as mesmas metodologias anteriormente adotadas, as análises comparativas realizadas para a geometria da Alternativa 2 consideraram aberturas da comporta variando de 1,0 m a 8,0 m, para as diferentes condições de afogamento da sua viga inferior, conforme apresentado na TABELA 4.1.

A TABELA 5.3 descreve a comparação dos níveis de água no trecho de montante (reservatório) e de jusante (restituição), além da capacidade de descarga do vertedouro, com a indicação da diferença percentual entre os dois modelos.

A FIGURA 5.11 ilustra o comparativo dos perfis médios de linha de água, a jusante da comporta segmento, para a abertura de 1 m. Os resultados referentes as demais aberturas, encontram-se disponíveis no ANEXO 12. Cabe ressaltar que, devido às limitações do modelo físico, não foram realizadas medições de pressões na soleira do vertedouro. Consequentemente, também não foram realizadas aquisições de pressões nas simulações computacionais, especificamente para essa geometria.

Por fim, os esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior da comporta segmento, no sentido vertical, foram obtidos numericamente para uma estrutura com 1,2 m de largura, enquanto, no modelo físico, foram medidos por meio de cinco células de carga, totalizando 18 m de largura. Para possibilitar a comparação entre os modelos, os resultados são apresentados por unidade de largura (kgf/m), correspondentes ao período estabilizado da simulação (últimos 150 segundos). As FIGURA 5.12 e FIGURA 5.13, a título ilustrativo, apresentam a análise para a abertura de 1 m, incluindo as respectivas curvas de permanência. Os resultados correspondentes às demais aberturas estão disponíveis nos ANEXO 13 e ANEXO 14.

TABELA 5.3 – COMPARATIVO DA CAPACIDADE DE DESCARGA – ALTERNATIVA 2

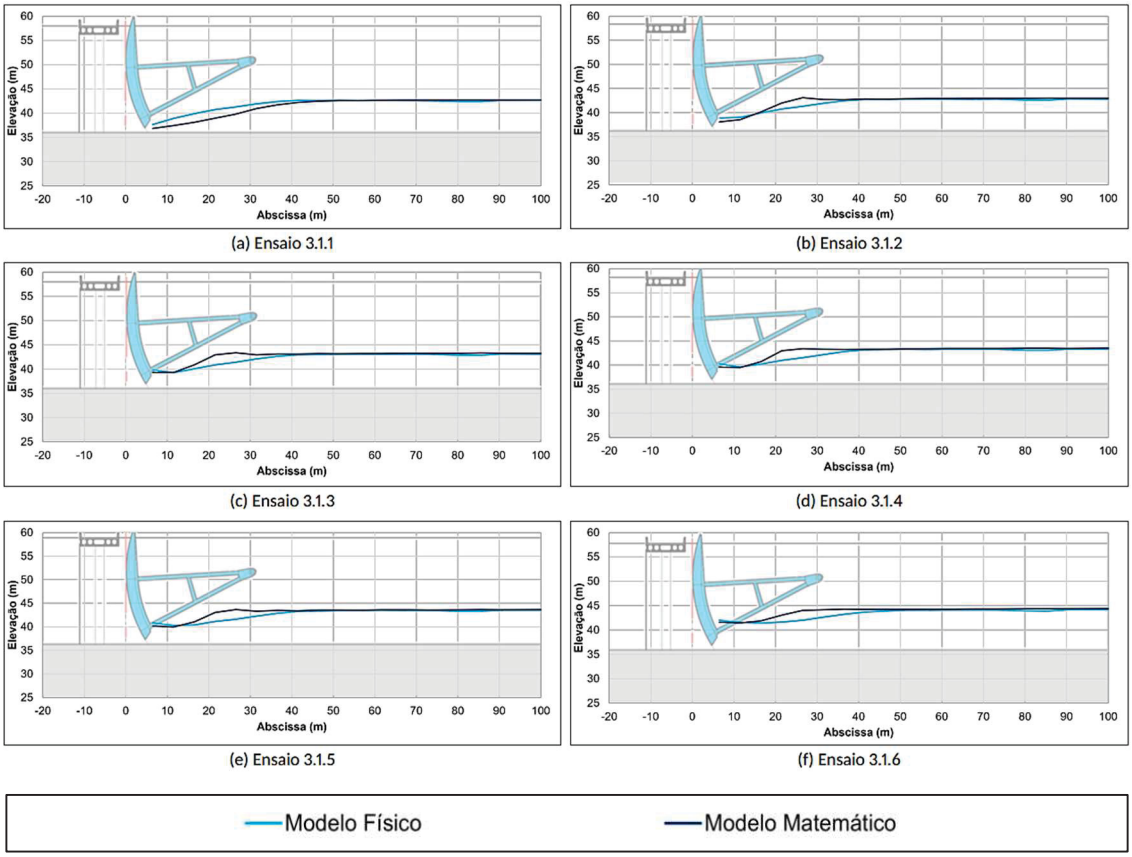
Ensaio	Vazão Específica ($m^3/s/m$)	Modelo Físico			Modelo Computacional			Diferença entre Coeficientes
		N.A.M. (m) (1)	N.A.J. (m) (2)	C ($m^{1/2}/s$)(3)	N.A.M. (m)	N.A.J. (m)	C ($m^{1/2}/s$)	
3.1.1	13,42	55,81	42,78	0,690	55,14	42,79	0,684	0,8%
3.1.2	12,89	55,80	42,99	0,663	55,92	43,05	0,661	0,3%
3.1.3	12,52	55,75	43,29	0,644	55,96	43,32	0,641	0,5%
3.1.4	12,35	55,82	43,50	0,635	56,07	43,53	0,630	0,6%
3.1.5	12,16	55,86	43,70	0,624	55,93	43,75	0,623	0,2%
3.1.6	11,74	55,85	44,39	0,602	56,16	44,43	0,598	0,8%
3.2.1	25,60	55,80	45,12	0,666	55,69	45,15	0,668	0,3%
3.2.2	24,37	55,79	45,34	0,635	55,45	45,28	0,641	0,9%
3.2.3	23,54	55,79	45,54	0,613	55,58	45,56	0,616	0,6%
3.2.4	23,33	55,79	45,65	0,608	55,56	45,64	0,611	0,6%
3.2.5	22,74	55,79	45,89	0,592	55,39	45,83	0,599	1,1%
3.2.6	22,33	55,81	46,19	0,581	55,48	46,10	0,586	0,9%
3.4.1	47,52	55,94	47,68	0,633	55,53	47,72	0,641	1,2%
3.4.2	**46,49**	**55,91**	**47,79**	**0,620**	**55,41**	**47,84**	**0,629**	**1,4%**
3.4.2B	45,24	55,78	47,89	0,606	55,55	47,98	0,609	0,6%
3.4.3	43,36	55,92	48,13	0,578	55,54	48,19	0,584	1,1%
3.4.4	41,87	55,91	48,34	0,558	55,51	48,43	0,565	1,1%
3.4.5	40,05	55,89	48,68	0,534	55,60	48,72	0,539	0,8%
3.4.6	38,55	55,90	49,13	0,514	55,60	49,05	0,519	0,9%
3.5.1	64,92	55,83	49,43	0,595	55,84	49,74	0,595	0,0%
3.5.1B	61,58	55,77	49,70	0,566	55,87	49,81	0,564	0,3%
3.5.2	57,39	55,82	49,97	0,527	55,80	50,10	0,527	0,1%
3.5.3	56,38	55,83	50,08	0,517	55,58	50,06	0,521	0,8%
3.5.4	54,76	55,81	50,31	0,503	55,63	50,23	0,505	0,5%
3.5.5	53,45	55,84	50,46	0,490	55,67	50,46	0,493	0,5%
3.6.1	78,70	55,79	50,42	0,559	55,79	50,44	0,559	0,0%
3.6.1B	74,16	55,78	50,80	0,527	55,84	50,99	0,526	0,2%
3.6.2	71,70	55,82	50,97	0,509	55,57	51,03	0,513	0,8%
3.6.3	68,54	55,79	51,31	0,487	55,91	51,43	0,485	0,4%
3.6.4	65,82	55,78	51,53	0,468	55,87	51,58	0,466	0,3%
3.6.5	61,95	55,81	51,97	0,440	55,86	51,98	0,439	0,2%
							Média	**0,61%**

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

NOTAS: (1) N.A.M. = Nível de Água de Montante;
(2) N.A.J. = Nível de Água de Jusante;
(3) C = $\left(\frac{q}{G_0 \times \sqrt{2 \times 9{,}81 \times H}}\right)$;
C = Coeficiente de Descarga;
q = Vazão para 1 vão;
G_0 = Abertura da Comporta;
H = Carga Hidráulica.

FIGURA 5.11 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 2 – 1M

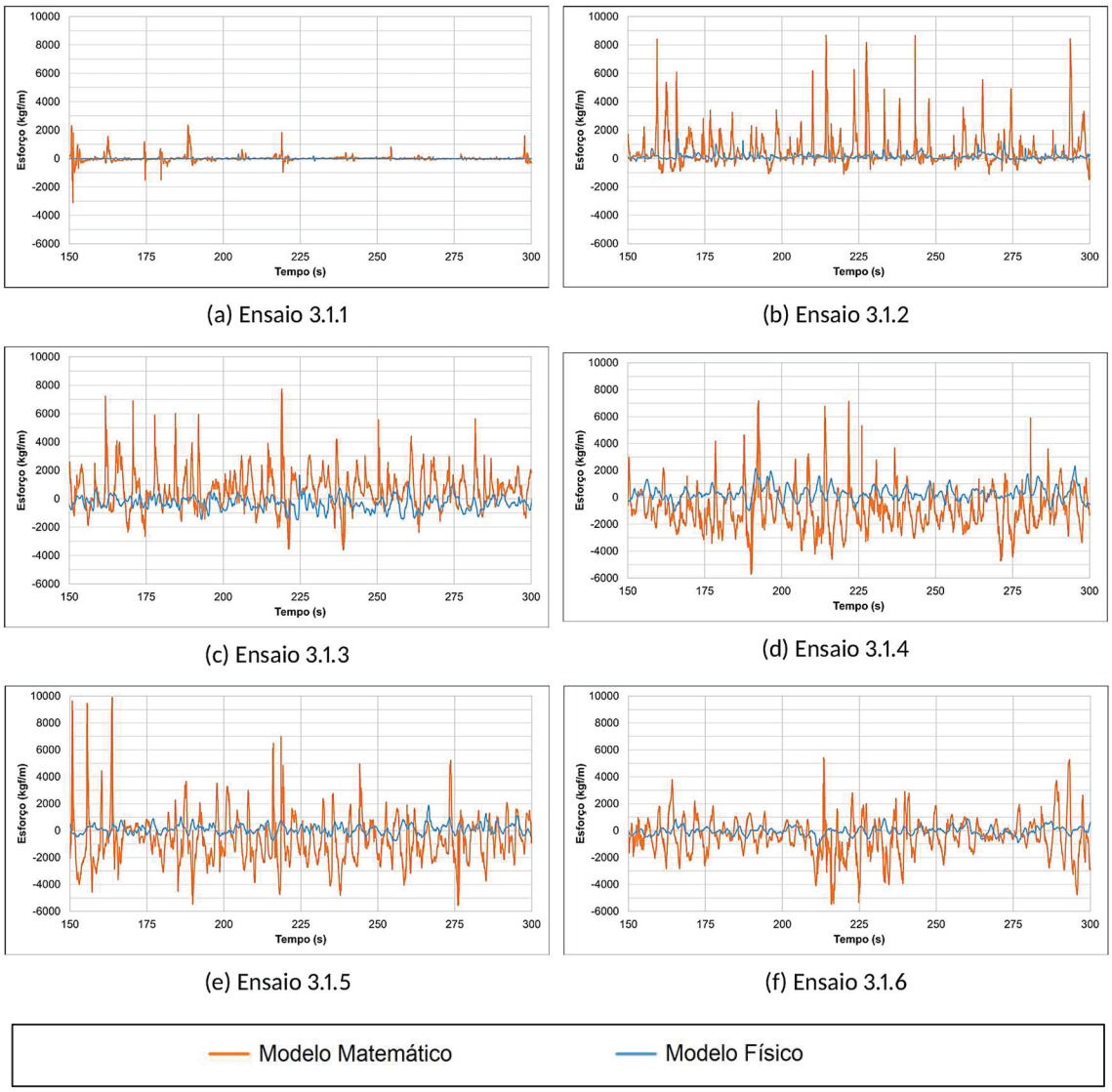
Abertura 1 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.12 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2 – 1M

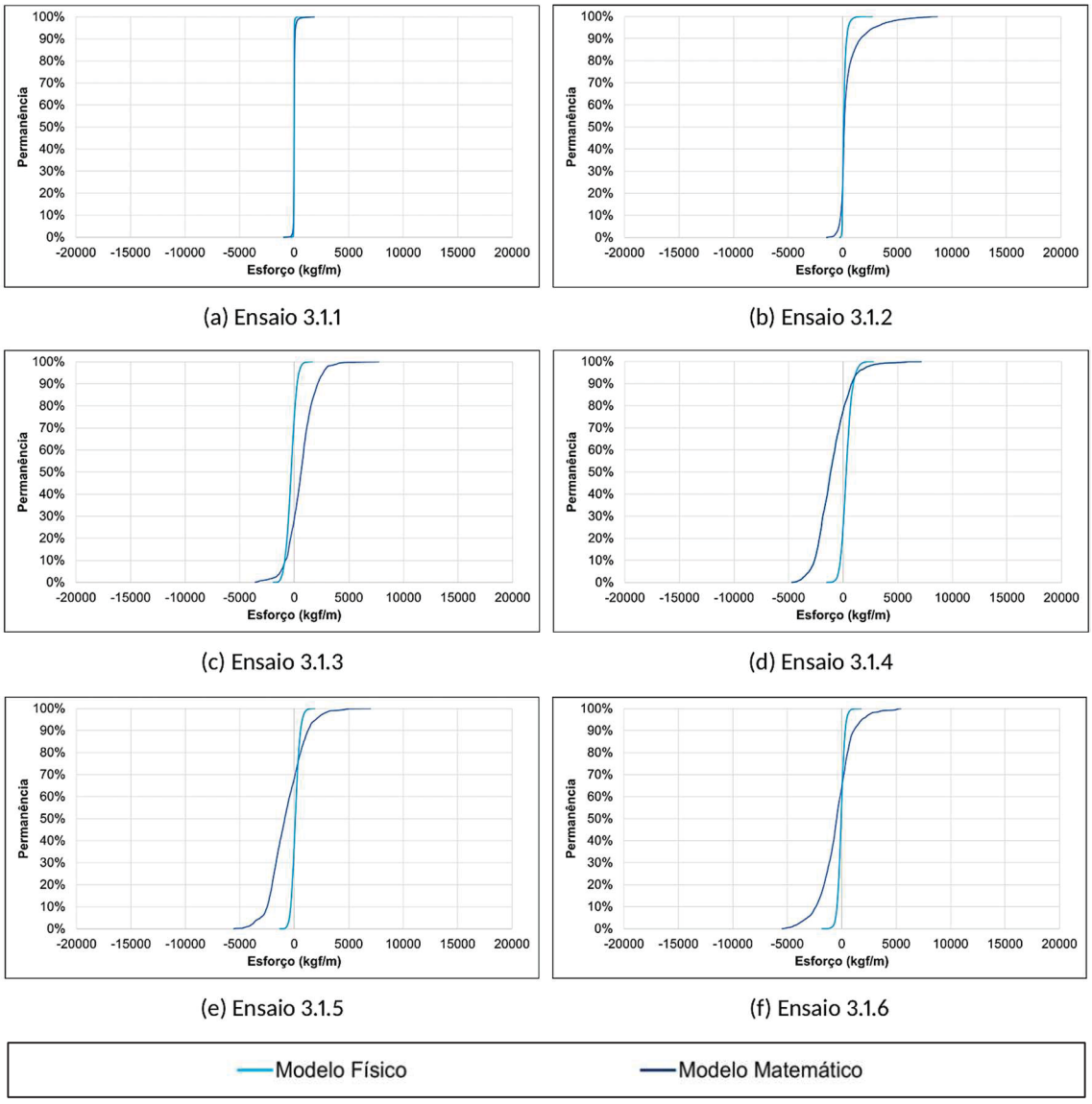
Abertura 1 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.13 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2 – 1M

Abertura 1 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Conforme apresentado nas TABELA 5.1, TABELA 5.2 e TABELA 5.3, as maiores diferenças observadas na capacidade de descarga entre os modelos físico e computacional, foram, respectivamente, de 1,7% (Projeto Piloto - Ensaio 1.2.6), 1,4% (Alternativa 1 - Ensaio 2.5.5) e 1,4% (Alternativa 2 - Ensaio 3.4.2). De modo geral, as diferenças permaneceram inferiores a 2% nas três configurações geométricas analisadas, considerando todas as condições hidráulicas. A diferença média na capacidade de descarga foi de 0,73%, 0,58% e 0,61% para cada alternativa, respectivamente.

A baixa variação dos coeficientes de descarga sob diferentes condições de contorno (aberturas da comporta, níveis de água de jusante e geometrias do vertedouro), evidencia a robustez do modelo computacional utilizado. Essa consistência reforça a confiabilidade da abordagem adotada, validando-a como uma ferramenta eficaz na representação das condições hidráulicas experimentais, especialmente no que se refere aos níveis de água, as vazões e aos coeficientes de descarga.

5.2.1 Análise Comparativa – Níveis de água

As análises comparativas dos perfis médios de linha de água (ANEXO 4, ANEXO 8 e ANEXO 12), correspondentes as geometrias do Projeto Piloto, Alternativa 1 e Alternativa 2, evidenciaram uma crescente similaridade entres os modelos físicos e computacional, à medida que se aumentava a abertura da comporta. As maiores discrepâncias entre os dois modelos foram observadas na região caracterizada por escoamento turbulento, associada à formação do ressalto hidráulico (do ponto x = 20 m até o final da bacia de dissipação), sendo mais acentuadas nas menores aberturas da compota (1,0 m e 2,0 m). Para aberturas intermediárias (3,0 m, 4,0 m e 5,0 m), os perfis médios apresentaram um grau de similaridade igualmente intermediário. No entanto, a jusante da zona de maior instabilidade e variação de pressões, verificou-se uma considerável convergência entre os perfis de linha de água dos dois modelos, os quais se tornam praticamente idênticos após a bacia de dissipação, sobretudo para as aberturas de 6,0 m e 8,0 m.

5.2.2 Análise Comparativa – Pressões

As análises comparativas das pressões médias obtidas nos modelos físico e computacional (ANEXO 5 e ANEXO 9) evidenciaram duas descontinuidades no perfil da linha piezométrica, localizadas, aproximadamente nas posições 7,32 m e 13,90 m na geometria do Projeto Piloto, e 6,39 m na geometria da Alternativa 1, possivelmente decorrentes das variações abrutas na geometria da calha do vertedouro. De modo geral, observou-se uma boa aderência entre os perfis piezométricos obtidos nos dois modelos, com exceção da condição de afogamento A para a geometria do Projeto Piloto (aberturas de 2 m, 3 m e 4 m), onde a linha piezométrica do modelo físico superou a do computacional em cerca de 2 m.c.a.

As pressões instantâneas medidas a jusante da comporta segmento (ANEXO 5 e ANEXO 9) apresentaram comportamentos semelhantes nos modelos físico e computacional, com tendência decrescente das linhas piezométricas no sentido do fluxo. Para as aberturas intermediárias da comporta, de 2 m, 3 m e 4 m (Projeto Piloto), observaram-se diferenças de até 2 m.c.a. no modelo físico em relação ao computacional. Apesar dessas variações pontuais ao longo do trecho analisado, as pressões instantâneas permaneceram dentro da mesma ordem de grandeza em ambos os modelos, indicando uma boa compatibilidade dos resultados.

Por fim, observa-se que, de maneira geral, tanto as pressões médias quanto as instantâneas apresentaram maior concordância entre os modelos na configuração geométrica da Alternativa 1. Para a Alternativa 2, entretanto, conforme detalhado no item 5.1.3, não foi possível realizar a análise das variações de pressão, devido às limitações do modelo físico.

5.2.3 Análise Comparativa – Esforços

As análises comparativas dos esforços hidrodinâmicos por metro de largura (ANEXO 6, ANEXO 10 e ANEXO 13) evidenciaram diferenças significativas entre os modelos físico e computacional. De maneira geral, o modelo computacional apresentou amplitudes de pico consideravelmente superiores às observadas no modelo físico, enquanto os dados experimentais mantiveram-se em uma faixa de variação mais restrita. Apesar dessas diferenças, em termos de magnitude, verificou-

se, em grande parte dos ensaios, uma coerência nas tendências de flutuação ao longo do tempo, o que indica que o modelo computacional foi capaz de reproduzir, de forma satisfatória, a dinâmica geral do escoamento.

As figuras dos ANEXO 7, ANEXO 11 e ANEXO14 apresentam a comparação das curvas de permanência dos esforços hidrodinâmicos obtidos nos modelos físico e computacional. Observa-se que a frequência de ocorrência dos esforços por metro de largura, ascendentes ou *uplift* (de baixo para cima, no sentido positivo do eixo das ordenadas) e descendentes ou *downpull* (de cima para baixo, no sentido negativo do eixo das ordenadas) difere entre os dois modelos. De modo geral, as curvas do modelo físico são mais estreitas, refletindo uma concentração dos valores em uma faixa mais restrita. Em contraste, as curvas do modelo computacional são mais dispersas, indicando maior flutuação e instabilidade nas medições. Apesar dessas diferenças na distribuição, os valores centrais dos esforços mostraram-se compatíveis entre os modelos, na maior parte dos ensaios, sugerindo semelhança nos valores médios dos esforços.

Por fim, com base nas análises comparativas, constata-se que o modelo computacional apresenta maior sensibilidade às oscilações do escoamento turbulento quando comparado ao modelo físico. Uma hipótese possível para explicar essa variabilidade acentuada na resposta está relacionada aos efeitos tridimensionais associados a cada modelo, uma vez que o modelo numérico considera um único vão, com largura de 1,20 m, o que representa uma redução de aproximadamente 93% em relação à largura total do modelo físico em escala de protótipo (18 m). Além disso, diferentemente do modelo físico, o modelo computacional não inclui as subdivisões estruturais principalmente nas vigas horizontais, o que contribui para uma menor rigidez global e, consequentemente, para amplitudes mais elevadas dos esforços simulados. Esse comportamento indica uma resposta mais dinâmica e menos amortecida no modelo computacional, podendo ser atribuído principalmente à sua configuração geométrica simplificada.

5.3 METODOLOGIA COMPUTACIONAL

Este capítulo apresenta a metodologia computacional desenvolvida para estimar os esforços hidrodinâmicos incidentes sobre a viga inferior da comporta segmento, com ênfase nas definições e simplificações adotadas, bem como nas limitações encontradas ao longo do processo.

5.3.1 Representação Geométrica das Estruturas

A representação geométrica das estruturas foi desenvolvida com base em premissas que buscaram conciliar a complexidade dos modelos com a viabilidade computacional. Nesse contexto, adotaram-se simplificações geométricas compatíveis com os objetivos do estudo e adequadas às limitações dos recursos computacionais disponíveis.

5.3.2 Vertedouro

Inicialmente, foram realizados testes com simulações bidimensionais e tridimensionais, as quais evidenciaram que a abordagem tridimensional oferece uma representação mais precisa das condições hidrodinâmicas. No entanto, verificou-se que o aumento da largura do domínio no modelo tridimensional, resulta em um tempo de processamento significativamente maior do que o requerido para a fatia tridimensional, tornando-se inviável dentro dos prazos do estudo.

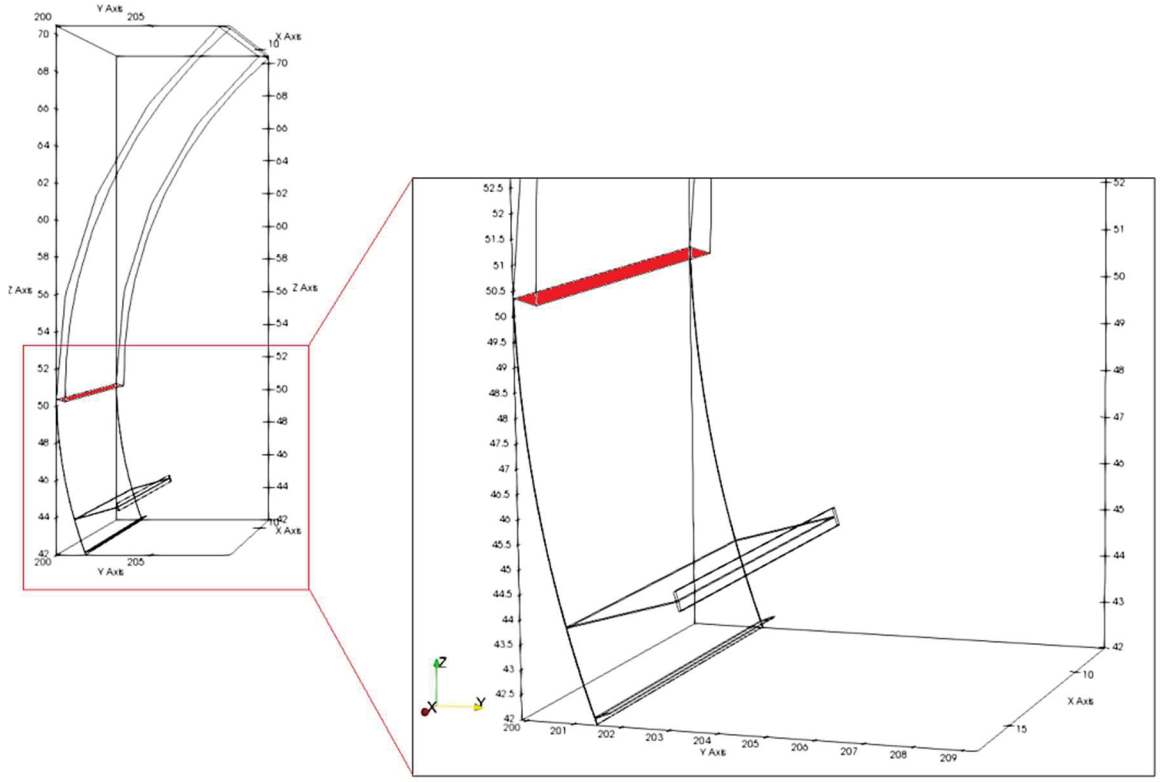
Diante desses aspectos e visando otimizar o tempo computacional necessário, adotou-se uma abordagem tridimensional, através de uma fatia seccional de 1,2 m de espessura, discretizada com 6 elementos de 0,2 m na largura, ao longo de um comprimento longitudinal total de 864 m. Embora formalmente possa ser classificada como pseudo-tridimensional, essa abordagem se assemelha à modelagem bidimensional, diferenciando-se pelo número de elementos utilizados na direção ortogonal ao sentido principal do fluxo.

5.3.3 Comporta

Na abordagem de fatia tridimensional, a representação das espessuras das chapas da comporta exigiu ajustes manuais na malha, com o objetivo de simplificar sua geração, especialmente nas regiões mais complexas, como o paramento da comporta.

Na região superior da comporta, onde não há incidência direta do fluxo, a geometria foi simplificada com a adoção de uma espessura uniforme de 0,50 m (FIGURA 5.14). Essa medida contribuiu para a redução do custo computacional, sem comprometer a representação das regiões com maior relevância hidrodinâmica. Já na região da viga inferior da comporta, principal região de interesse dos estudos hidrodinâmicos, foram mantidas as dimensões de projeto, conforme ilustrado nas FIGURA 5.15, FIGURA 5.16 e FIGURA 5.17.

FIGURA 5.14 – SIMPLIFICAÇÃO ADOTADA NA COMPORTA SEGMENTO

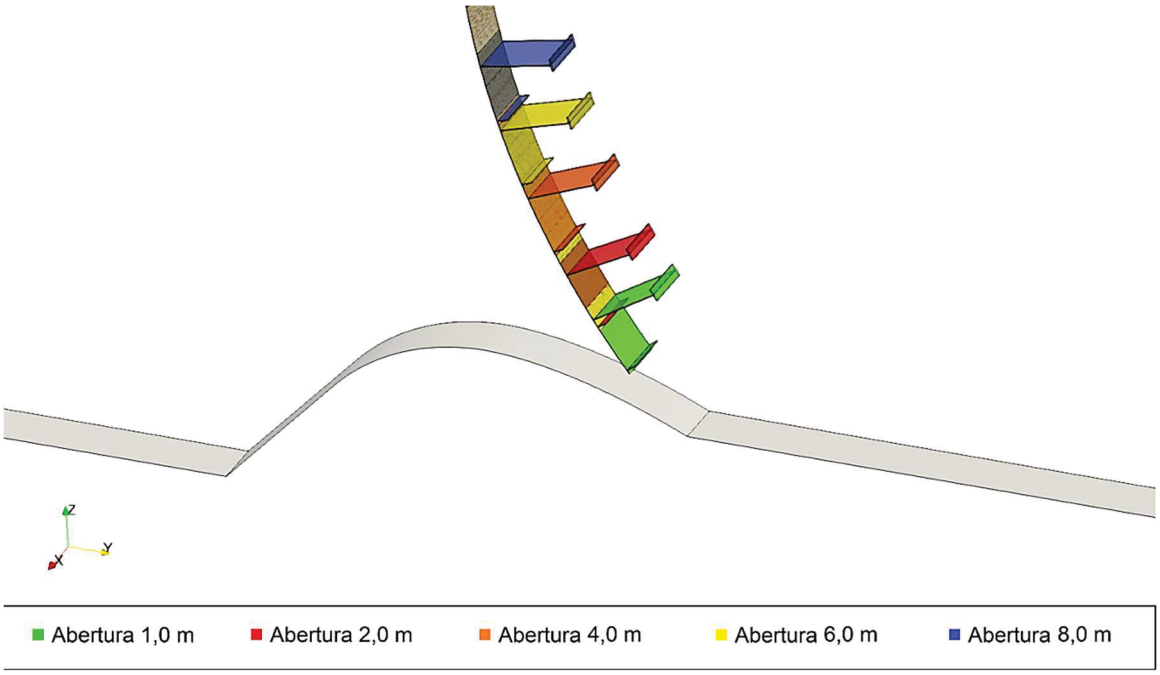


FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.15 – ABERTURAS DA COMPORTA SEGMENTO – PROJETO PILOTO

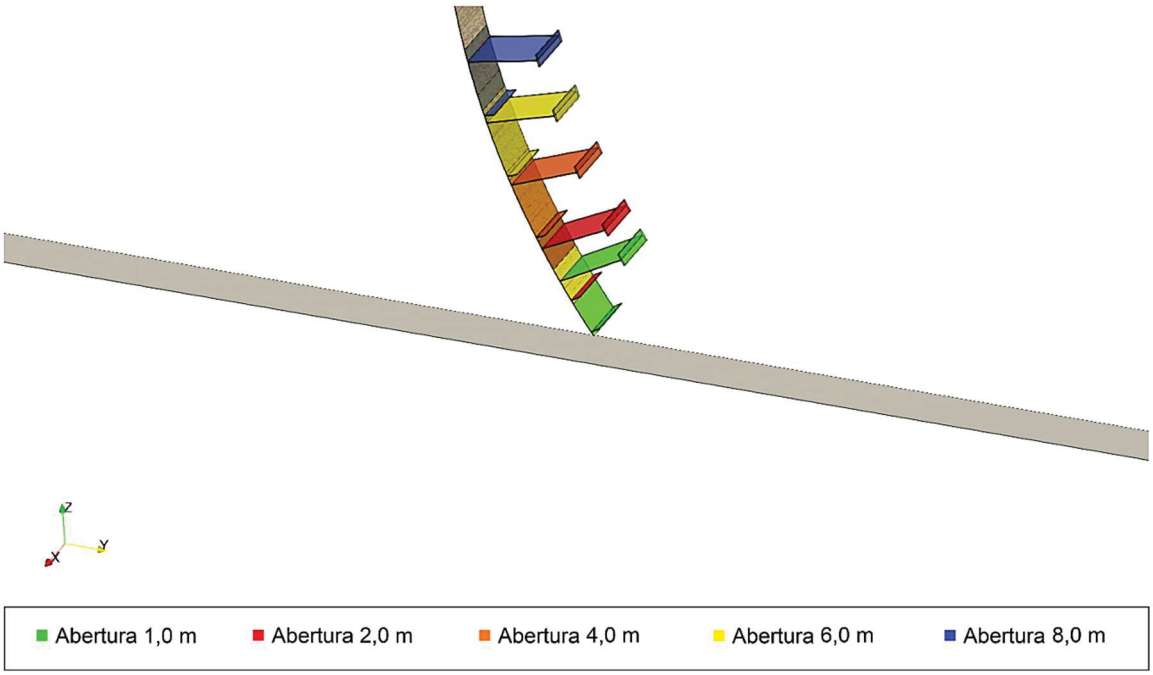
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.16 – ABERTURAS DA COMPORTA SEGMENTO – ALTERNATIVA 1



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.17 – ABERTURAS DA COMPORTA SEGMENTO – ALTERNATIVA 2

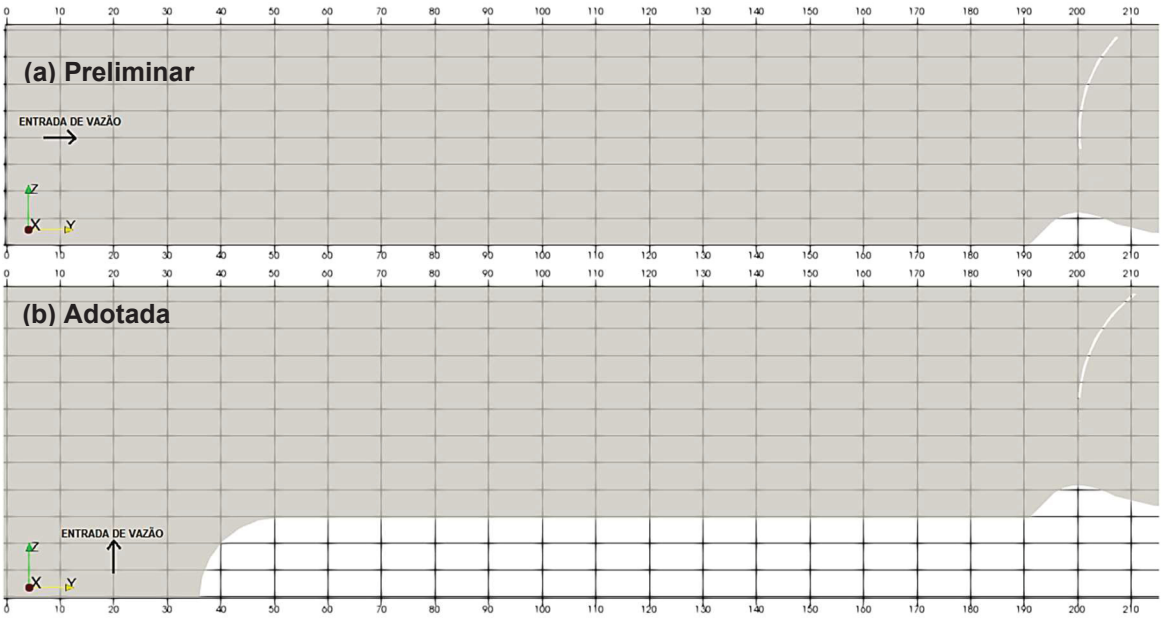


FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

5.3.3.1 Alimentação

Inicialmente, a alimentação do modelo computacional foi configurada de forma frontal, sem a inclusão de uma seção de tranquilização do fluxo (FIGURA 5.18 – (a)). Porém, essa abordagem resultou na incorporação de ar no escoamento e na consequente perda de vazão do domínio numérico. Como alternativa para mitigar esses efeitos indesejados, adotou-se uma alimentação pela parte inferior do modelo, com a inserção de uma seção de tranquilização, semelhante ao procedimento adotado no modelo físico. Essa modificação contribuiu de maneira significativa para a redução das oscilações nos níveis de água e para a prevenção da entrada de ar no modelo, conforme ilustrado na FIGURA 5.18 – (b).

FIGURA 5.18 – TIPOS DE ALIMENTAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

5.3.3.2 *Baffles*

Com o objetivo de atenuar as oscilações nos níveis d'água na região de aproximação do fluxo, foram implementadas estruturas de suavização do escoamento, denominadas *baffles*, conforme descrito previamente no item 4.2.1.2. Essas estruturas foram representadas no modelo computacional como superfícies sem espessura.

5.3.4 Definição da Malha Computacional

O nível de detalhamento da malha computacional influencia diretamente na qualidade dos resultados obtidos. No entanto, é importante ressaltar que quanto maior o grau de discretização utilizado, maior será o custo computacional necessário para realizar o processamento da simulação. Diante dessa limitação, a estratégia de refinamento adotada concentrou-se nas regiões de maior interesse, especialmente nas proximidades da comporta segmento, com ênfase viga inferior da comporta.

Com base nesse critério, todas as simulações utilizaram malhas gerais com elementos cúbicos de 0,80 m, associadas a blocos e cilindros de refinamento, resultando em células com dimensões da ordem de 2,5 cm na região da viga inferior

da comporta. Essa abordagem possibilitou uma representação geométrica mais precisa da estrutura na área de interesse, mantendo, ao mesmo tempo, uma demanda computacional compatível com os objetivos do estudo.

5.3.5 Modelo de Turbulência

Durante o desenvolvimento deste estudo, foram realizados testes de sensibilidade com diversos modelos de turbulência, conforme descrito na Seção 4.2.1.3. Entre as abordagens avaliadas, os modelos híbridos de turbulência *Detached Eddy Simulation* (DES), SpalartAllmarasDES e o kOmegaSSTDES, apresentaram resultados muito semelhantes entre si.

Como estratégia para conciliar a precisão do modelo LES com a viabilidade computacional necessária, optou-se pela utilização do modelo k-ω SST-DES (kOmegaSSTDES) nas simulações finais.

Cabe ressaltar que não foram realizados testes de sensibilidade entre os modelos de turbulência do tipo LES e a simulação direta DNS (Direct Numerical Simulation), em razão do elevado grau de discretização exigido por esta última e da consequente demanda computacional extremamente alta.

5.3.6 Condições Iniciais, Passo de tempo e Período de simulação

Para assegurar a estabilidade das simulações computacionais, foram monitorados os erros residuais da simulação, mantidos consistentemente abaixo de 10^{-3}, além disso, verificou-se a conservação da massa, por meio da equivalência entre as vazões média de entrada e de saída do domínio.

Com base nesses critérios, o tempo total de simulação foi definido em 300 segundos, dividido em duas etapas. Na primeira fase (de 0 s a 150 s), adotou-se um número de Courant igual a 2, com um passo de tempo de 0,0030 s, visando acelerar o processo de enchimento e estabilização do domínio computacional. Na segunda fase (de 150 s a 300 s), o número de Courant foi reduzido para 0,5, com um passo de tempo de 0,0015 s, para garantir maior estabilidade numérica e precisão dos resultados. Essa metodologia mostrou-se eficaz e foi aplicada de forma consistente em todas as geometrias e aberturas de comportas analisadas.

5.3.7 Quantificação dos Esforços Hidrodinâmicos

A determinação dos esforços hidrodinâmicos atuantes na viga inferior da comporta segmento foi realizada por meio da função forces, disponível no software OpenFOAM®. Essa ferramenta permite o registro das variações dos esforços nas faces superior e inferior da viga (ver FIGURA 4.38), ao longo do tempo e em suas três componentes direcionais (x, y, z). A força resultante total foi obtida, a partir da soma vetorial das componentes registradas em cada face.

Para viabilizar a comparação com os resultados do modelo físico, os esforços totais foram normalizados pela largura de 1,2 m do modelo computacional. Essa abordagem permitiu a correlação direta com os esforços medidos pelas células de carga instaladas na região central da viga no modelo físico, cujas medições foram também normalizadas pela largura aproximada de 4 m (em escala de protótipo) da célula de carga central.

Adicionalmente, os dados de esforços hidrodinâmicos foram submetidos a um processo de filtragem, no qual 0,10% dos valores extremos foram removidos, em conformidade com a metodologia adotada no pós-processamento dos dados experimentais.

5.3.8 Validação dos Resultados

A validação dos resultados obtidos por meio da modelagem computacional constituiu uma etapa fundamental em todas as análises realizadas. Esse processo envolveu o pós-processamento e a adequação dos dados numéricos, de forma a torná-los comparáveis aos dados experimentais, obtidos no modelo físico. O principal objetivo dessa compatibilização foi avaliar a confiabilidade das estimativas do modelo computacional, verificando sua capacidade de reproduzir os fenômenos hidrodinâmicos observados em escala reduzida.

5.3.9 Correção dos Esforços Hidrodinâmicos

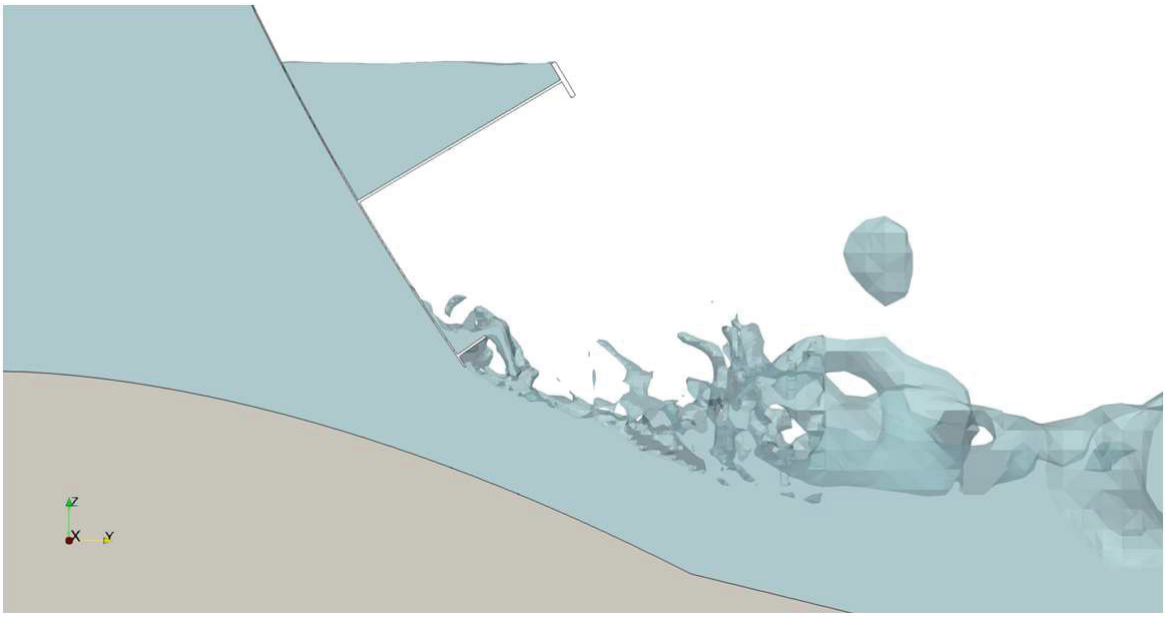
No modelo hidráulico reduzido, a viga horizontal inferior da comporta segmento foi projetada com divisões longitudinais, delimitadas pelas vigas verticais da própria estrutura. Essa configuração resultou em cinco seções independentes,

cada uma instrumentada individualmente para a medição dos esforços hidrodinâmicos. Como consequência, a viga, nesse modelo em escala, não estava rigidamente fixada à estrutura principal da comporta, o que gerou pequenas frestas nos limites de cada placa instrumentada. Essa particularidade permitiu que, durante a incidência das ondas do ressalto hidráulico sobre a estrutura, a água acumulada na face superior da viga escoasse lateralmente por essas aberturas, dependendo dos níveis de água a jusante.

Por outro lado, na modelagem computacional, a viga foi representada como um elemento contínuo, rigidamente conectado à estrutura da comporta. Nessa configuração, a água que atinge a face superior da viga em função do ressalto hidráulico permanece retida, conforme ilustrado na FIGURA 5.19.

Diante dessas diferenças construtivas e de modelagem, identificou-se a necessidade de aplicar uma correção nos esforços hidrodinâmicos obtidos pelo modelo computacional. Essa correção é especialmente relevante para cenários hidráulicos em que o escoamento atinge a viga inferior de forma intermitente ou frequente, isto é, quando a viga não está completamente afogada. Para isso, foi desconsiderado o peso da coluna d'água que, de forma artificial, se acumulou sobre a viga inferior no modelo computacional.

FIGURA 5.19 – EXEMPLO DE ÁGUA ACUMULADA NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA SEGMENTO



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

Após a obtenção dos esforços resultantes em cada face, conforme descrito no item 4.4.1, nos ensaios em que a viga não é permanentemente afogada, foi subtraído o peso da lâmina d'água incidente sobre a face superior da estrutura. Em seguida, as componentes de força das duas faces foram somadas para se determinar os esforços hidrodinâmicos totais. Por fim, realizaram-se os procedimentos de comparação entre os resultados obtidos nos modelos físico e computacional.

5.3.10 Limitações e Incertezas

Durante o processo de obtenção e análise dos esforços hidrodinâmicos por meio das simulações numéricas, foram identificadas limitações metodológicas e fontes de incerteza, destacando-se, entre as principais:

5.3.10.1 Esforço Computacional

As análises numéricas com fatia tridimensional foram realizadas em três estações de trabalho (Workstations) com sistema operacional Linux Ubuntu, equipadas com 24, 12 e 10 núcleos de processamento, respectivamente. Para uma mesma simulação, correspondente a um tempo típico de 300 segundos, os tempos de processamento em cada uma das máquinas foram de aproximadamente 3, 6 e 12 dias.

Visto isso, conclui-se que a implementação de um modelo puramente tridimensional, que represente os 18 m de largura de um vão do vertedouro, é computacionalmente inviável. Essa limitação deve-se ao aumento expressivo no número de elementos de malha exigido por essa configuração, agravado pela quantidade de cenários simulados (92 condições hidráulicas). Por fim, conclui-se que o esforço computacional constitui um fator limitante relevante na modelagem numérica.

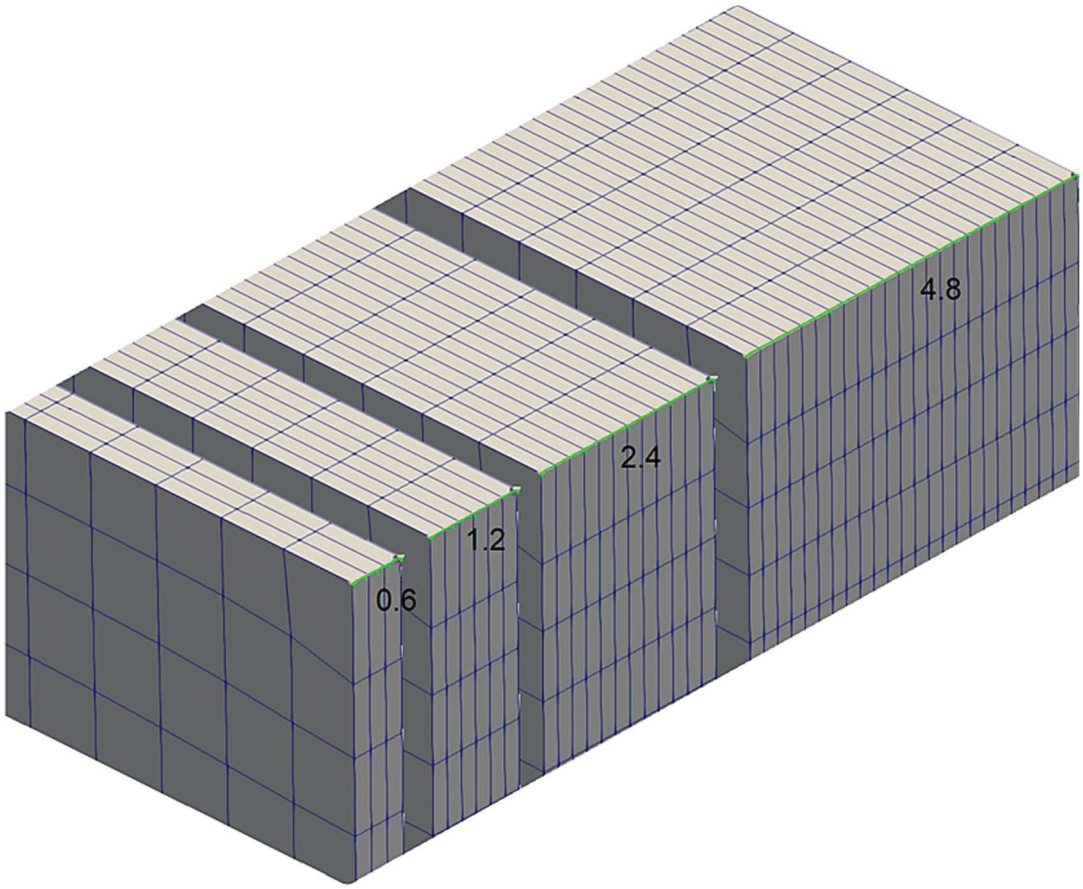
5.3.10.2 Quantidade de Elementos na Largura

A geometria adotada nas simulações computacionais corresponde a uma fatia seccional de 1,2 m de largura, composta por 6 elementos, com dimensão de 0,2 m na

direção transversal. Os esforços hidrodinâmicos obtidos nesse modelo de fatia apresentaram, de forma consistente, valores superiores aos medidos nos ensaios em modelo físico, independentemente da abertura da comporta ou do grau de afogamento da viga inferior, conforme detalhado na Seção 5.2.

Diante dessas diferenças, foi conduzida uma investigação adicional, com o objetivo de identificar suas possíveis causas, além de se avaliar a influência da largura do domínio sobre os resultados. Para isso, realizaram-se simulações complementares, considerando domínios com larguras de 0,6 m (3 elementos na direção transversal), 1,2 m (6 elementos), 2,4 m (12 elementos) e 4,8 m (24 elementos), conforme ilustrado na FIGURA 5.20.

FIGURA 5.20 – DOMINIO COMPUTACIONAL COM DIFERENTES LARGURAS



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

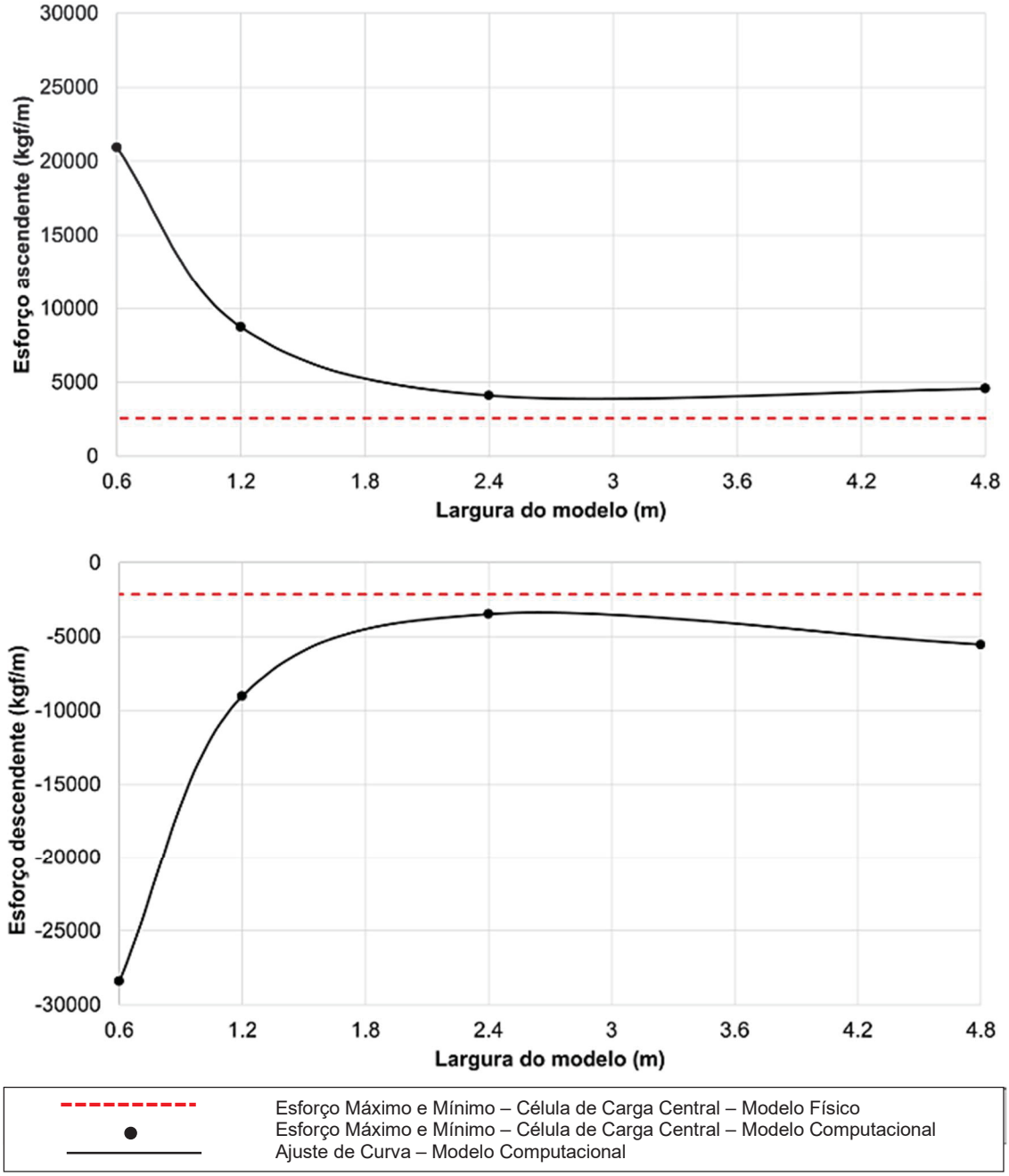
A partir das simulações realizadas, constatou-se que a redução na discretização ao longo da largura do modelo intensifica o comportamento anisotrópico e aleatório do escoamento (FIGURA 5.21 e FIGURA 5.22). Esse fenômeno resulta em

uma maior variabilidade nas pressões incidentes sobre a viga inferior, confirmando a hipótese de que a quantidade de elementos na largura do modelo influencia diretamente na magnitude dos esforços hidrodinâmicos.

Esse aspecto é particularmente relevante, considerando que os demais parâmetros médios, como a vazão, os níveis de água, o perfil da linha d'água, a distribuição de pressões na soleira e a capacidade de descarga, foram reproduzidos de forma satisfatória pelo modelo computacional.

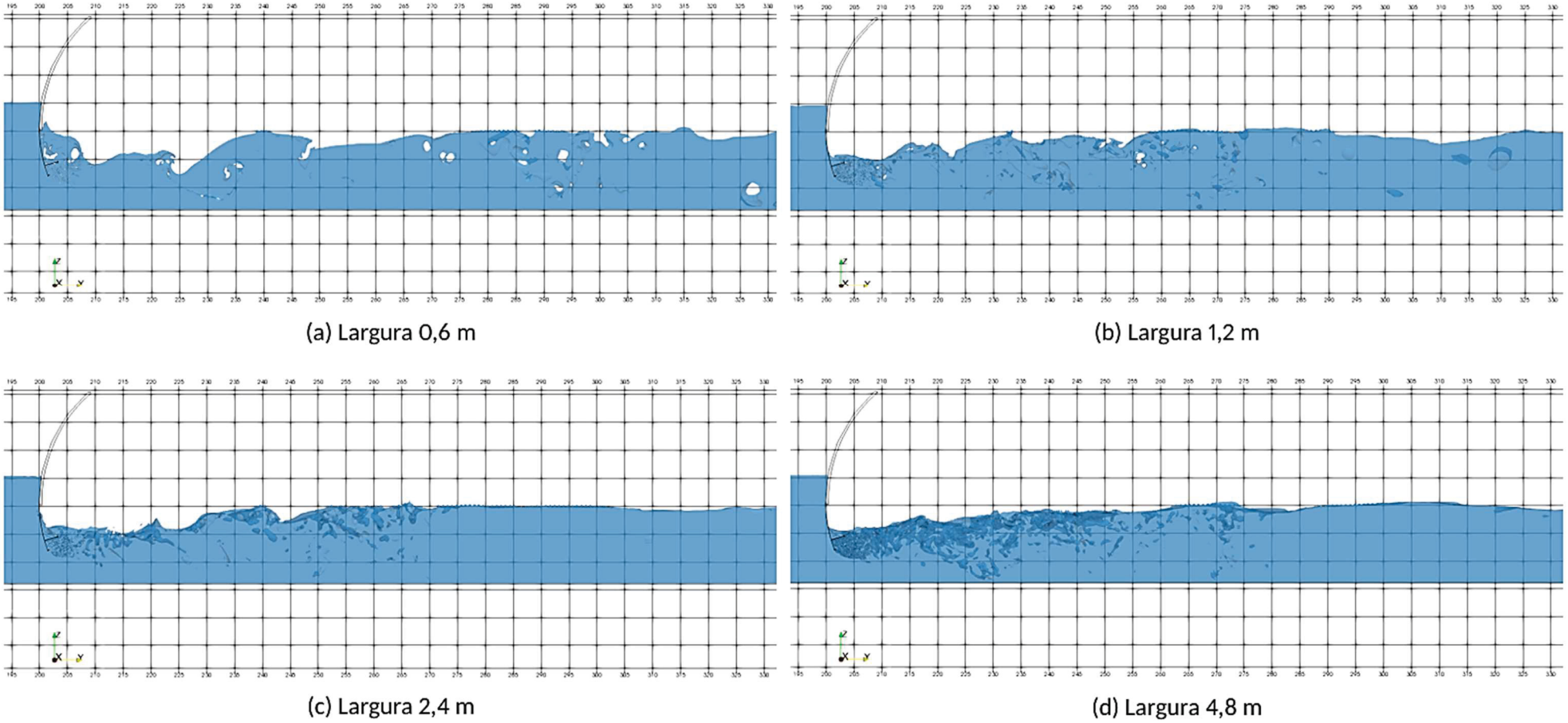
Entretanto, é importante destacar que essa conclusão se refere, especificamente, ao ensaio 3.5.5 (Alternativa 2). Embora as simulações com larguras maiores tenham apresentado picos de esforço hidrodinâmico menos intensos, em comparação ao modelo com 1,2 m, os valores ainda superaram os obtidos no modelo físico. Isso indica que, apesar da influência da largura do domínio, ela pode não ser a única responsável pelas diferenças observadas entre os modelos.

FIGURA 5.21 – VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS (ASCENDENTES E DESCENDENTES) EM FUNÇÃO DA LARGURA DO MODELO



FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 5.22 – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA LARGURA DO MODELO



(a) Largura 0,6 m

(b) Largura 1,2 m

(c) Largura 2,4 m

(d) Largura 4,8 m

FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

5.3.10.3 Arquivo *interfaceHeight* na versão 9

Durante a execução das simulações na versão 9 do OpenFOAM®, foi identificada uma importante inconsistência na gravação dos resultados. Observou-se que, dependendo da quantidade de núcleos de processamento utilizados na decomposição do domínio, os valores de níveis d'água registrados no arquivo *interfaceHeight* apresentavam-se sistematicamente mais elevados em comparação aos visualizados na ferramenta de pós-processamento *ParaView*. Essa discrepância ocorreu de maneira consistente no mesmo equipamento e em todas as simulações de uma mesma abertura, especialmente nas interfaces entre elementos de malha adjacentes.

Para contornar as limitações encontradas, foram adotadas duas abordagens. A primeira consistiu em realizar uma média temporal dos últimos 100 segundos de simulação no *ParaView*, possibilitando a extração manual dos níveis d'água nos pontos de medição. A segunda solução foi a atualização do OpenFOAM® para a versão 10, que corrigiu a inconsistência na gravação dos dados.

A metodologia computacional desenvolvida para a estimativa de esforços hidrodinâmicos incidentes na viga inferior de comportas segmento sujeitas a ondas de ressalto hidráulico, embora apresente limitações e incertezas inerentes à modelagem computacional, configura-se como uma ferramenta relevante. Seu potencial é significativamente ampliado quando utilizada em conjunto com a modelagem física, combinando as vantagens de ambas as abordagens.

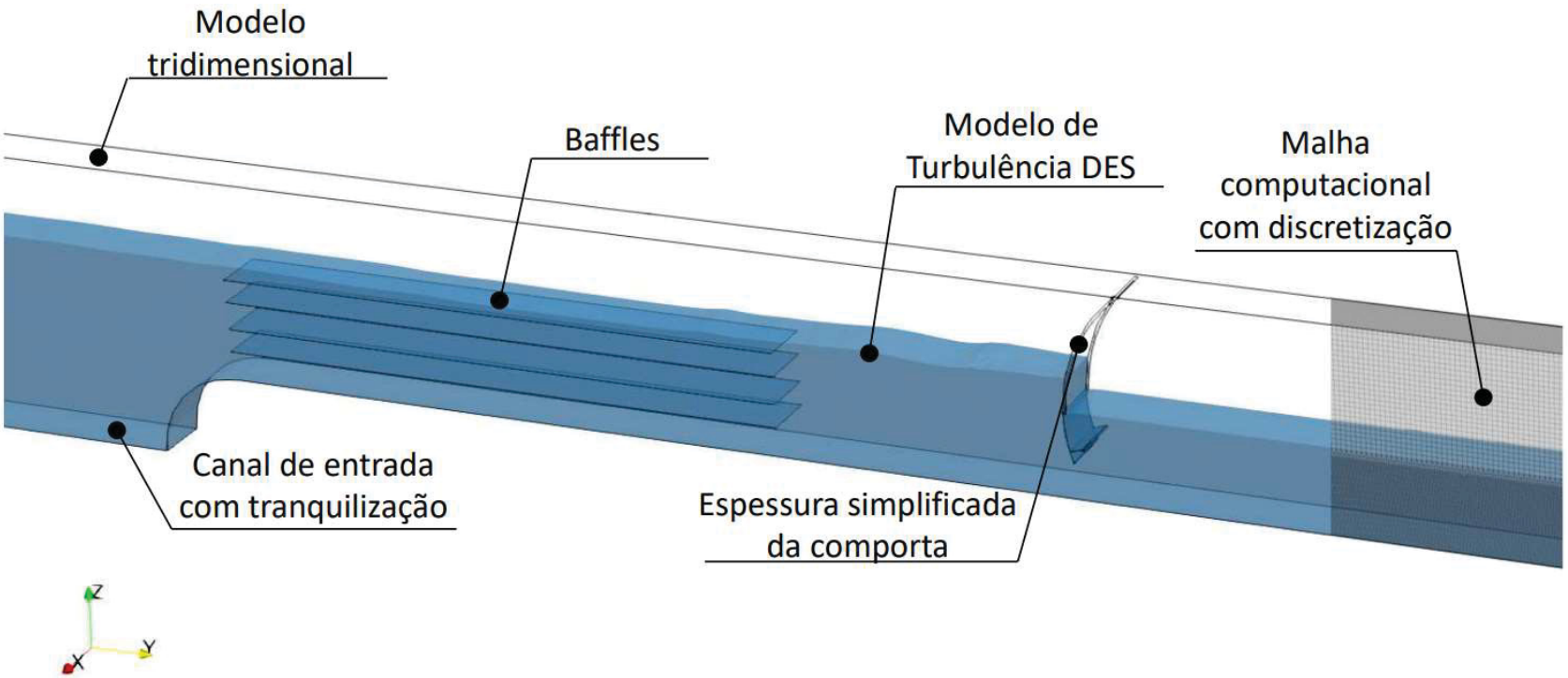
A FIGURA 5.23 apresenta, de forma esquemática, os principais componentes da metodologia computacional desenvolvida, entre os quais se destacam:

- Adoção de uma fatia tridimensional de 1,2 m de largura, como simplificação do modelo tridimensional;
- Emprego de malha computacional com refinamentos localizados nas regiões de maior interesse hidrodinâmico;
- Aplicação de modelo de turbulência híbrido do tipo DES;
- Simplificação da espessura da comporta apenas na região superior, sem impacto hidrodinâmico relevante;
- Inserção de estruturas sem espessura, conhecidas como *baffles*, para atenuação das oscilações no nível de água do reservatório;

- Utilização de canal com trecho de tranquilização para regular a entrada de vazão no domínio computacional.

Destaca-se que, a metodologia computacional desenvolvida nesta dissertação não tem como objetivo substituir a modelagem física, mas atuar como uma ferramenta complementar a ela. Sua principal contribuição está na viabilização de estudos paramétricos amplos, análises de sensibilidade e avaliação de variações geométricas e operacionais, além da investigação de fenômenos complexos que seriam inviáveis ou excessivamente custosos de explorar apenas por meio experimental. A integração entre as abordagens física e computacional, por meio da comparação e validação dos resultados, é essencial para aumentar a confiabilidade das análises e proporcionar uma compreensão mais abrangente do comportamento hidráulico.

FIGURA 5.23 – METODOLOGIA COMPUTACIONAL



FONTE: A Autora (2024).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise comparativa da capacidade de descarga entre os modelos físico e computacional apresentou discrepâncias máximas inferiores a 2% em todas as configurações geométricas avaliadas. Nesse contexto, os resultados evidenciam que a modelagem computacional reproduz com eficiência a capacidade de descarga do vertedouro.

As maiores discrepâncias entre os perfis de linha de água foram, sistematicamente, observadas na região do vertedouro e ao longo da bacia de dissipação, onde ocorrem fenômenos hidráulicos de alta complexidade, como a aceleração do escoamento, a formação do jato, o desenvolvimento da turbulência e do ressalto hidráulico. No entanto, no trecho final da estrutura, observou-se uma tendência de convergência entre os perfis dos modelos físico e computacional, com os níveis de água simulados se aproximando substancialmente dos medidos experimentalmente, especialmente a jusante da região de maior turbulência e dissipação de energia.

Os perfis de pressão média e instantânea obtidos nos modelos físico e computacional apresentam boa concordância entre si, especialmente nas regiões de escoamento mais estável. As discrepâncias mais relevantes foram identificadas nas áreas de maior aceleração e intensidade turbulenta, o que é coerente com a complexidade desses fenômenos hidrodinâmicos, cuja representação numérica com alta precisão ainda apresenta desafios significativos na modelagem computacional.

A análise comparativa das variações dos esforços hidrodinâmicos por metro de largura (kgf/m), entre os dois modelos, revelou que, embora os valores médios sejam, em geral, compatíveis, o modelo computacional indica amplitudes significativamente superiores as obtidas no modelo físico, de forma generalizada para todas as condições hidráulicas estudadas. Conclui-se, portanto, que o modelo computacional tende a superestimar os esforços hidrodinâmicos máximos e a apresentar maior variabilidade nos resultados, ao passo que o modelo físico fornece valores mais suavizados e com menor dispersão. Uma hipótese plausível para explicar esse comportamento está nas diferenças intrínsecas entre as representações física e computacional, especialmente no que se refere à área efetiva de aplicação dos esforços hidrodinâmicos. No modelo computacional, os esforços são calculados sobre uma fatia tridimensional relativamente estreita da estrutura (1,2 m de largura),

o que reduz sua capacidade de amortecer as flutuações locais do escoamento turbulento. Por outro lado, no modelo físico, a extensão total da viga inferior da comporta (equivalente a 18 m na escala do protótipo) favorece a dissipação dessas oscilações, resultando em medições mais estáveis e com menor variabilidade.

A curva de permanência do modelo computacional apresenta maior variabilidade e extremos mais pronunciados, proveniente dos efeitos turbulentos e fenômenos transientes. Já a curva do modelo físico se mostrou uma distribuição mais uniforme e limitada dos esforços.

Após apresentadas as limitações e incertezas na obtenção e utilização dos esforços hidrodinâmicos obtidos numericamente, algumas considerações e recomendações são apresentadas a seguir, de modo a auxiliar na decisão da utilização da metodologia computacional:

- O modelo computacional adotado, baseado no modelo de turbulência híbrido k-ω SST-DES (KOmegaSSTDES), demonstrou boa capacidade na estimativa dos níveis médios de água a jusante, nas proximidades da comporta, permitindo uma adequada definição dos graus de afogamento da viga inferior. Além disso, a abordagem mostrou-se eficaz na identificação dos impactos hidrodinâmicos, na quantificação da vazão escoada e na avaliação dos esforços hidrodinâmicos, mesmo que de forma limitada;
- O modelo de turbulência do tipo RANS não é adequado para obter esforços hidrodinâmicos em fenômenos transitórios. Neste estudo, o modelo híbrido DES foi eficaz na reprodução das flutuações de pressão, permitindo avaliar com mais precisão os esforços atuantes na viga inferior da comporta;
- A escolha do software na modelagem computacional deve considerar as características do projeto. Para os estudos específicos da presente dissertação, o OpenFOAM® se mostrou mais eficiente do que o FLOW-3D, especialmente na geração de malhas de geometrias complexas, como as espessuras esbeltas da comporta segmento. Sua flexibilidade, sobretudo no uso de malhas não estruturadas, o tornou mais adequado para essa análise, embora tenha apresentado desafios na discretização da geometria;
- Uma vez escolhido o software OpenFOAM®, recomenda-se utilizá-lo em sua versão mais recente, pois versões anteriores apresentaram problemas que são geralmente resolvidos nas atualizações;

- Embora o modelo de turbulência do tipo DES tenha se mostrado capaz de reproduzir os fenômenos turbulentos incidentes sobre a comporta, a elevada demanda computacional resultou na limitação do domínio simulado a uma fatia tridimensional de 1,2 m, em vez dos 18 m correspondentes à largura total da comporta real. A comparação com os dados experimentais revelou que os esforços hidrodinâmicos obtidos numericamente foram superestimados, aproximadamente 10 vezes maiores, o que indica que a simplificação do domínio comprometeu a representatividade dos resultados. Para estudos voltados a comportas segmento afogadas, é recomendável simular a largura total ou, ao menos, a maior extensão possível, considerando que a capacidade computacional disponível pode restringir o número de análises viáveis;
- Ao adotar uma largura de 1,2 m (em vez de 18 m) para o domínio computacional, os resultados numéricos superaram os experimentais, resultando em magnitude de esforços hidrodinâmicos superiores. Essa largura foi usada para todas as condições ensaiadas, mas o teste 3.5.5 da Alternativa 2 foi escolhido para análise mais detalhada. Foram feitas simulações variando a largura (4,8 m, 2,4 m, 1,2 m e 0,6 m), mas devido à limitação computacional, não foi possível simular larguras de 9,6 m ou 18 m, o que poderia fornecer mais dados. As análises indicaram que a largura do modelo impacta diretamente os esforços hidrodinâmicos, com esforços menores à medida que a largura aumenta (FIGURA 5.21), aproximando-se dos resultados experimentais. Embora tenham sido realizadas simulações das 92 condições de escoamento, a variação da largura foi considerada apenas para uma condição, limitando as conclusões sobre o impacto da largura no fenômeno. Mais análises são necessárias para permitir a generalização dos resultados;
- A modelagem computacional do vertedouro exigiu simplificações, como a alimentação de água realizada pela parte inferior do canal e a inclusão de *baffles* para estabilizar o escoamento. Essas medidas reduziram as variações nos níveis de água e a entrada de ar. Também foi necessário simplificar os elementos estruturais mais complexos da comporta, com o objetivo de viabilizar e otimizar a geração da malha computacional;
- Embora a modelagem com fatia tridimensional de 1,2 m não tenha reproduzido com precisão os esforços hidrodinâmicos, o modelo computacional se mostrou eficaz na simulação da capacidade de descarga, dos níveis de água e dos

perfis de linha de água e de pressões na soleira. Os resultados indicam que o modelo computacional desenvolvido é adequado para a obtenção de pressões médias e, embora apresente algumas limitações, também pode ser utilizado para estimativas dos esforços hidrodinâmicos;

- As simulações computacionais foram realizadas em Workstations com 24 núcleos físicos, que, embora adequadas aos objetivos deste estudo, mostraram-se limitadas para modelagens com larguras maiores do domínio. Para estudos futuros envolvendo comportas do tipo segmento afogadas por jusante, recomenda-se a adoção de abordagens similares, com a possibilidade de utilização de larguras de modelo maiores quando o número de simulações for reduzido ou maior capacidade computacional disponível. Considerando a contínua evolução da capacidade de processamento, é plausível que análises mais exigentes se tornem viáveis, embora esse tipo de estudo continue a demandar infraestrutura robusta, como máquinas com múltiplos núcleos (clusters) ou soluções de processamento em nuvem;
- As simulações hidrodinâmicas com o OpenFOAM®, confirmaram a capacidade de descarga dos vertedouros, com divergências inferiores a 2% em relação ao modelo físico, e boa correspondência nos perfis de linha d'água e pressões na soleira.

Por fim, os resultados apresentados demonstraram que a metodologia computacional desenvolvida é capaz de representar adequadamente os principais fenômenos hidráulicos, reproduzindo com boa precisão as condições de escoamento observadas experimentalmente. Essa capacidade confere ao modelo um nível de confiabilidade que o torna adequado para estudos paramétricos, análises de sensibilidade e futuras otimizações. A convergência entre os perfis simulados e experimentais reforça sua eficácia na representação da tendência geral do escoamento, evidenciando seu potencial como uma ferramenta complementar valiosa em análises hidráulicas.

Deve-se destacar que, embora a análise estrutural da viga inferior não esteja contemplada no escopo desta dissertação, os resultados obtidos por análises dinâmica e estática máximas, indicaram que o efeito das ondas de ressalto de jusante não é condicionante para o dimensionamento da viga inferior, pois, em todas as condições analisadas, as tensões máximas permaneceram abaixo do limite de

escoamento do material, ou seja, dentro da capacidade resistente da peça. Contudo, é fundamental ressaltar que o impacto das ondas do ressalto hidráulico induz a um aumento significativo nos esforços e deslocamentos transmitidos ao servomotor. Dessa forma, um estudo futuro que avalie de forma mais detalhada os efeitos hidrodinâmicos sobre o servomotor e suas conexões seria essencial para uma análise mais precisa. Além disso, o impacto das ondas afeta diretamente a preponderância de fechamento da comporta, um fator crucial para a segurança e a eficiência operacional da estrutura.

REFERÊNCIAS

ANDERSSON, Bengt; ANDERSSON, Ronnie; HÅKANSSON, Love; MORTENSEN, Mikael; SUDIYO, Rahman; VAN WACHEM, Berend. **Computational Fluid Dynamics for Engineers**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012. p. 212.

ANDRADE, F.O. **Erha7026_mecflu_ambiental_II**. Slides: Introdução escoamento tubulento, estatisticas escoamento turbulento, escalas escoamento turbulento, modelagem RANS, Modelagem LES. 2023. (Notas de Aula de Mecânica dos Fluidos Ambiental II da UFPR). Disponivel em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/fandrade/teaching/th705_mecflu_ambiental_ii. Acesso em: 23 fev. 2024.

ARAUJO FILHO, M. F.; OTA, J. J. Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Brazilian Journal of Water Resources**, v. 21, n. 2, p. 360–376, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7259**: Comportas Hidráulicas - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

BANDY, N. **Horseshoe Dam**. 2022. Disponível em: https://www.google.com/maps/contrib/106821233604918522992/photos/@33.9836499,-111.7087556,3a,75y,90t/data=!3m7!1e2!3m5!1sAF1QipNqRT9qmoI-7j7ON4RLJYmUQJPK3XByt89NTqco!2e10!6shttps:%2F%2Flh5.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipNqRT9qmoI-7j7ON4RLJYmUQJPK3XByt89NTqco%3Dw365-h273-k-no!7i4000!8i3000!4m3!8m2!3m1!1e1?entry=ttu. Acesso em: 20 mar. 2024.

BÉLANGER, M. J.-B. **Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes**. Paris: Libraire Chez Carilian Goeury, 1828.

BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**. 2. ed. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1973. 816 p.

CANNONE, M.; FRIEDLANDER, S. Navier: Blow-up and Collapse. **Notices of the American Mathematical Society**, v. 50, n. 1, p. 7-9, 2023.

CHANSON, H. Development of the Bélanger Equation and Backwater equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 3, p. 159-163, mar. 2009.

CHOW, V. T. **Open-chanel Hydraulics**. New York: Kogakusha Company, 1959.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 1: Revisão Bibliográfica. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2020a. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Fernanda Hiromi Scheffer Yamakawa; Marcelo Luiz Noriller; Danusa Haick Tavares; José Rodolfo Machado de Almeida, Marcos Libert Westphalen, Renato Grube.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 2: Definição do Projeto Piloto. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2020b. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Fernanda Hiromi Scheffer Yamakawa, Marcos Libert Westphalen, Renato Grube.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 3: Desenvolvimento dos Modelos Físico e Computacional. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2022. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Fernanda Hiromi Scheffer Yamakawa; Marcelo Luiz Noriller; Danusa Haick Tavares; José Rodolfo Machado de Almeida, Marcos Libert Westphalen, Renato Grube.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 4: Estudos em Modelo Físico. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2023a. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Carlos Olavo Slota Ovelar; Iversom dos Santos Castro.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 5: Estudos em Modelo Computacional. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2023b. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Jennifer Pereira da Cruz; Renato Grube.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 6: Processamento e Análise dos Resultados. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2023c. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Carlos Olavo Slota Ovelar; Iversom dos Santos Castro; Danusa Haick Tavares; Jennifer Pereira da Cruz; Marcos Libert Westphalen; Renato Grube.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 7: Critério Empírico e Metodologia Computacional. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2023d. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Carlos Olavo Slota Ovelar; Iversom dos Santos Castro; Danusa Haick Tavares; Jennifer Pereira da Cruz; Marcos Libert Westphalen; Renato Grube.

COPEL. **Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico** – Relatório da Etapa 8: Conclusão. Curitiba: COPEL Geração e Transmissão, 2023e. (PD-06491-0445/2017). Documento Restrito. Autores: Carlos Olavo Slota Ovelar; Marcelo Yudi Minoda Takenobu; Danusa Haick Tavares; Jennifer Pereira da Cruz; Marcos Libert Westphalen; Renato Grube.

CRUZ, J. P.; GRUBE, R.; CASTRO, I. S.; VALENTIM, L. R.; TAKEDA, R. S.O. Hydrodynamic Forces on the Inferior Beam of a Radial Gates. In: IAH WORLD CONGRESS, 40., 2023, Vienna, Austria. **Anais [...]** Vienna, 2023.

CRUZ, J. P.; GRUBE, R.; TAVARES, D. H.; WESTPHALEN, M. L.; TAKEDA, R. S.O. Avaliação Numérica de Esforços Hidrodinâmicos em Comportas Segmento Afogadas. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 30., 2022, Foz do Iguaçu. **Anais [...].** Foz do Iguaçu, 2022.

DAILY, J. W.; HARLEMAN, D. R. F. **Fluid Dynamics**. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1966.

DAMIÁN, S. M. **Description and utilization of interFoam multiphase solver**, 2004.

DANIEL, R.; PAULUS, T. **Lock gates and other closures in hydraulic projects**. Woburn, United States: Elsevier - Health Sciences Division, 2019. p. 993.

DAVIDSON P. A. **Turbulence**: An introduction for scentists and enginerrs. New York: Oxford University, 2004.

DETTMER, Paulo Henrique Cabral. **Estudo da Capacidade de Descarga de Vertedouros de Baixa Queda com Elevado Grau de Submergência**, 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ENGYS. **A Comprehensive Tour of snappyHexMesh**. In: 7th OpenFOAM® Workshop. 2012. Disponível em: http://www.engys.eu. Acesso em: 13 mar. 2024.

ERBISTE, P. C. F. **Comportas Hidráulicas**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 1987.

ERBISTE, Paulo C. F. **Comportas hidráulicas.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

HINZE, J. O. Turbulence: **An Introduction to Its Mechanism and Theory**. New York: McGraw-Hill Bool Company, Inc., 1959.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dinamics of free boudaries. **Journal of Computacional Physics**, v. 39, n.1 , p. 201-225.

HOLZMANN, T. **Mathematics, numerics, derivations and Openfoam®**, 2017.

JOHNSON, R. W. **Handbook of Fluid Dynamics**. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2016.

KUNDU, P. K.; COHEN, I. M. **Fluid Mechanics**. 2. ed. San Diego: Academic Press, Inc, 1990.

LEWIN, J.; TELFORD, T. **Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets**. London: Thomas Telford Limited, 2001.

MCDONOUGH J. M. **Introductory lectures on turbulence**: physics, mathematics and modeling. Kentucky: University of Kentuck, 2007.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. **The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics**. Cham: Springer International Publishing, 2016. (Fluid Mechanics and Its Applications).

MUNSON B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluídos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

NARDY, C. F.; PEDRAZZI, J. A.; MAIA, M. **Spillway – Downstream Hydraulic Effects in Radial Gates**. [S.l.: s.n.], 2014.

NAUDASCHER, E.; KOBUS, H.; RAO, R. P. Hydrodynamic Analysis for High-Head Leaf Gates. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 90, n. 3, p. 155–192, 1964.

NORTE ENERGIA**. Tour Virtual – Rota Eletromecânica**. 2023. Disponível em: https://conhecabelomonte.com.br/eletromecanica. Acesso em: 20 mar. 2024.

NOVAK, P.; MOFFAT, I.; NALLURI, C.; NARAYANAN, R. **Hydraulic Structures**. 4. ed. London: Taylor & Francis Group, 2007.

OPENFOAM FOUNDATION. **OpenFOAM v12 User Guide**. 2024. Disponível em: https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v12/index. Acesso em: 20 abr. 2025.

OPENCFD Ltd. OpenFOAM® v2112 User Guide. Dezembro de 2021. Disponível em: https://www.openfoam.com/documentation/guides/v2112/doc/. Acesso em: 01 abril 2025.PANTON, R.L. Incompressible flow. 4 ed. New Jersey: Jonh Wiley & Sons, 2013.

PAPANASTASIOU, T. C. FEORGIOU, G. C.; ALESANDROU. **Viscous Fluid Flow**. London: CRC Press, 2000.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. United States of America: Taylor & Francis Group, 1980.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. 8. ed. Denver: United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1984.

POPE, Stephen B. **Turbulent flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: RiMa Artes e Textos, 2006.

POVH, Paulo Henrique; ARAUJO FILHO, Marcus Fernandes; VANZ, André Luiz. Simulação Numérica do Vertedouro da UHE Santo Antônio. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 29., 2013. **Anais [...]**. [S.l.: s.n.], 2013.

REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 174, p. 935–982, 1883.

REYNOLDS, O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 186, p. 123–164, 1895.

RICHARDSON, L. F. **Weather prediction by numeral process**. Cambridge: University Press, 1922.

SAGAUT, P.; DECK, S.; TERRACOL, M. **Multiscale and Multiresolution Approaches in Tubulence**. [S.l.]: Imperial College Press, 2006. p. 356.

SANTO ANTÔNIO ENERGIA. **Vertedouro Complementar**. 2023. Disponível em: https://www.facebook.com/photo.php?fbid=540565528258906&set=pb.100069163905088.-2207520000&type=3. Acesso em: 20 mar. 2024.

SHUR, M.; SPALART, P. R.; STRELETS, M.; TRAVIN, A. Detached-eddy simulation of an airfoil at high angle of attack. In: **ENGINEERING TURBULENCE MODELLING AND EXPERIMENTS**. v. 4. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1999. p. 669–678.SPALART *et al*. (2006).

SPALART, P. R.; DECK, S.; SHUR, M. L.; SQUIRES, K. D.; STRELETS, M. Kh.; TRAVIN, A. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. **Theoretical and Computational Fluid Dynamics**, v. 20, p. 181–195, mar. 2006.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge: The MIT Press, 1972.

DA VINCI, Leonardo. **Illustration of the swirling flow of turbulence**. 1500 (aprox.). Desenho. The Royal Collection © 2004, Her Majesty Queen Elizabeth II.

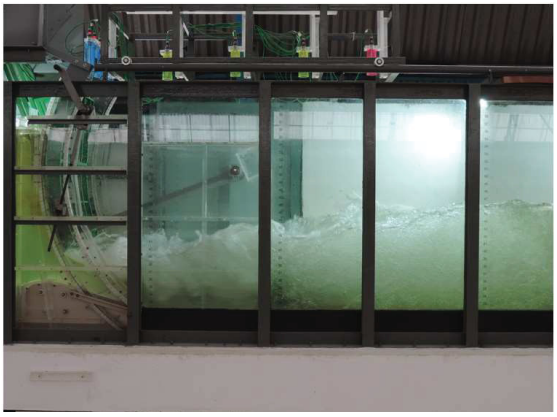
TRACTEBEL ENGIE. **Usina Hidrelétrica Jirau**. Disponível em: https://tractebel-engie.com.br/pt/referencias/usina-hidreletrica-jirau. Acesso em: 20 março. 2024.

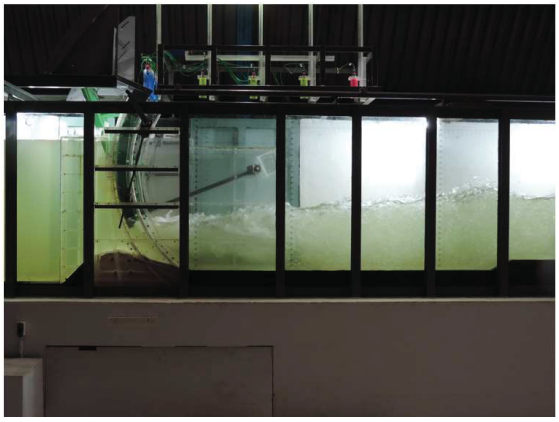
VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**: The Finite Volume Method. Essex: Longman Scientific & Technical, 1995.

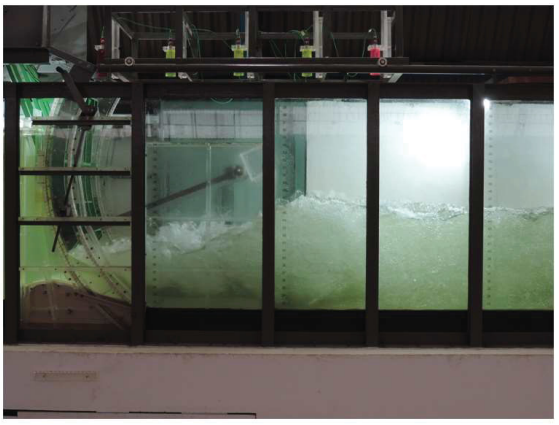
WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. 2. ed. California: DCW Industries, 1998.

WILCOX, David C. **Turbulence Modelling for CFD**. 3. ed. California: DCW Industries, Inc., 2006. 536 p.

ANEXO 1 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO – ABERTURA 4 M – PROJETO PILOTO

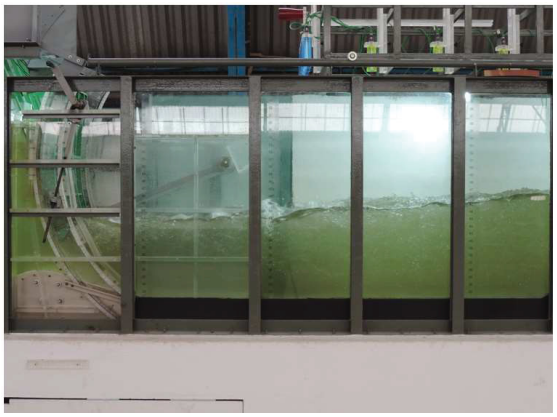


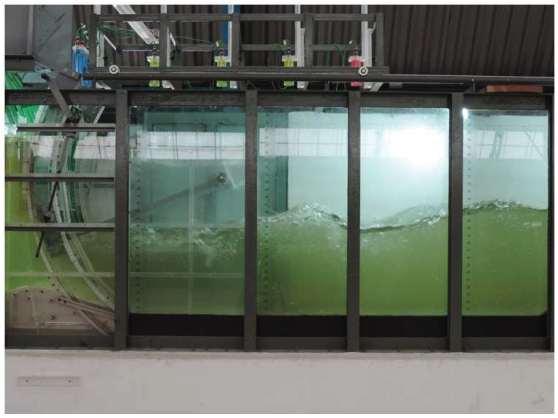


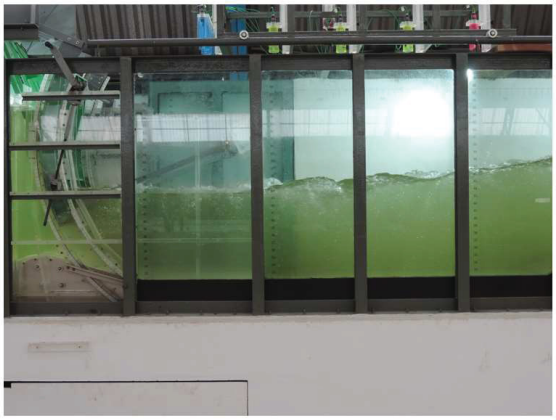


(a) Vista frontal

(b) Vista lateral



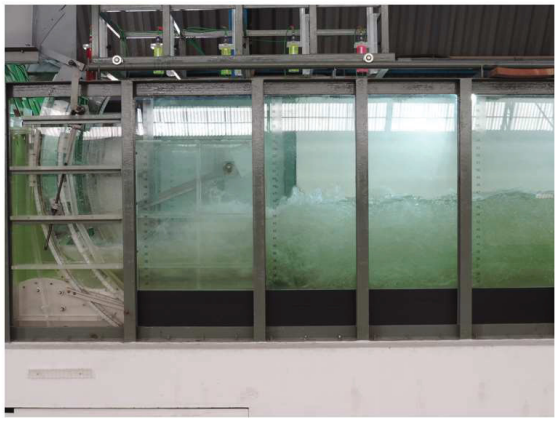


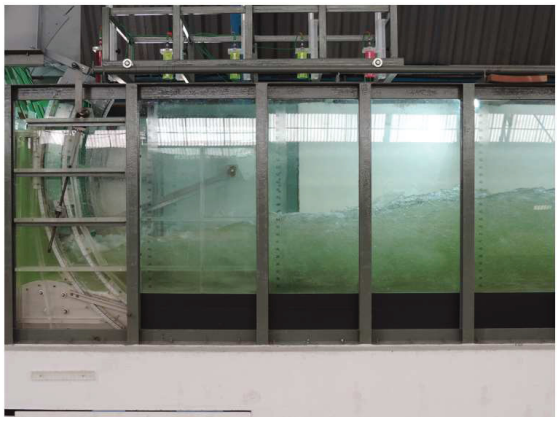


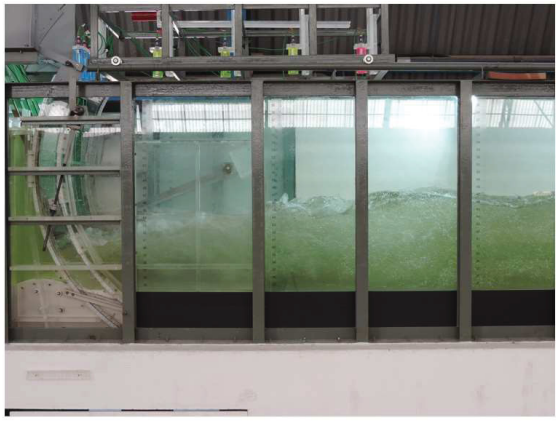
(a) Vista frontal (b) Vista lateral

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

ANEXO 2 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO – ABERTURA 4 M – ALTERNATIVA 1

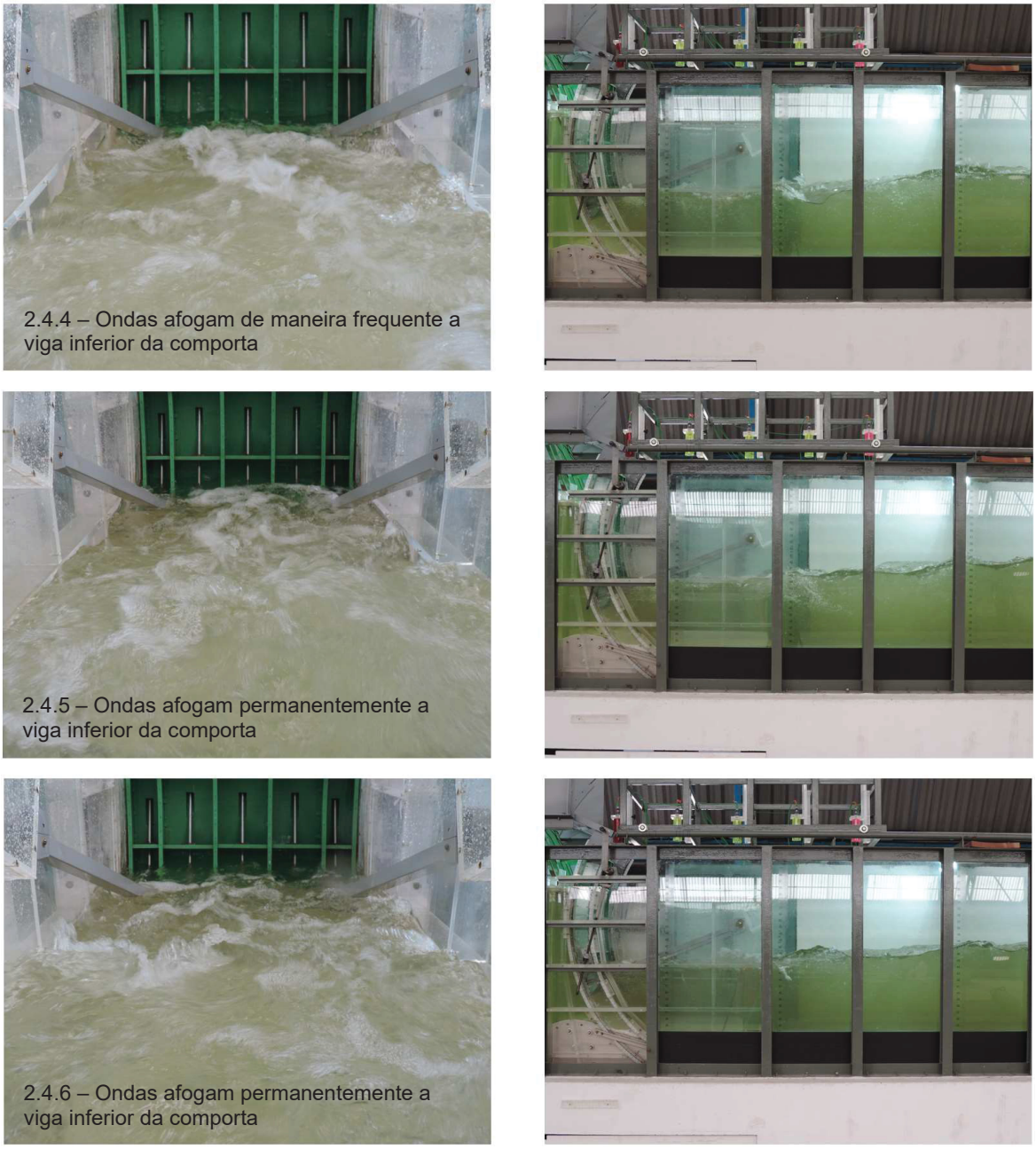






(a) Vista frontal

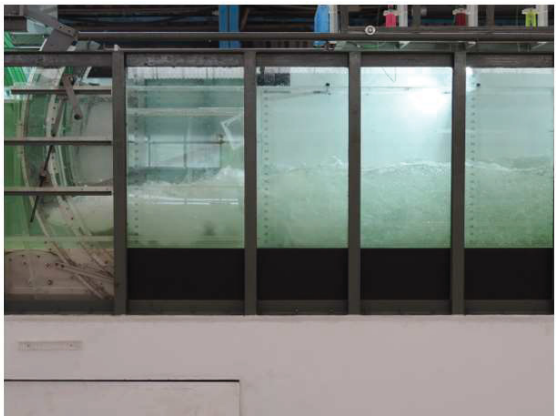
(b) Vista lateral

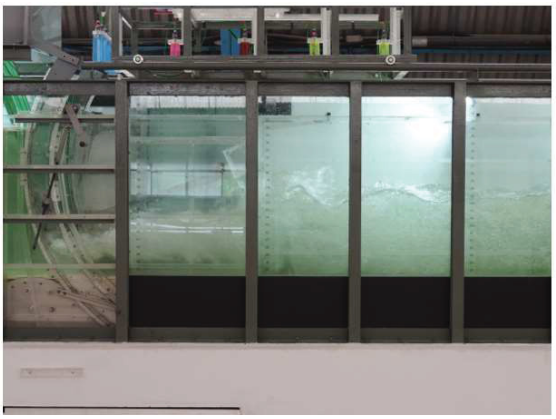


(a) Vista frontal (b) Vista lateral

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

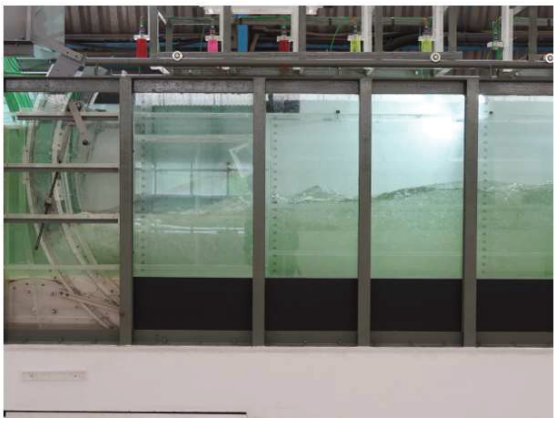
ANEXO 3 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO – ABERTURA 4 M – ALTERNATIVA 2

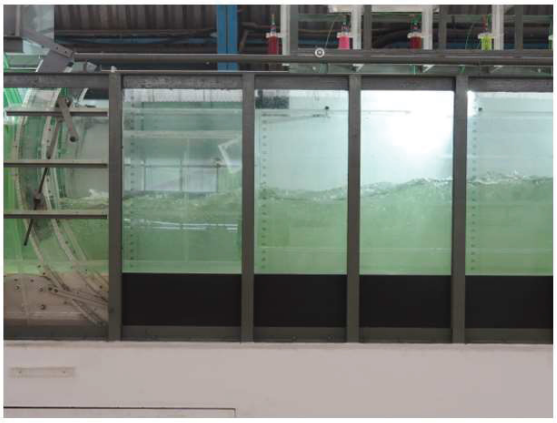




(a) Vista frontal

(b) Vista lateral





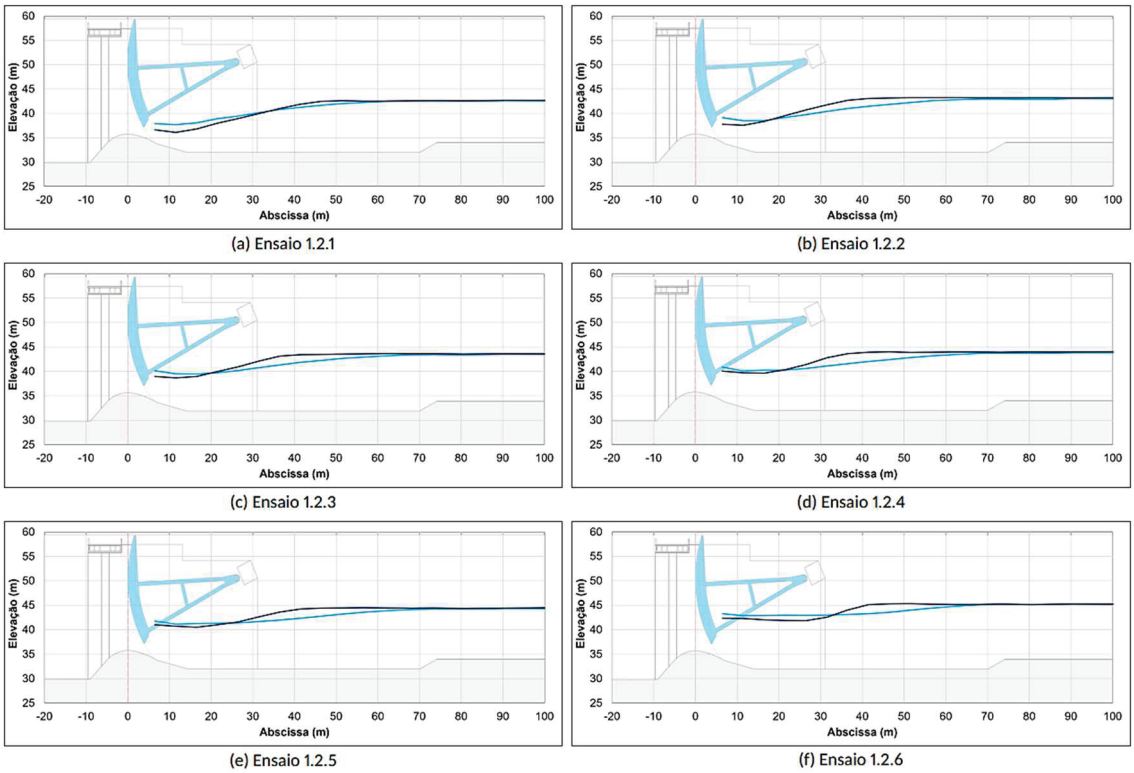
(a) Vista frontal (b) Vista lateral

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

ANEXO 4 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – PROJETO PILOTO

FIGURA 1 – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 2 M E 3 M

Abertura 2 m

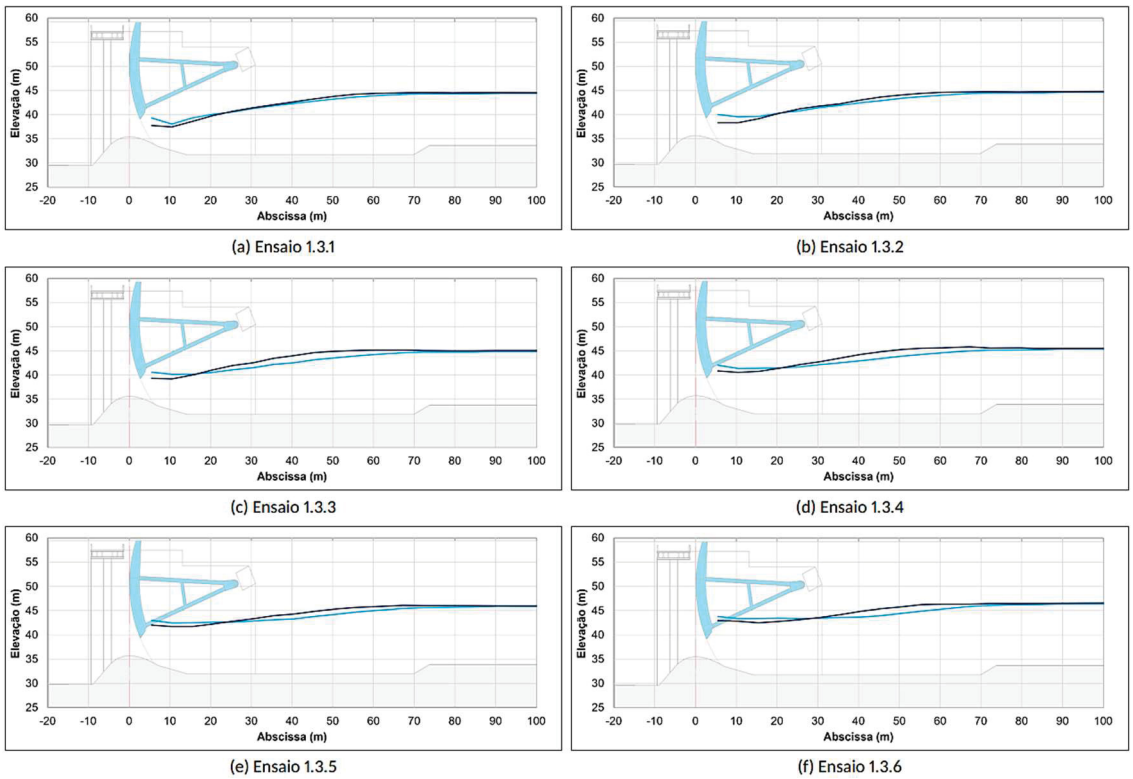


(a) Ensaio 1.2.1 (b) Ensaio 1.2.2

(c) Ensaio 1.2.3 (d) Ensaio 1.2.4

(e) Ensaio 1.2.5 (f) Ensaio 1.2.6

Abertura 3 m



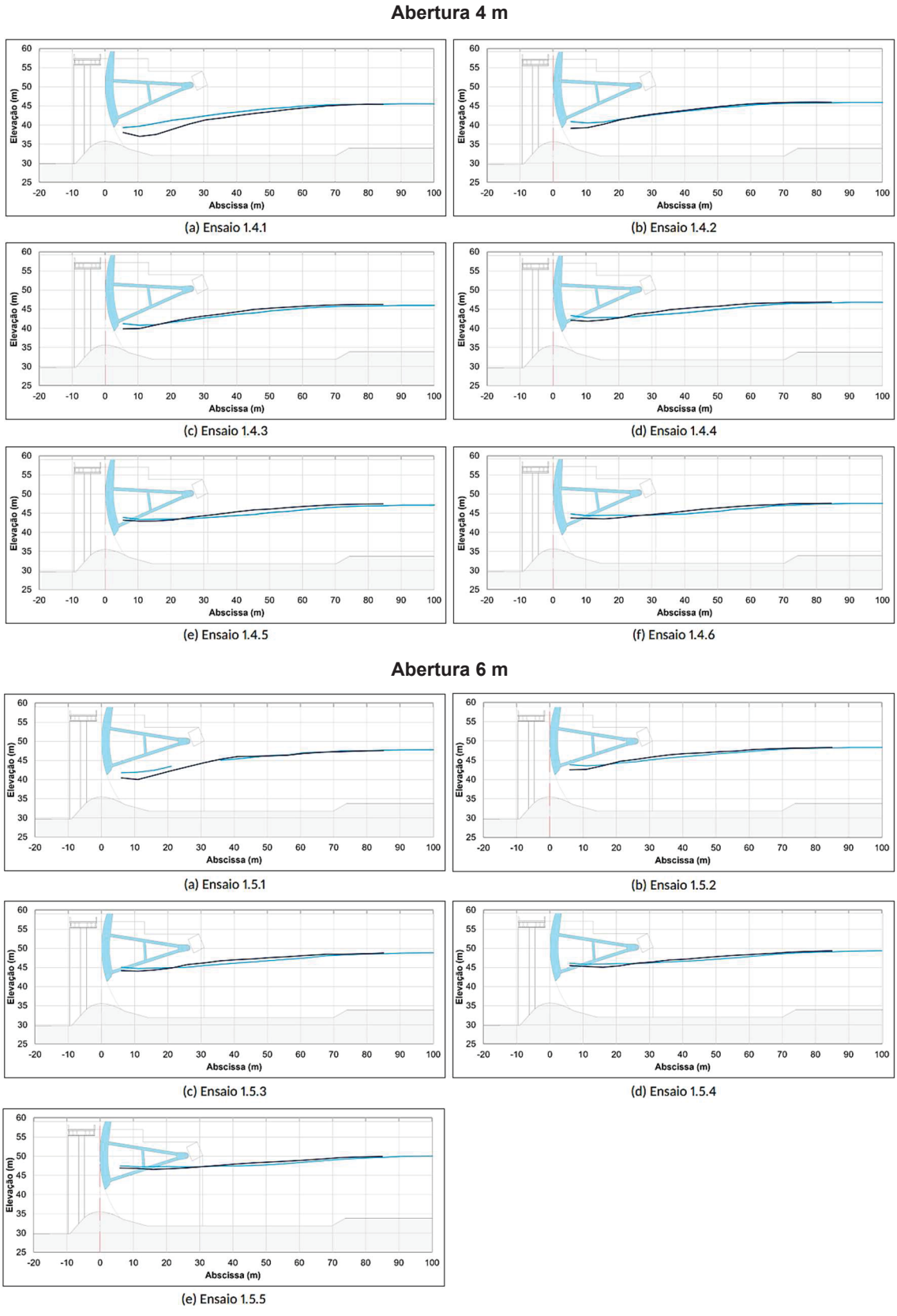
(a) Ensaio 1.3.1 (b) Ensaio 1.3.2

(c) Ensaio 1.3.3 (d) Ensaio 1.3.4

(e) Ensaio 1.3.5 (f) Ensaio 1.3.6

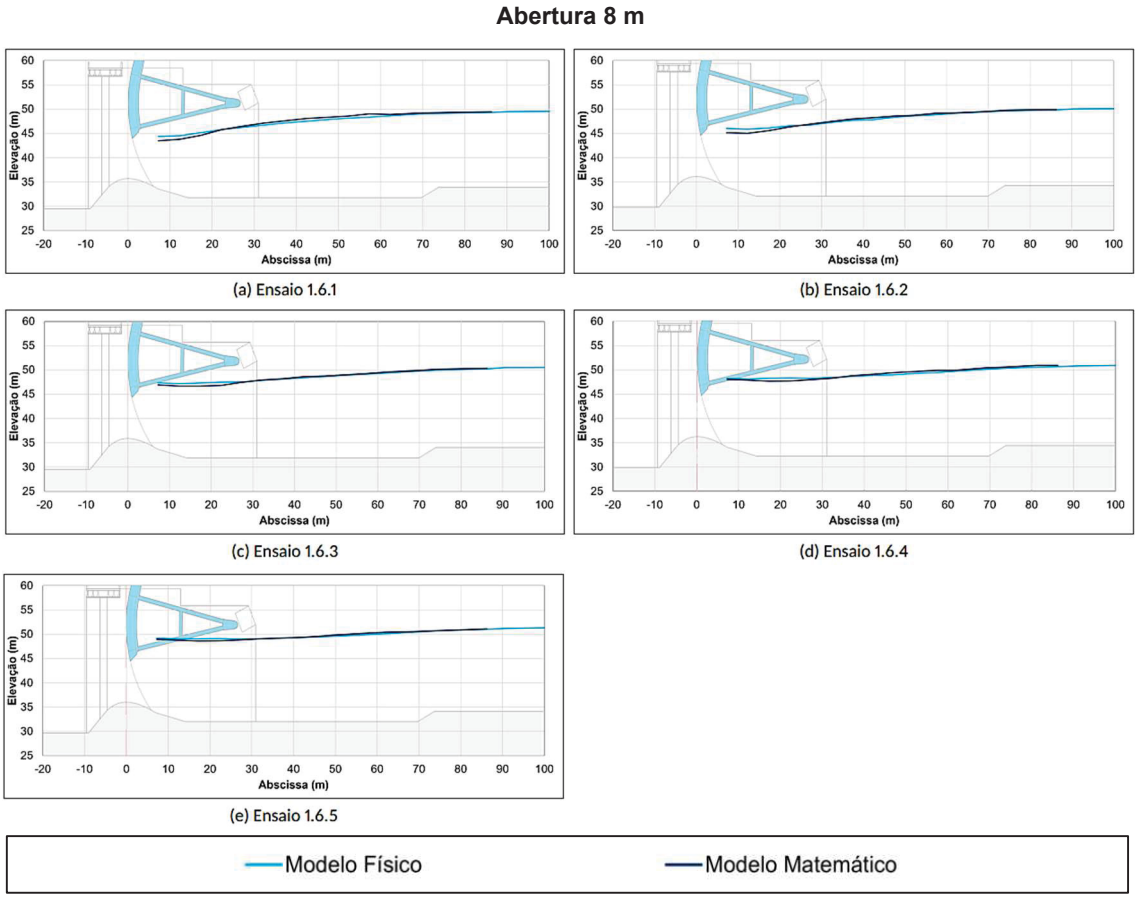
Modelo Físico — Modelo Matemático

FIGURA 2 – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 4 M E 6 M



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 3 – PROJETO PILOTO – ABERTURA DE 8 M

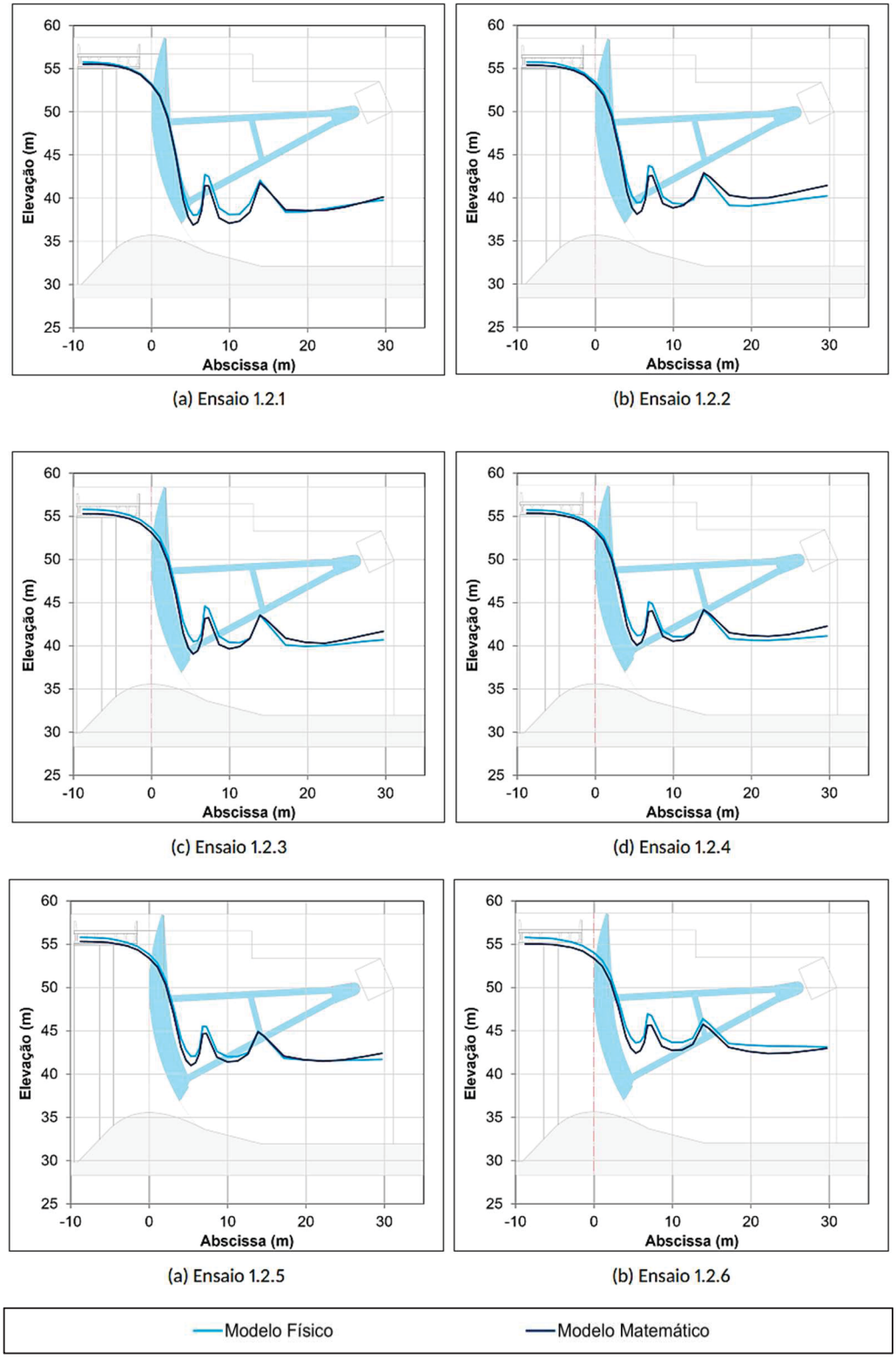


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

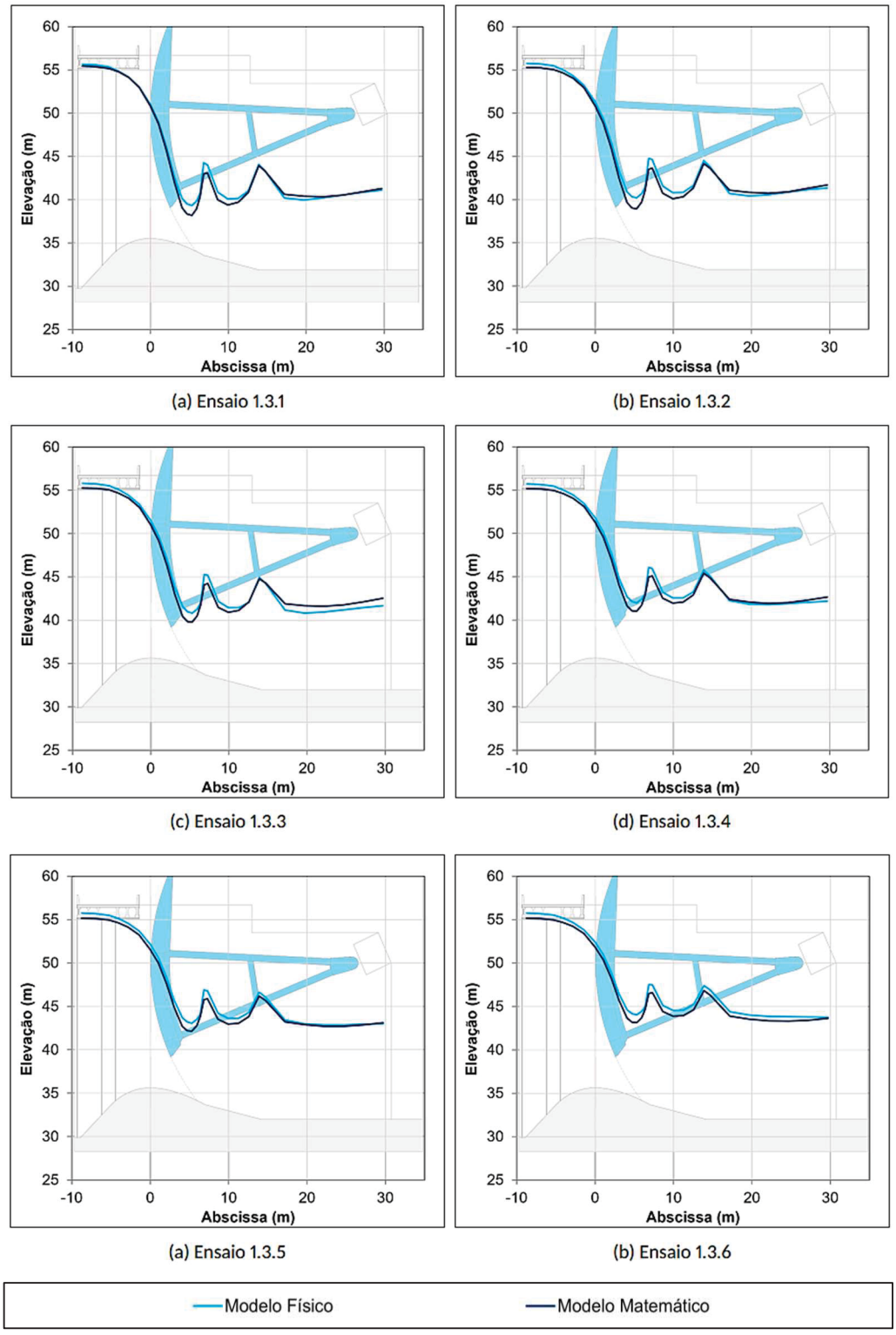
ANEXO 5 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS E INSTANTÂNEAS – PROJETO PILOTO

FIGURA 1 – PRESSÕES MÉDIAS – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 2 M E 3 M

Abertura 2 m

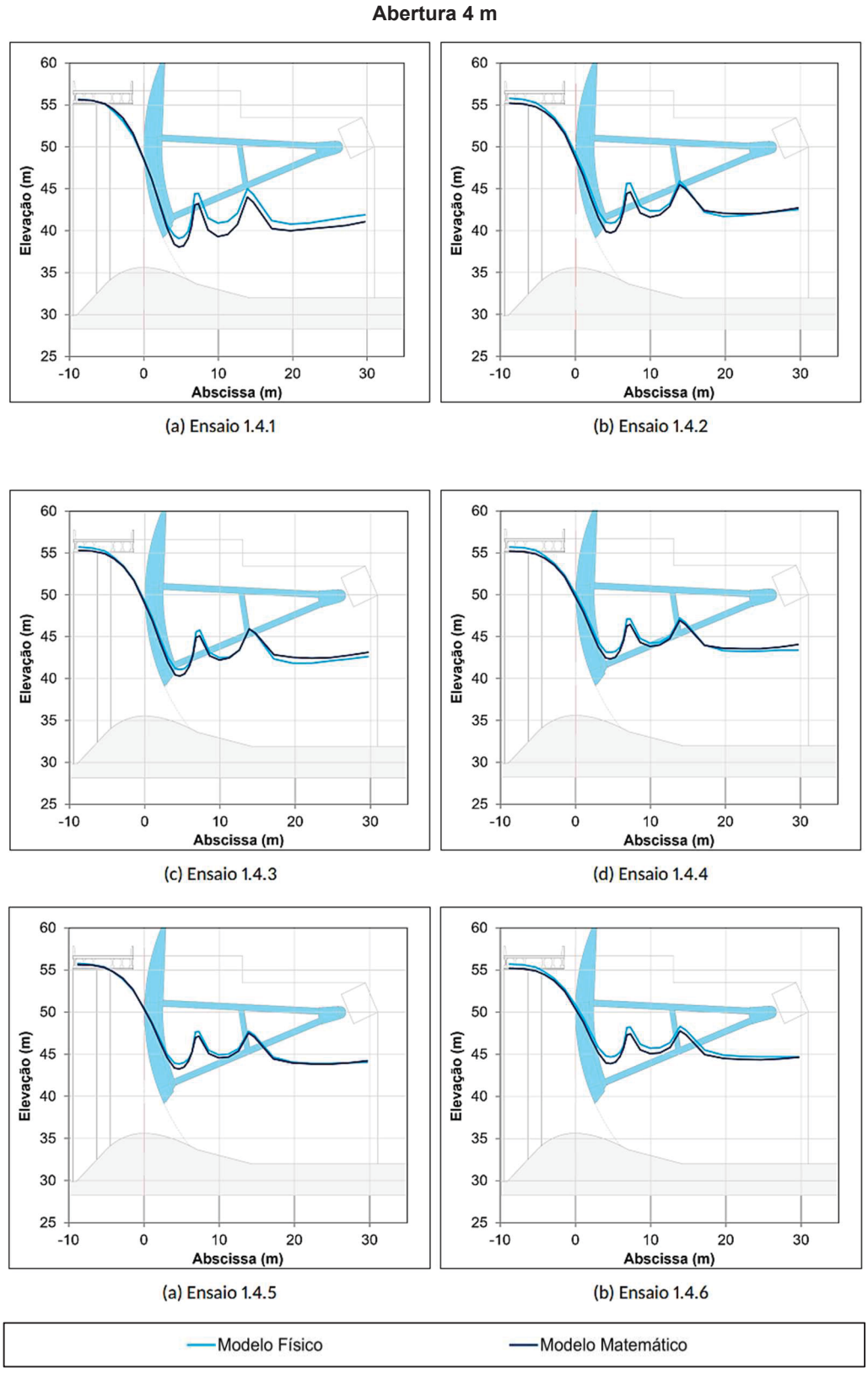


Abertura 3 m

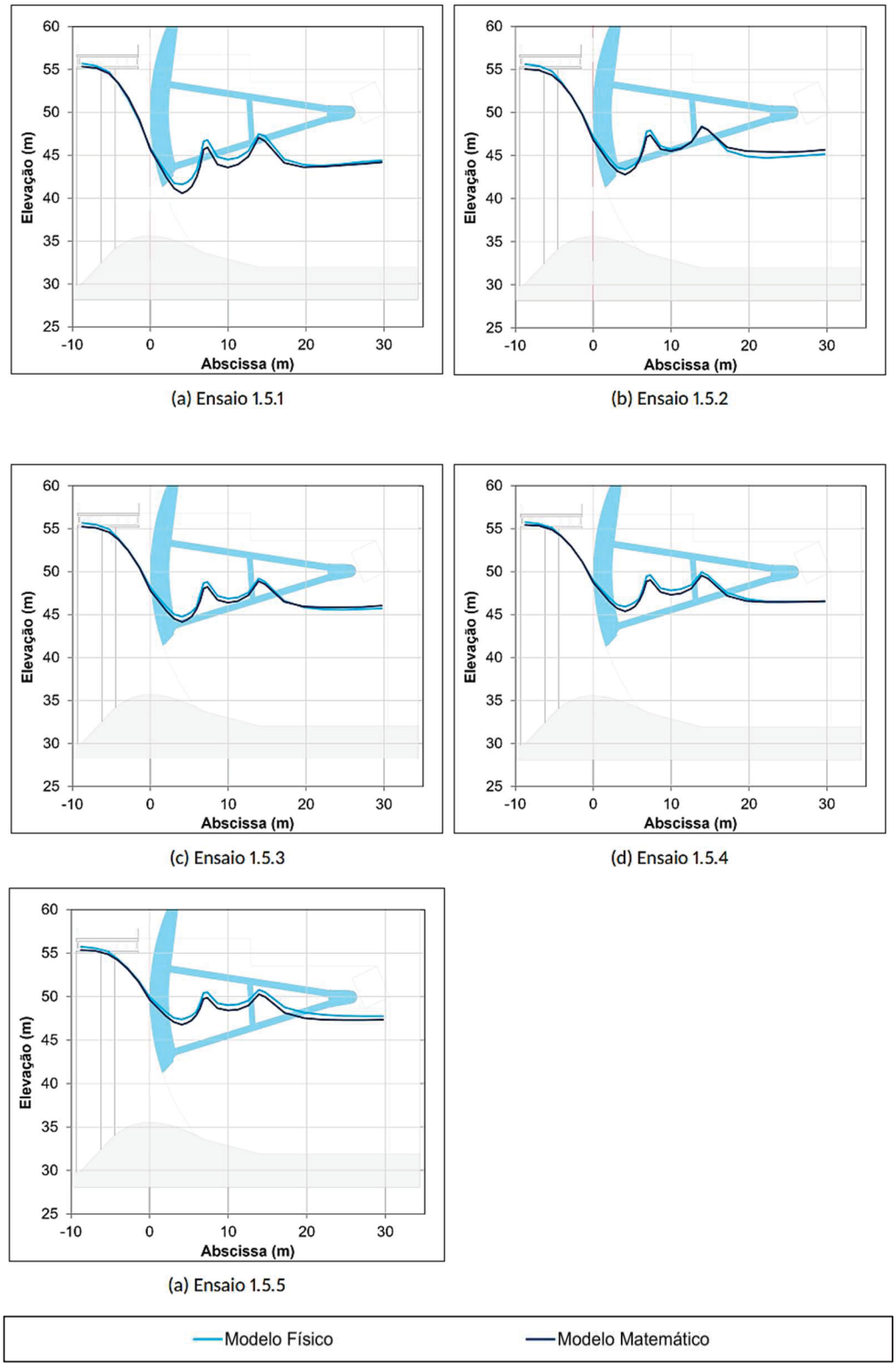


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – PRESSÕES MÉDIAS – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 4 M E 6 M

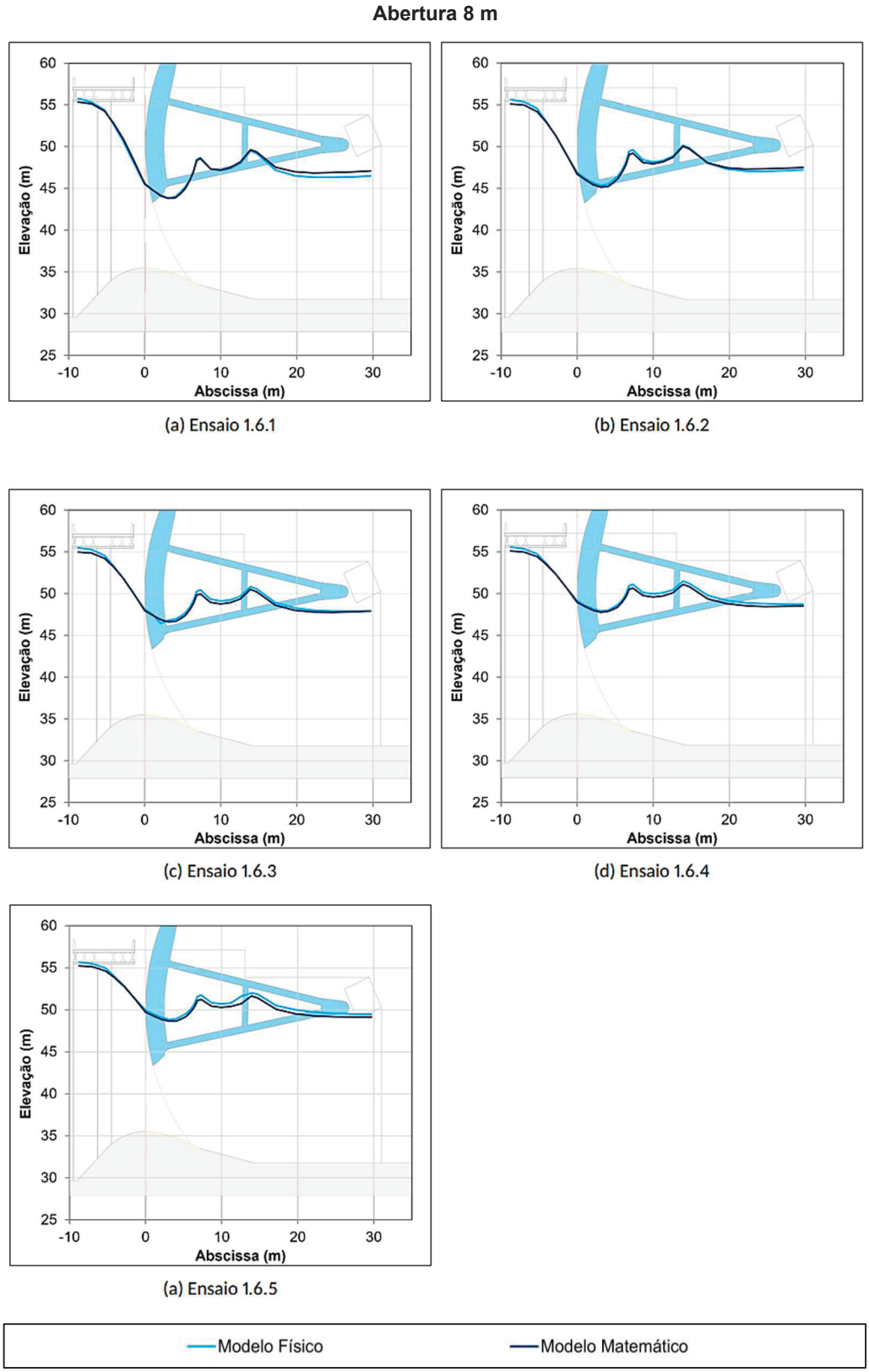


Abertura 6 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 3 – PRESSÕES MÉDIAS – PROJETO PILOTO – ABERTURA DE 8 M



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 4 – PRESSÕES INSTANTÂNEAS – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 2 M E 3 M

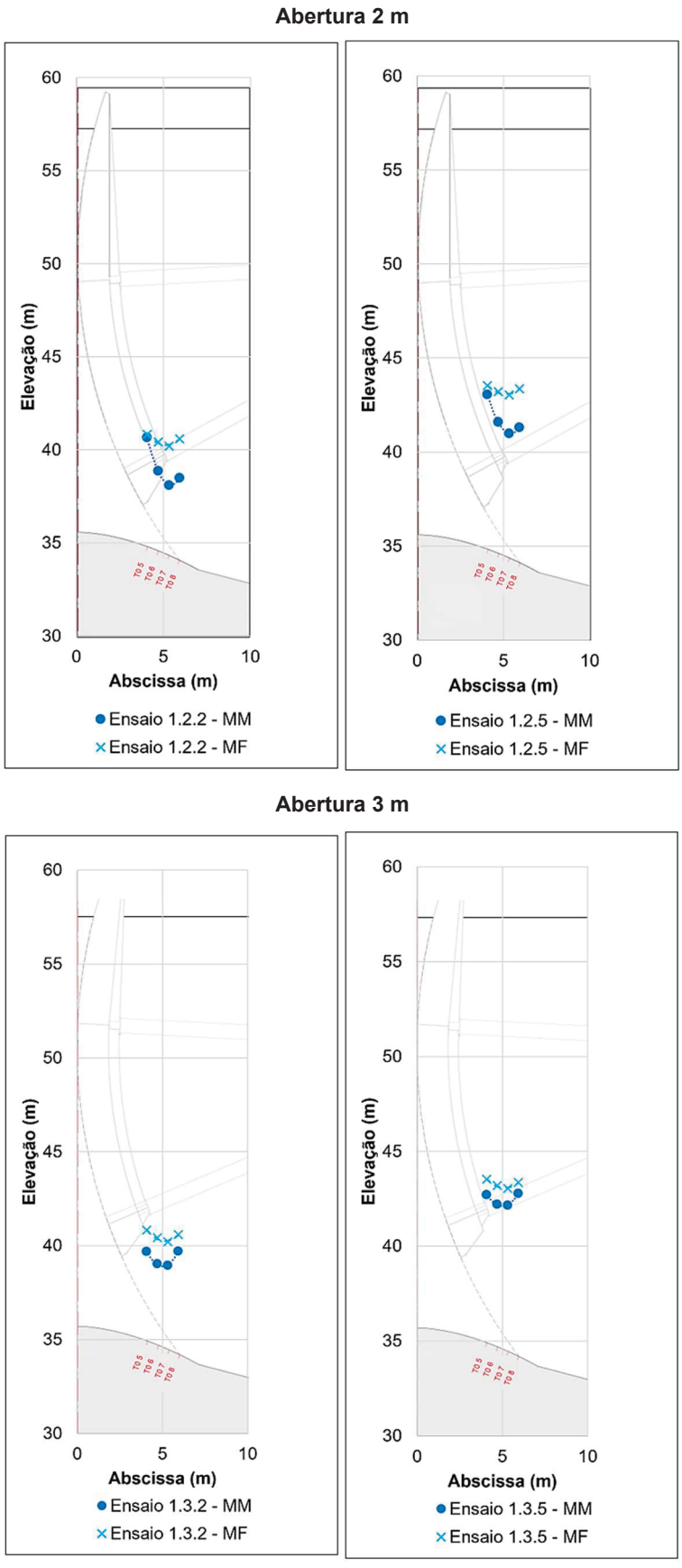


FIGURA 5 – PRESSÕES INSTANTÂNEAS – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 4 M E 6 M

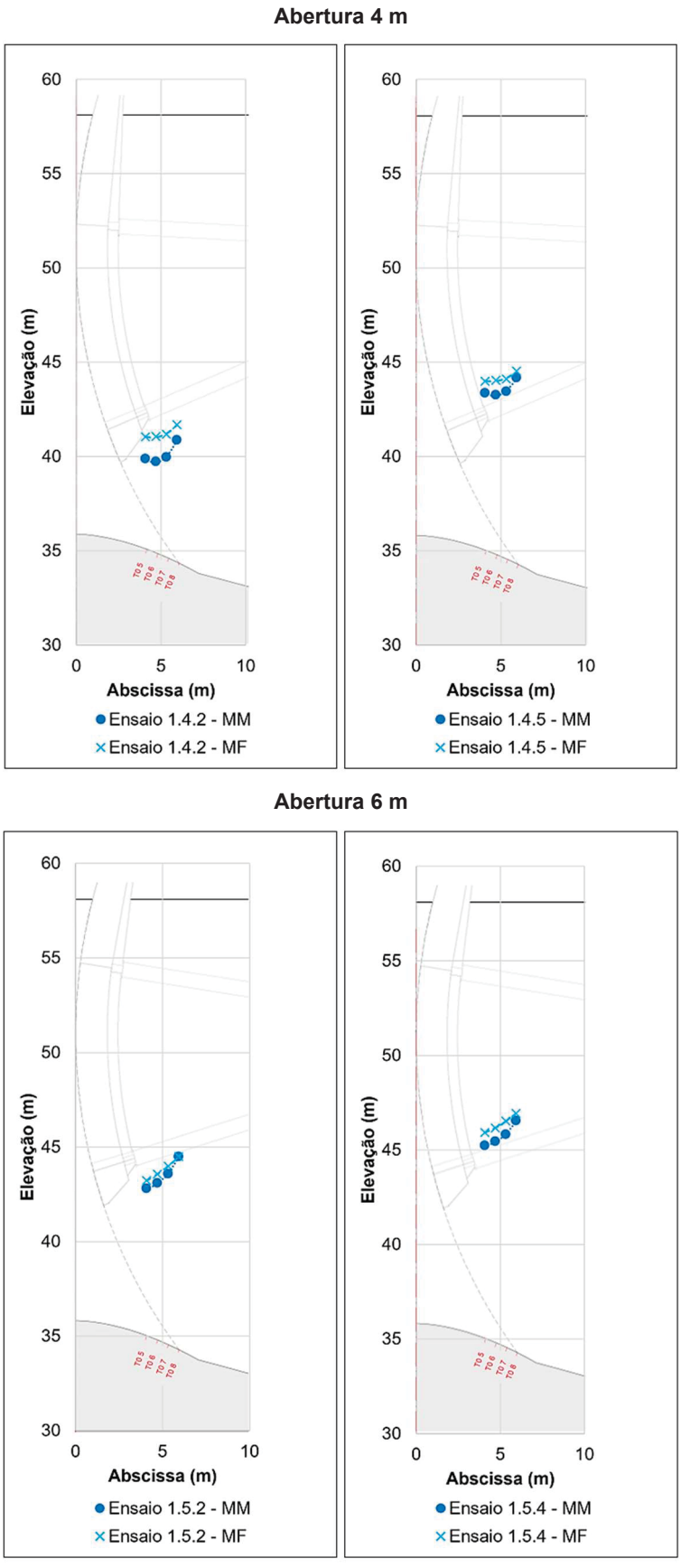
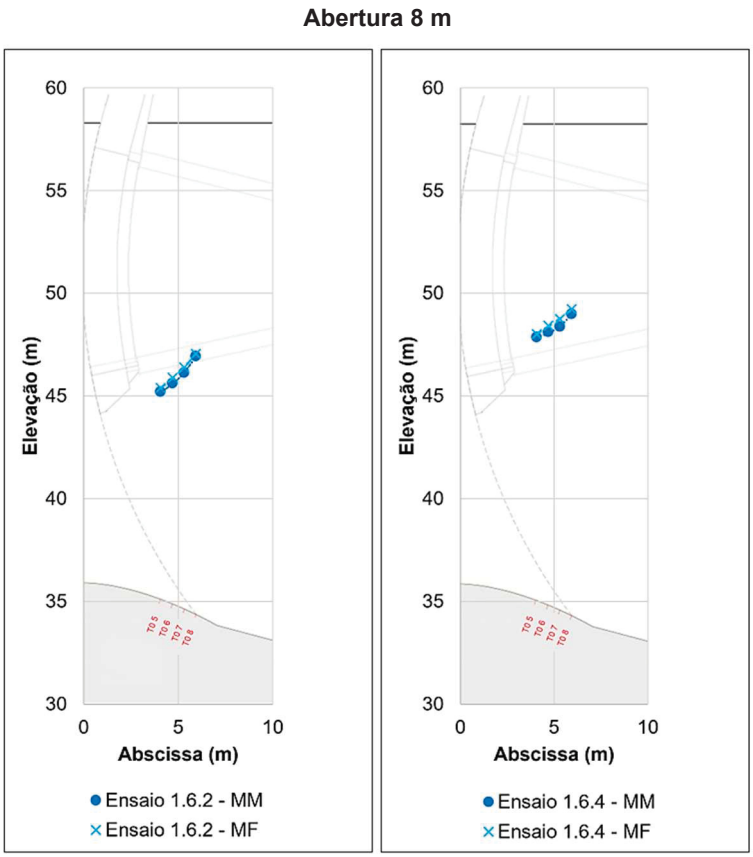


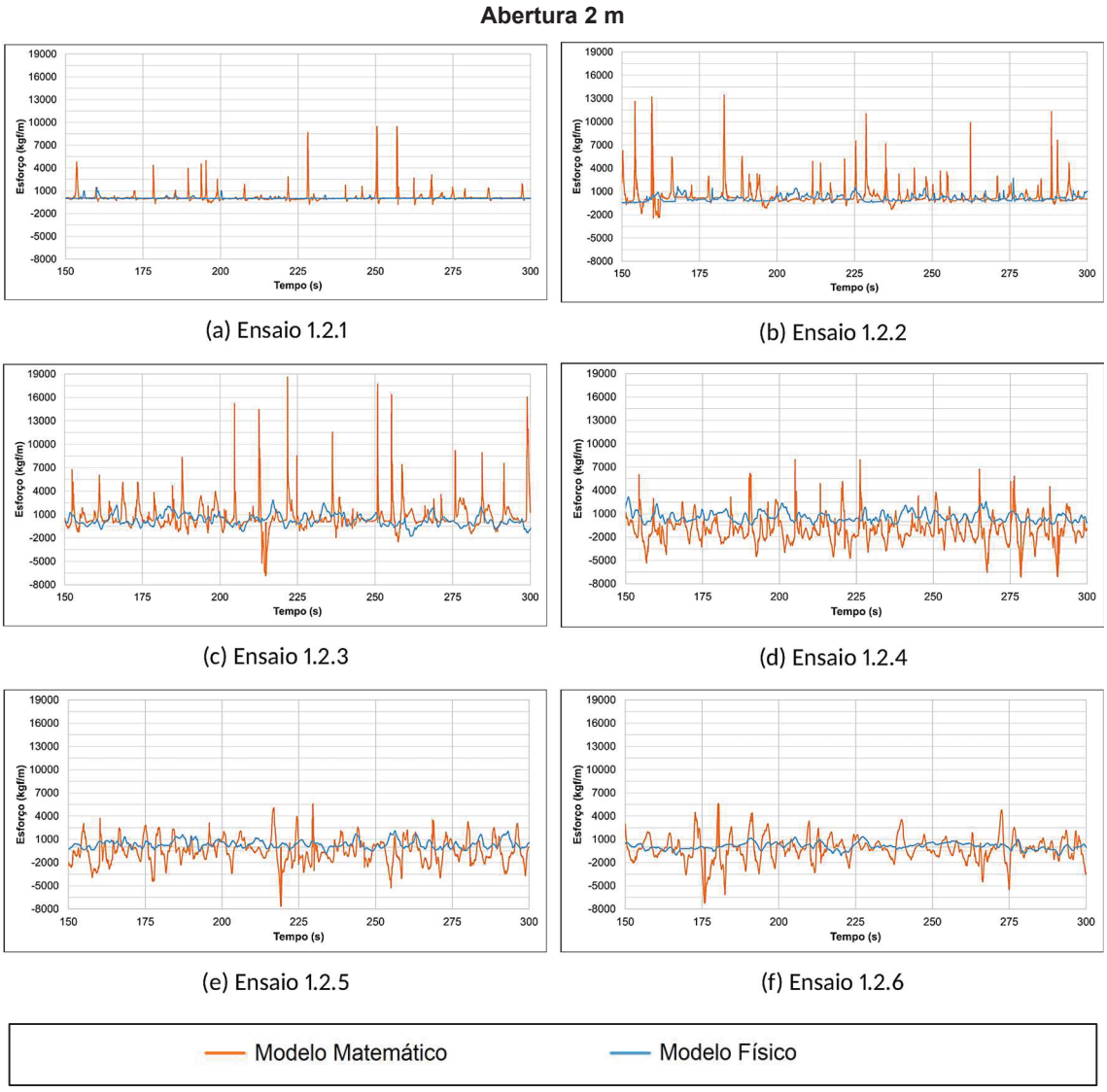
FIGURA 6 – PRESSÕES INSTANTÂNEAS – PROJETO PILOTO – ABERTURA DE 8 M



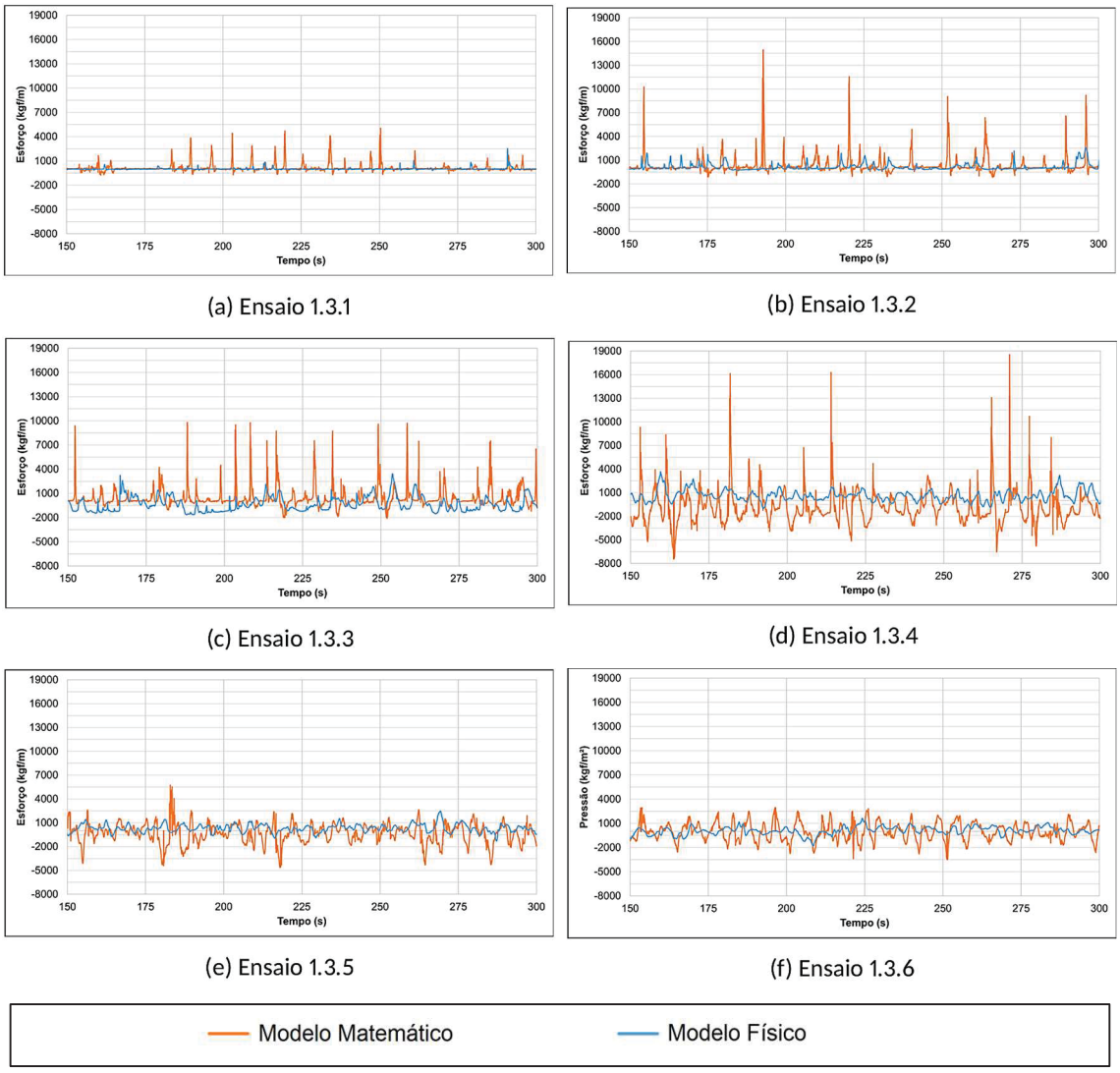
FONTE: PD-06491-0445/2017 (2023).

ANEXO 6 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO

FIGURA 1 – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 2 M E 3 M



Abertura 3 m



(a) Ensaio 1.3.1

(b) Ensaio 1.3.2

(c) Ensaio 1.3.3

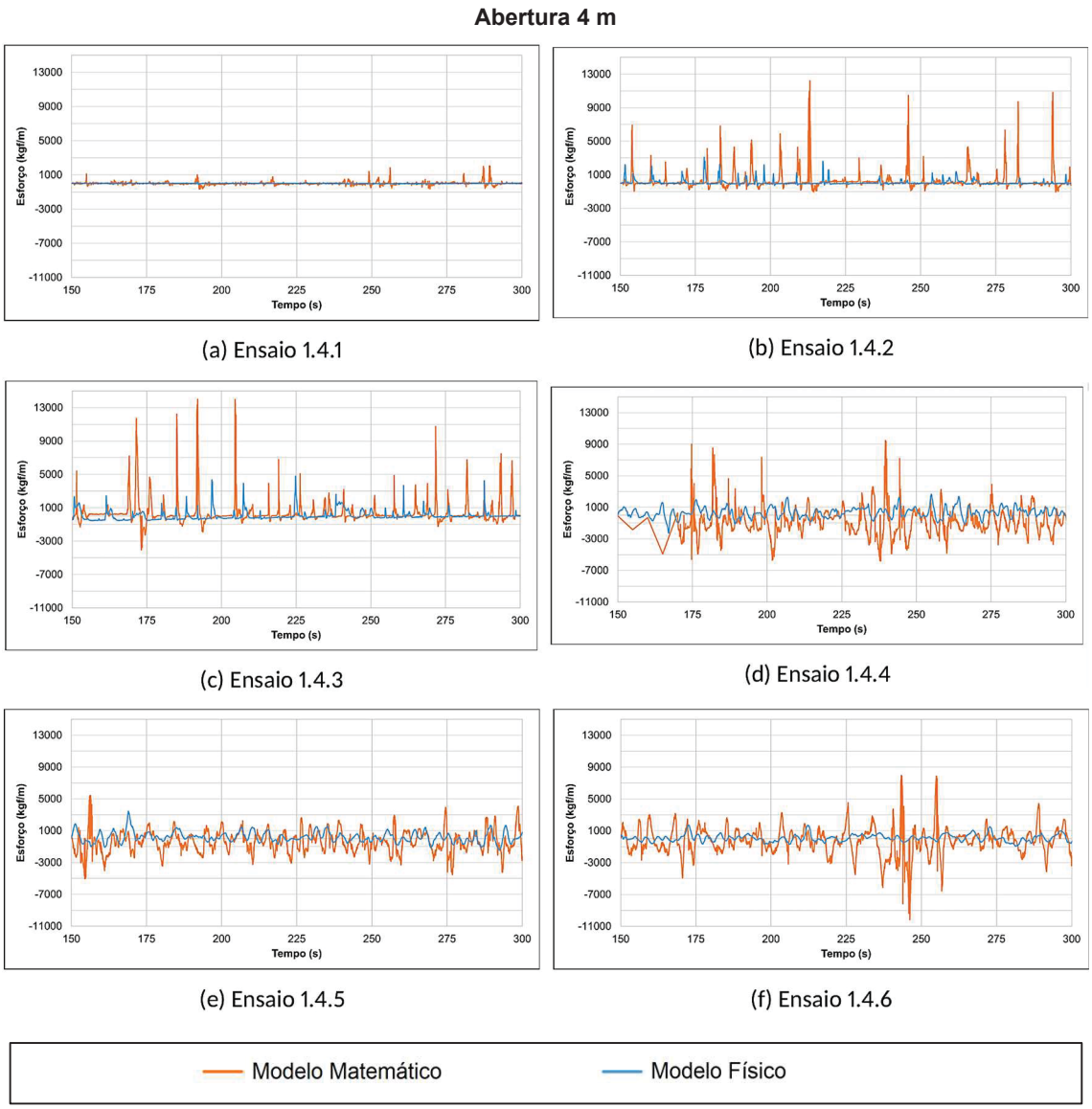
(d) Ensaio 1.3.4

(e) Ensaio 1.3.5

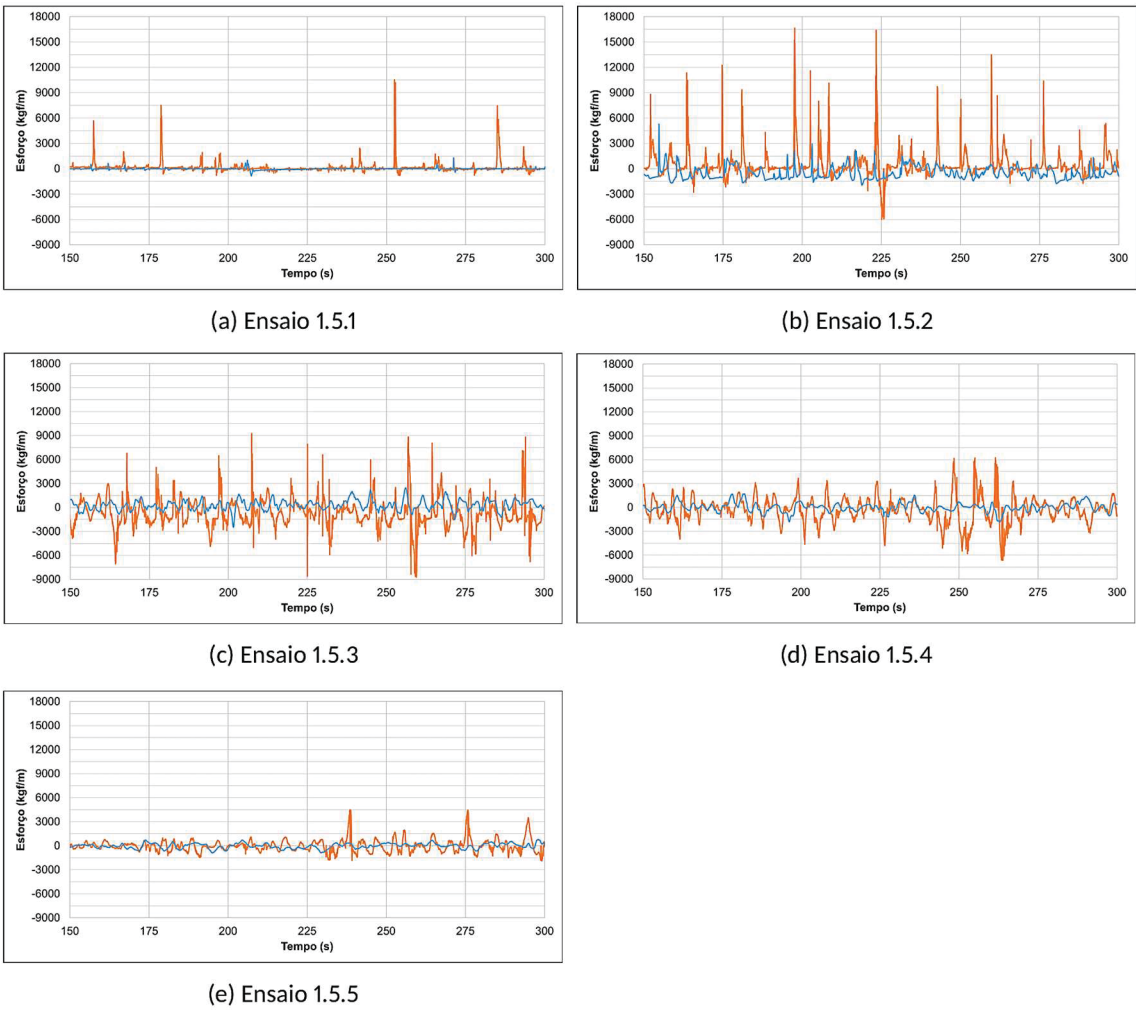
(f) Ensaio 1.3.6

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 4 M E 6 M



Abertura 6 m



(a) Ensaio 1.5.1

(b) Ensaio 1.5.2

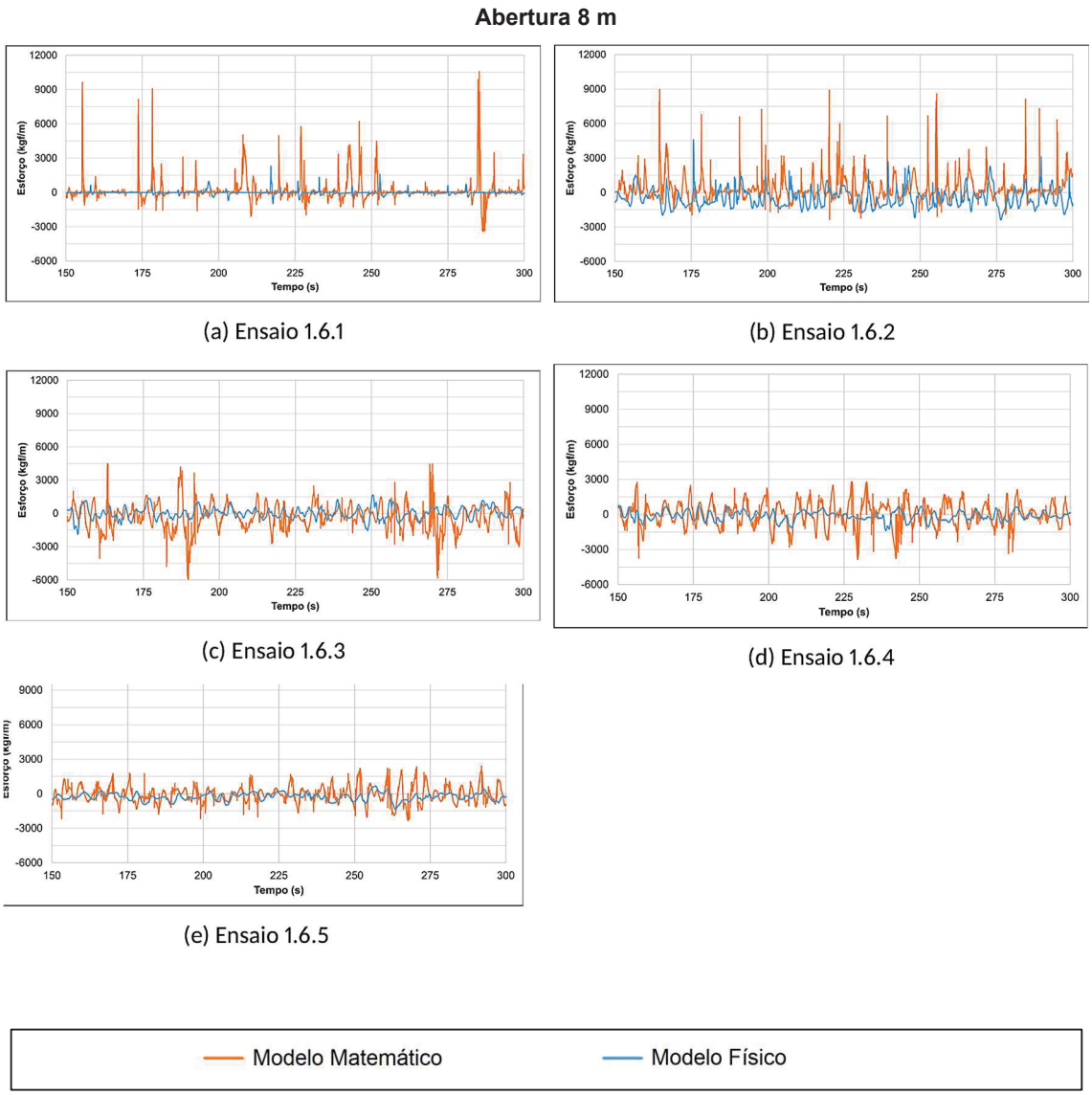
(c) Ensaio 1.5.3

(d) Ensaio 1.5.4

(e) Ensaio 1.5.5

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 3 – PROJETO PILOTO – ABERTURA DE 8 M

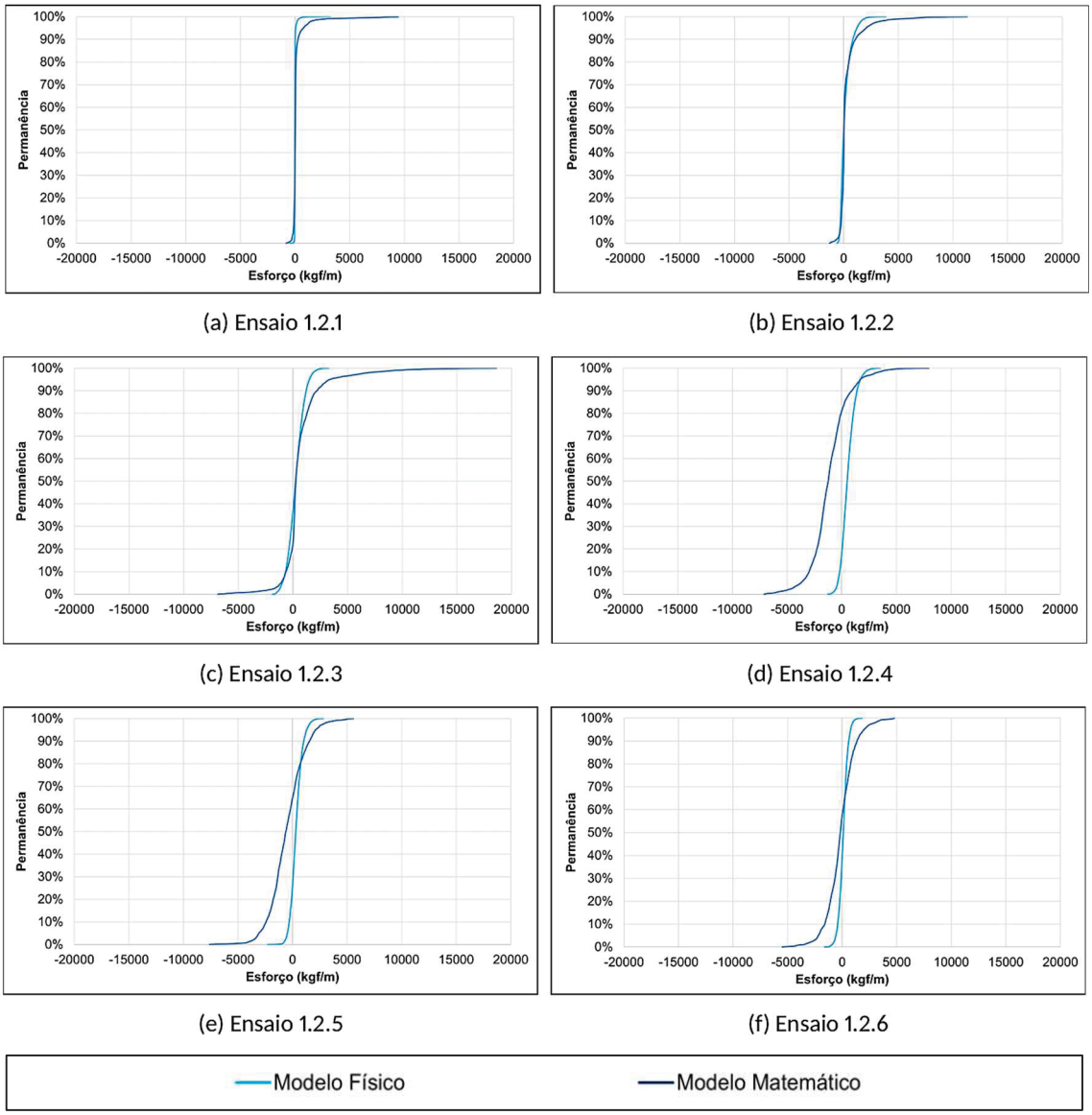


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

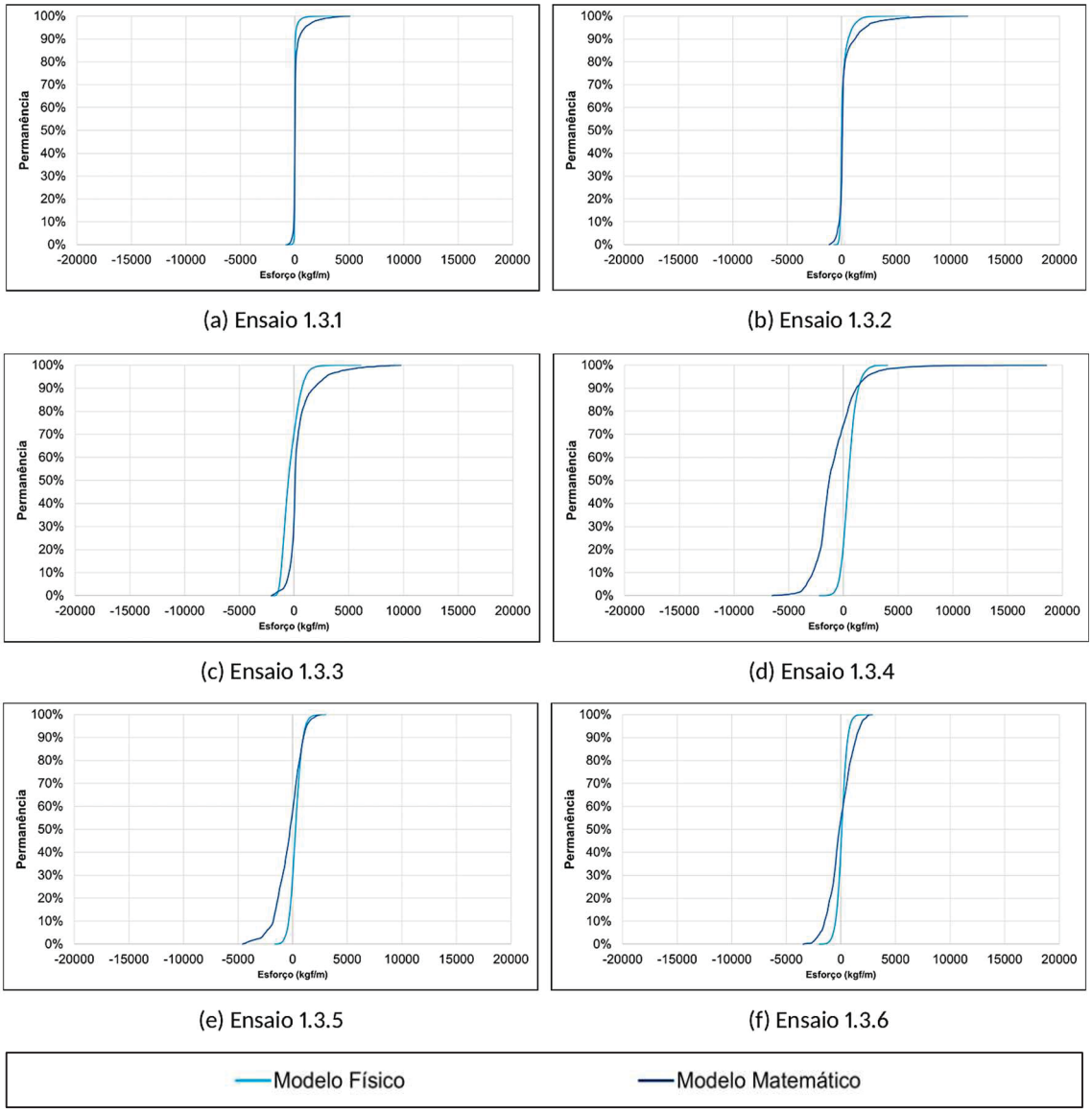
ANEXO 7 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – PROJETO PILOTO

FIGURA 1 – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 2 M E 3 M

Abertura 2 m

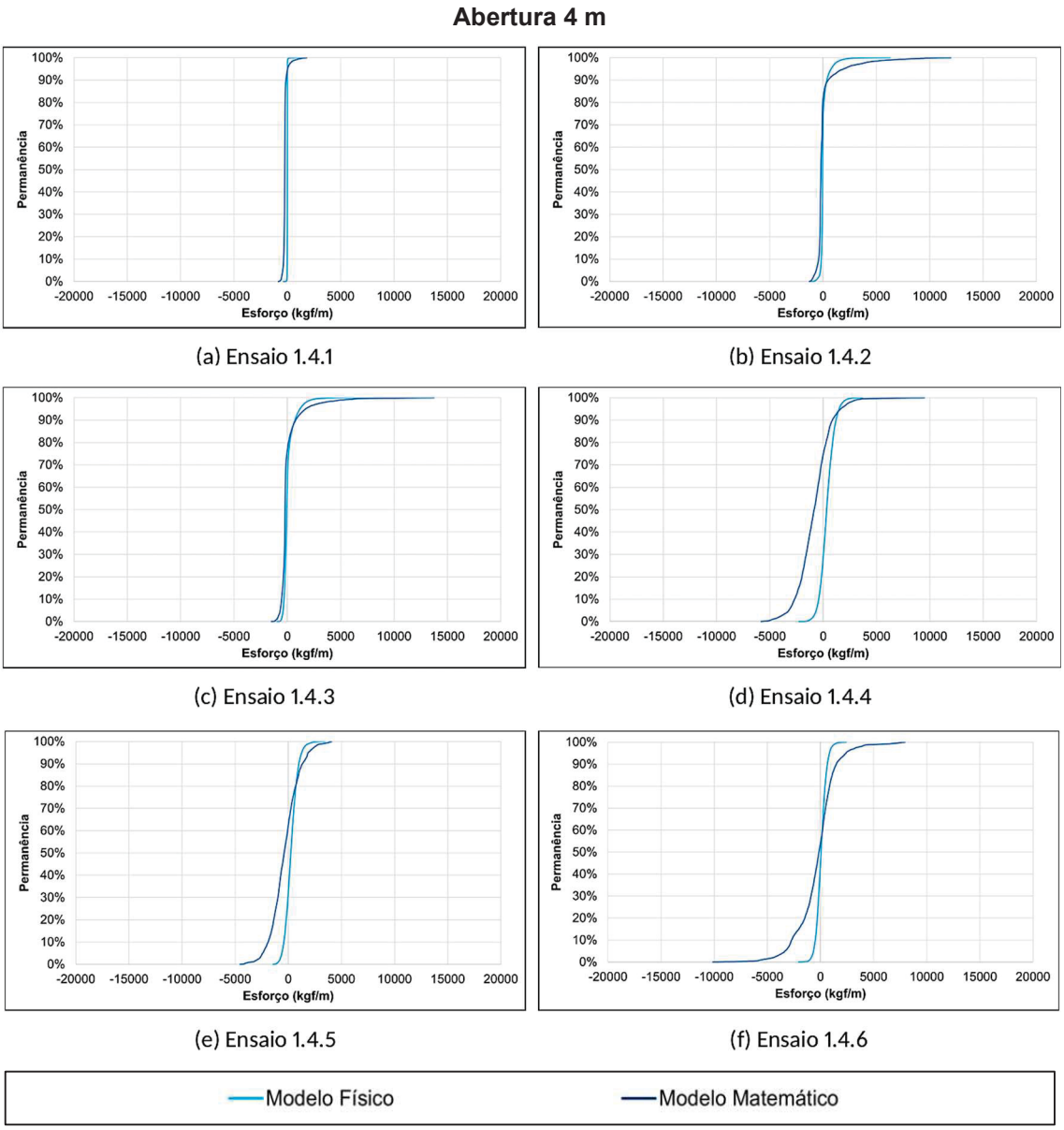


Abertura 3 m

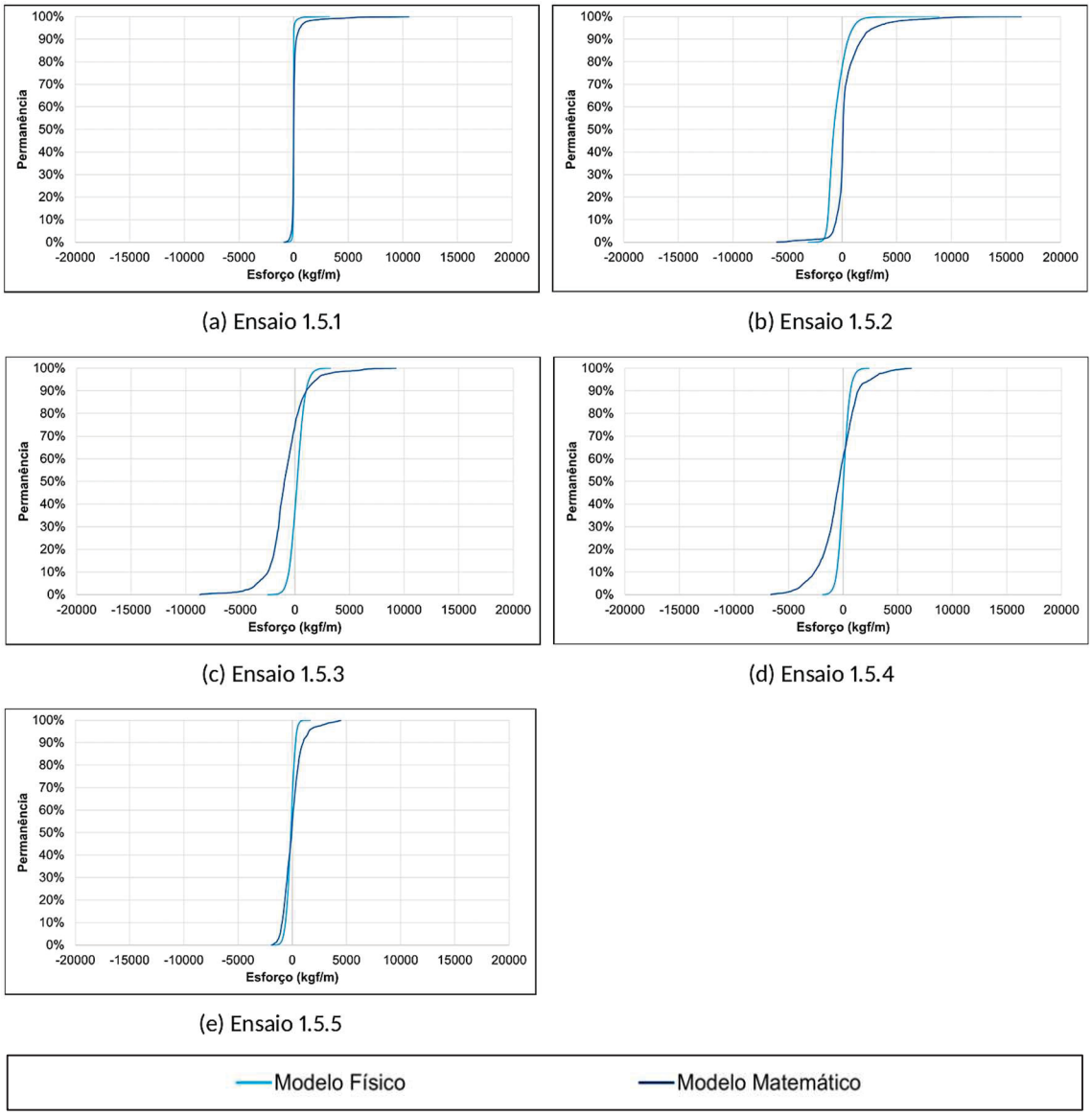


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – PROJETO PILOTO – ABERTURAS DE 4 M E 6 M

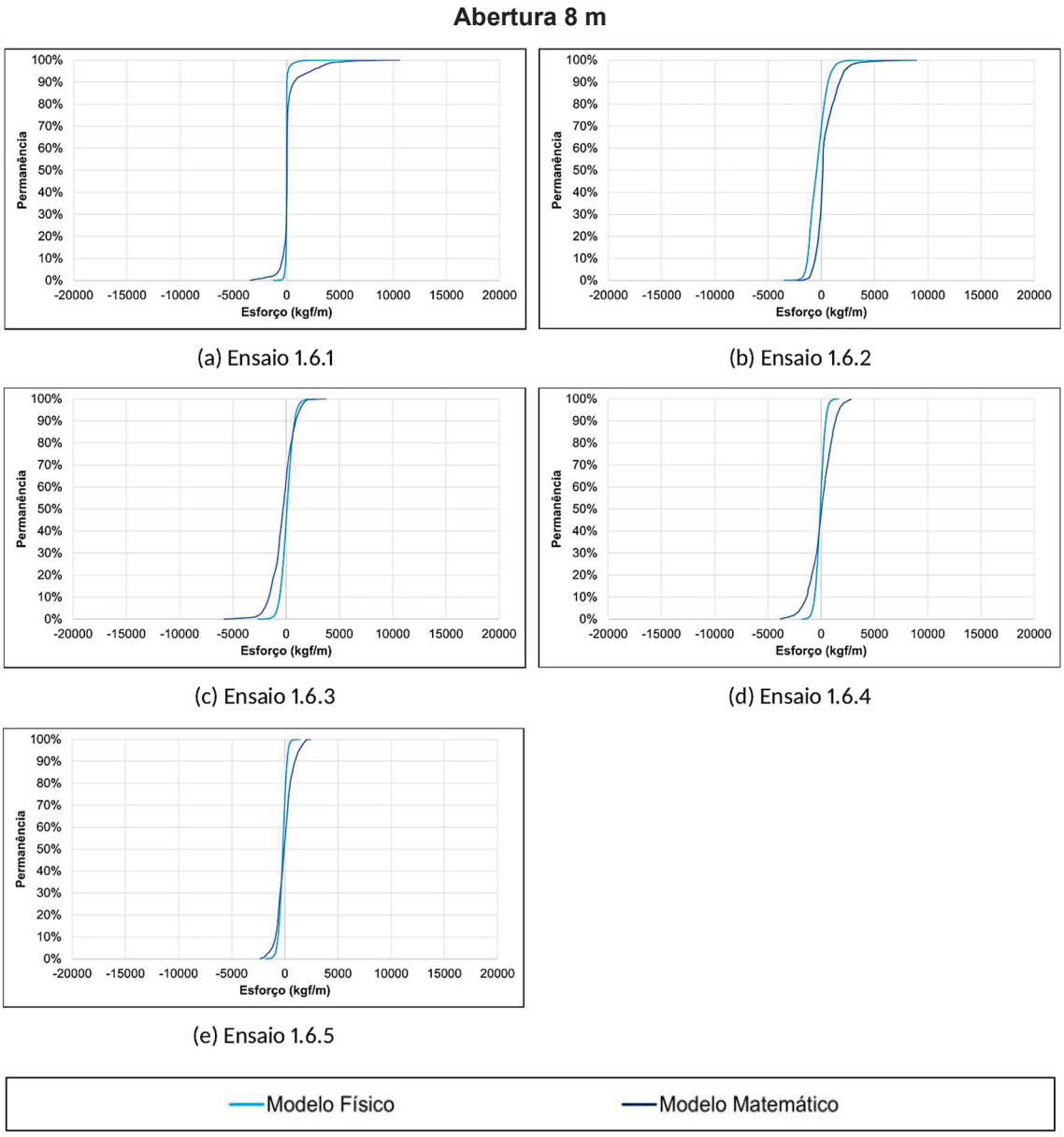


Abertura 6 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 3 – PROJETO PILOTO – ABERTURA DE 8 M

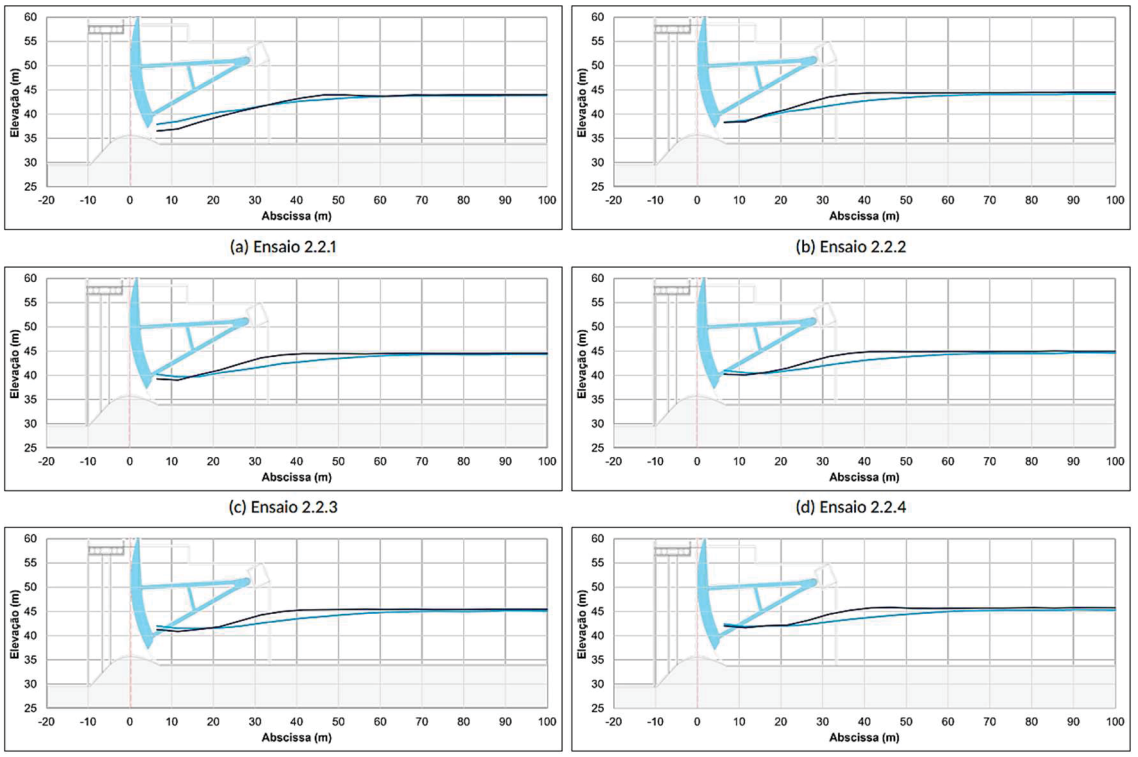


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

ANEXO 8 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 1

FIGURA 1 – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M

Abertura 2 m

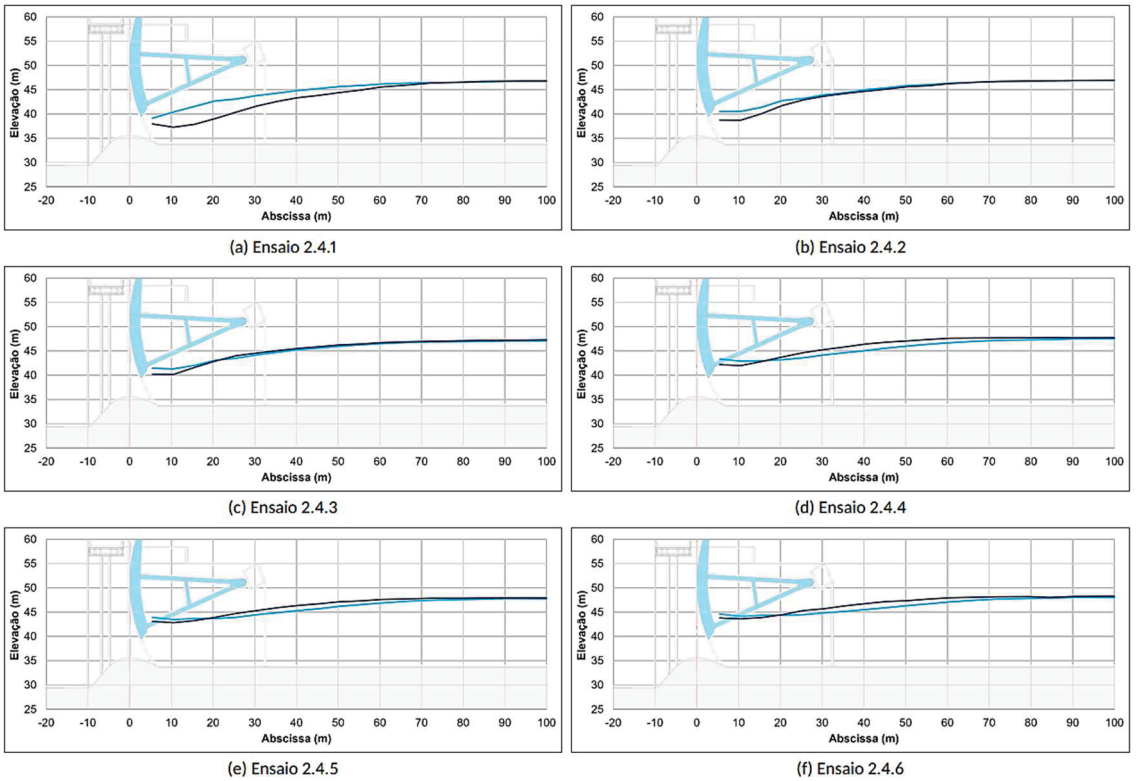


(a) Ensaio 2.2.1 (b) Ensaio 2.2.2

(c) Ensaio 2.2.3 (d) Ensaio 2.2.4

(e) Ensaio 2.2.5 (f) Ensaio 2.2.6

Abertura 4 m



(a) Ensaio 2.4.1 (b) Ensaio 2.4.2

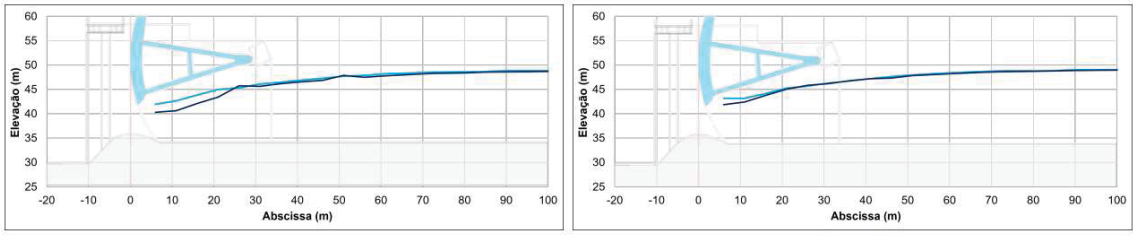
(c) Ensaio 2.4.3 (d) Ensaio 2.4.4

(e) Ensaio 2.4.5 (f) Ensaio 2.4.6

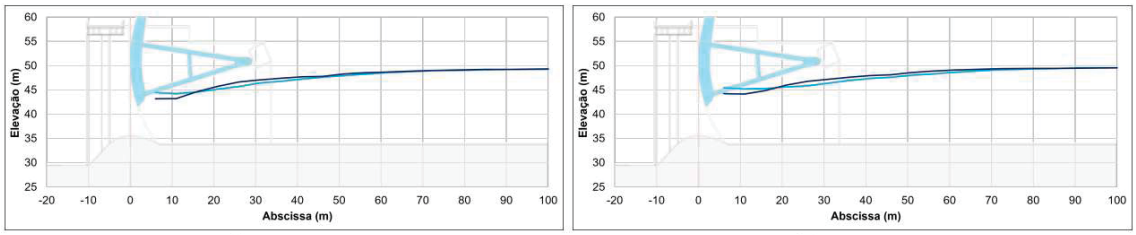
Modelo Físico Modelo Matemático

FIGURA 2 – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M

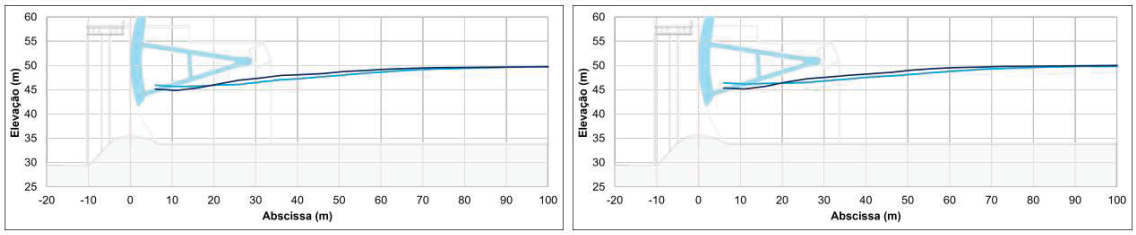
Abertura 6 m



(a) Ensaio 2.5.1 (b) Ensaio 2.5.1B

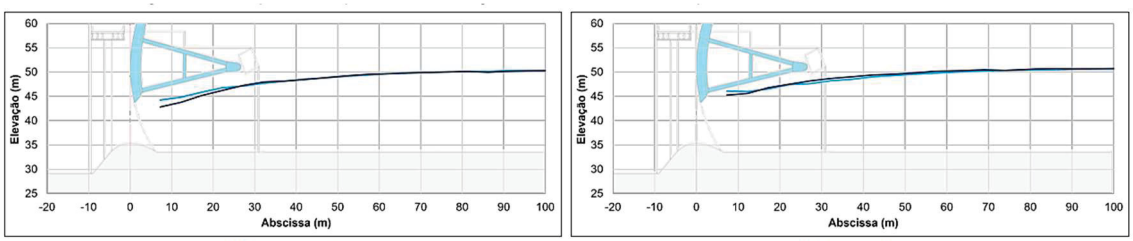


(c) Ensaio 2.5.2 (d) Ensaio 2.5.3

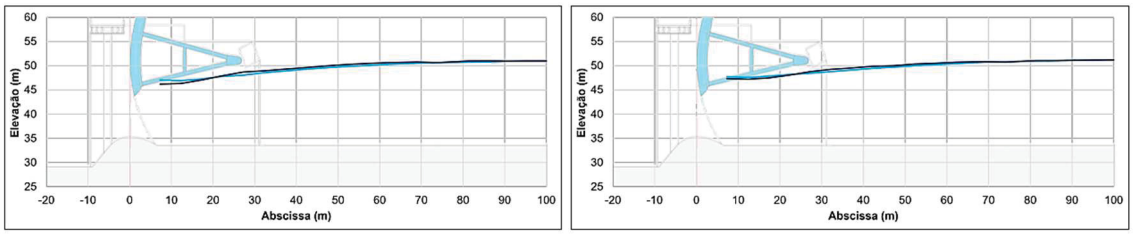


(e) Ensaio 2.5.4 (f) Ensaio 2.5.5

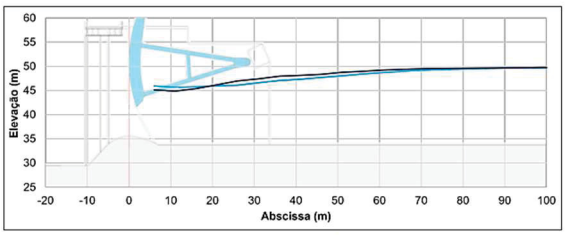
Abertura 8 m



(a) Ensaio 2.6.1 (b) Ensaio 2.6.2



(c) Ensaio 2.6.3 (d) Ensaio 2.6.4



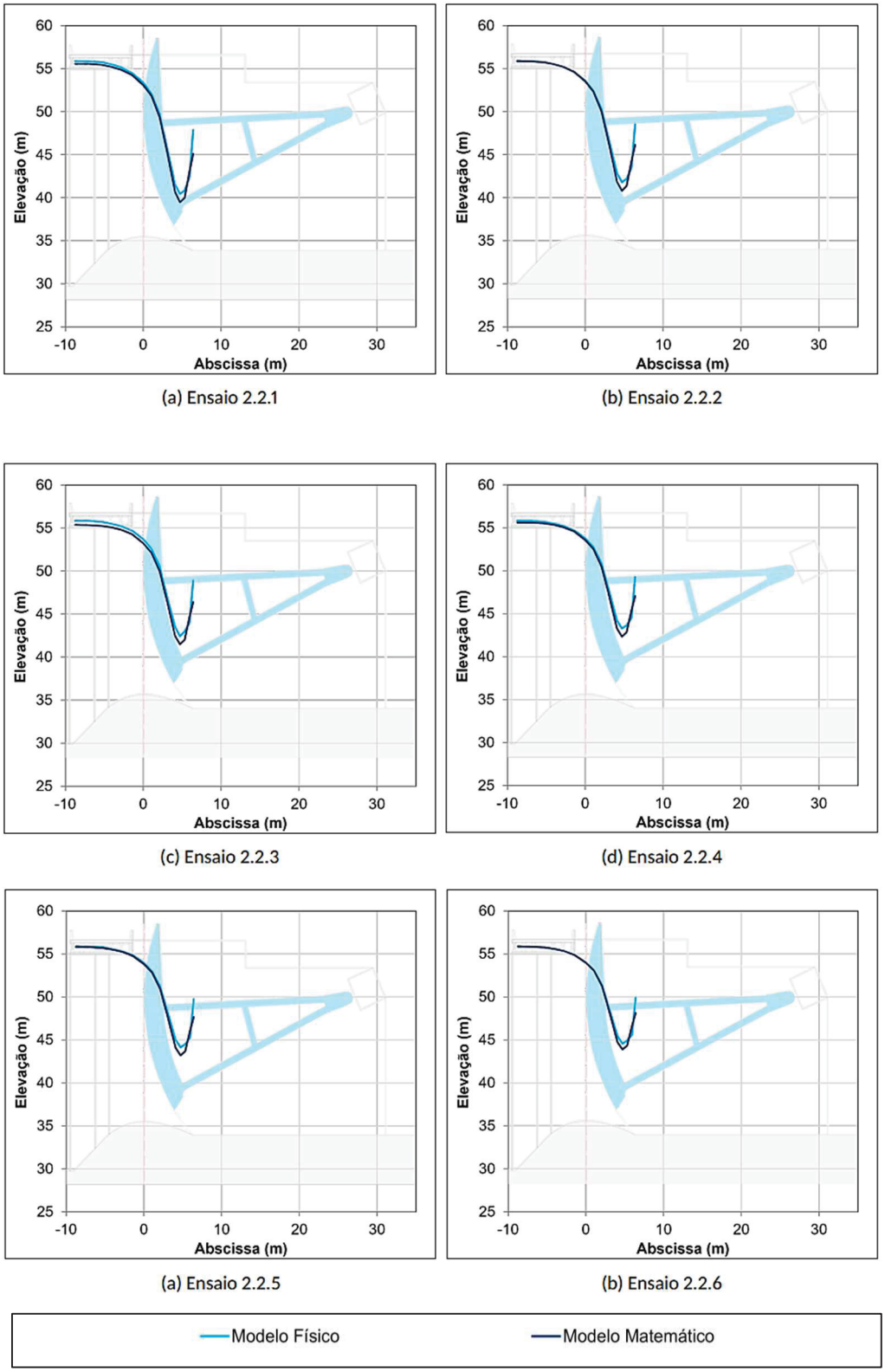
(e) Ensaio 2.6.5

Modelo Físico Modelo Matemático

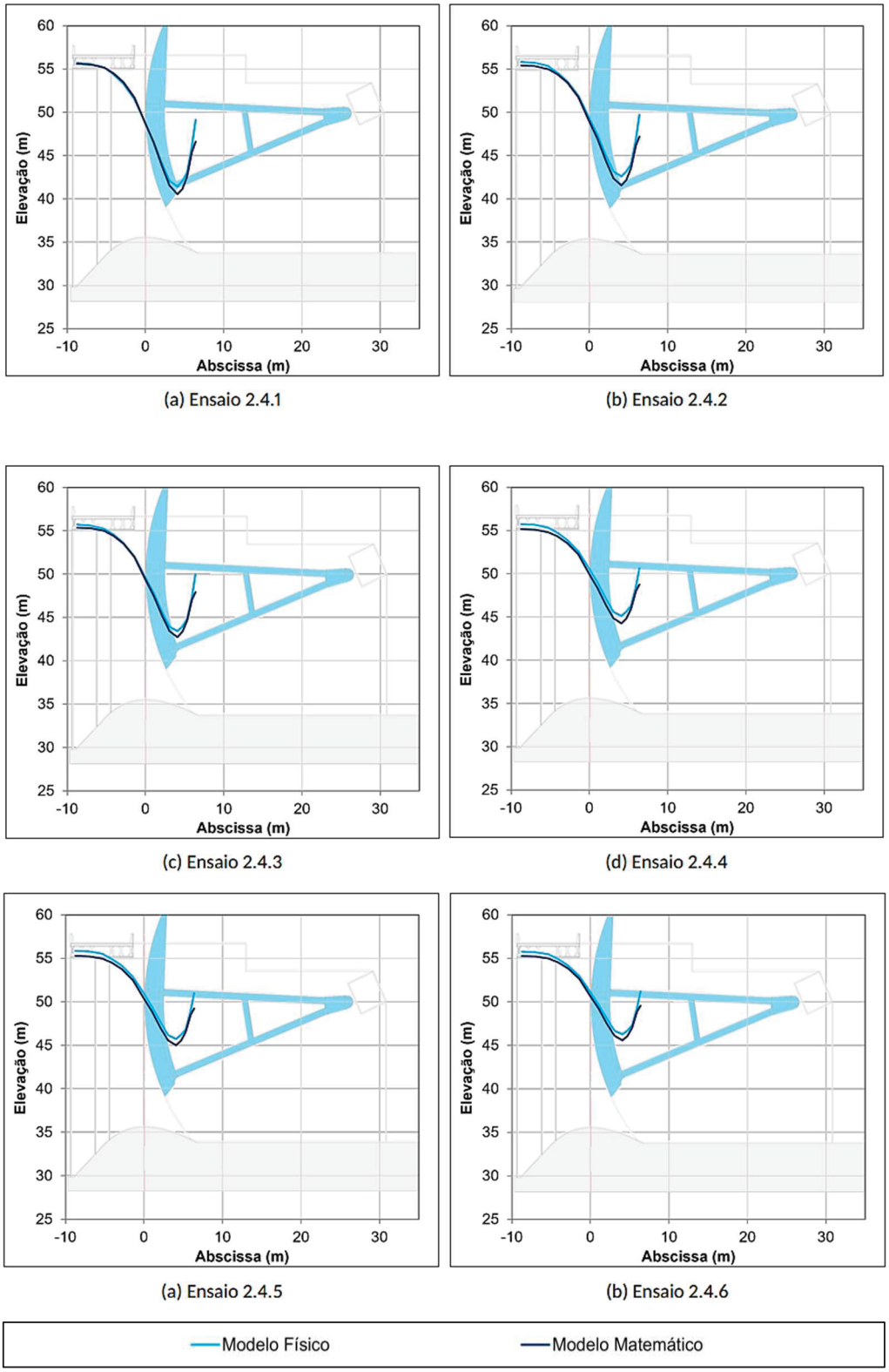
ANEXO 9 – COMPARATIVO DAS PRESSÕES MÉDIAS E INSTANTÂNEAS – ALTERNATIVA 1

FIGURA 1 – PRESSÕES MÉDIAS – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M

Abertura 2 m

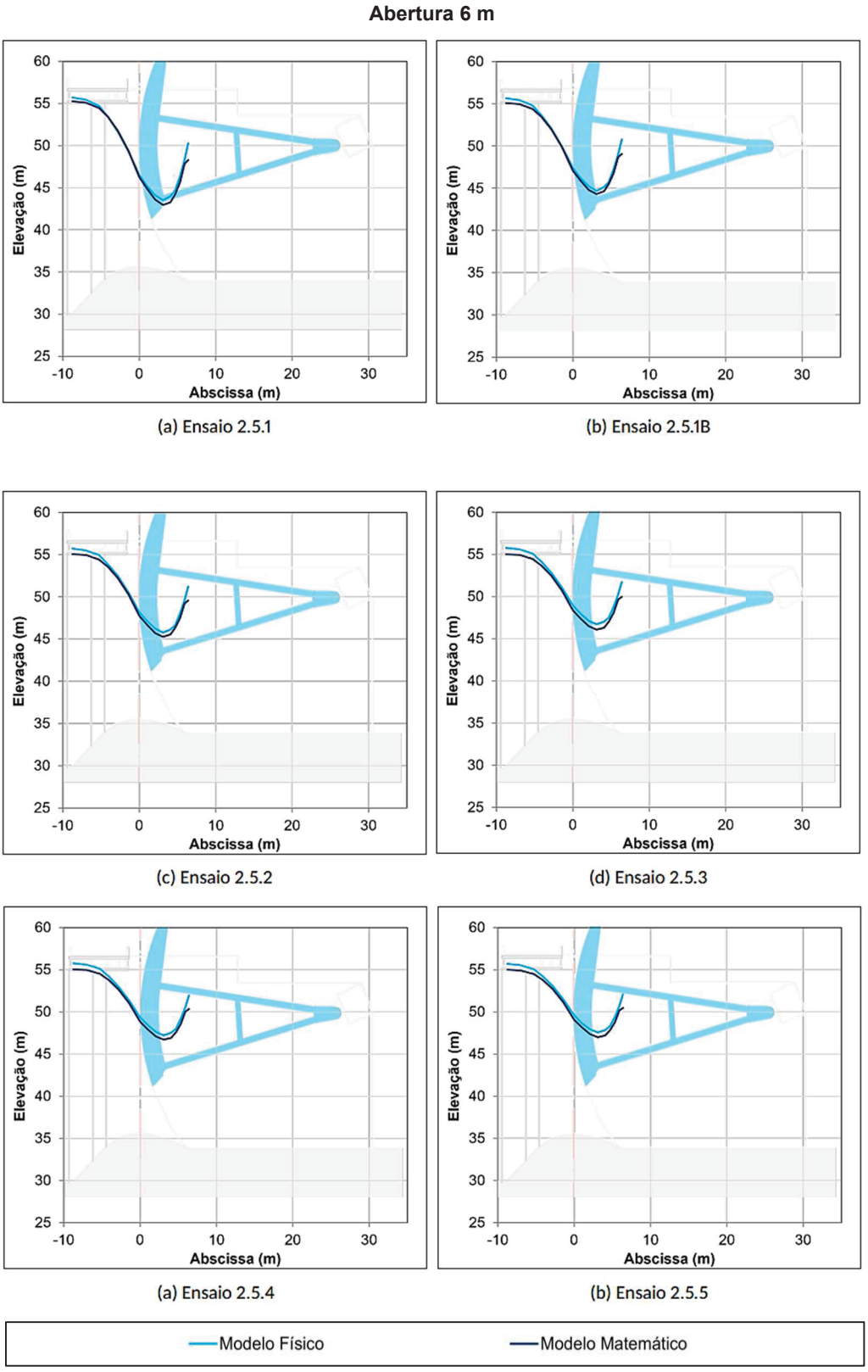


Abertura 4m

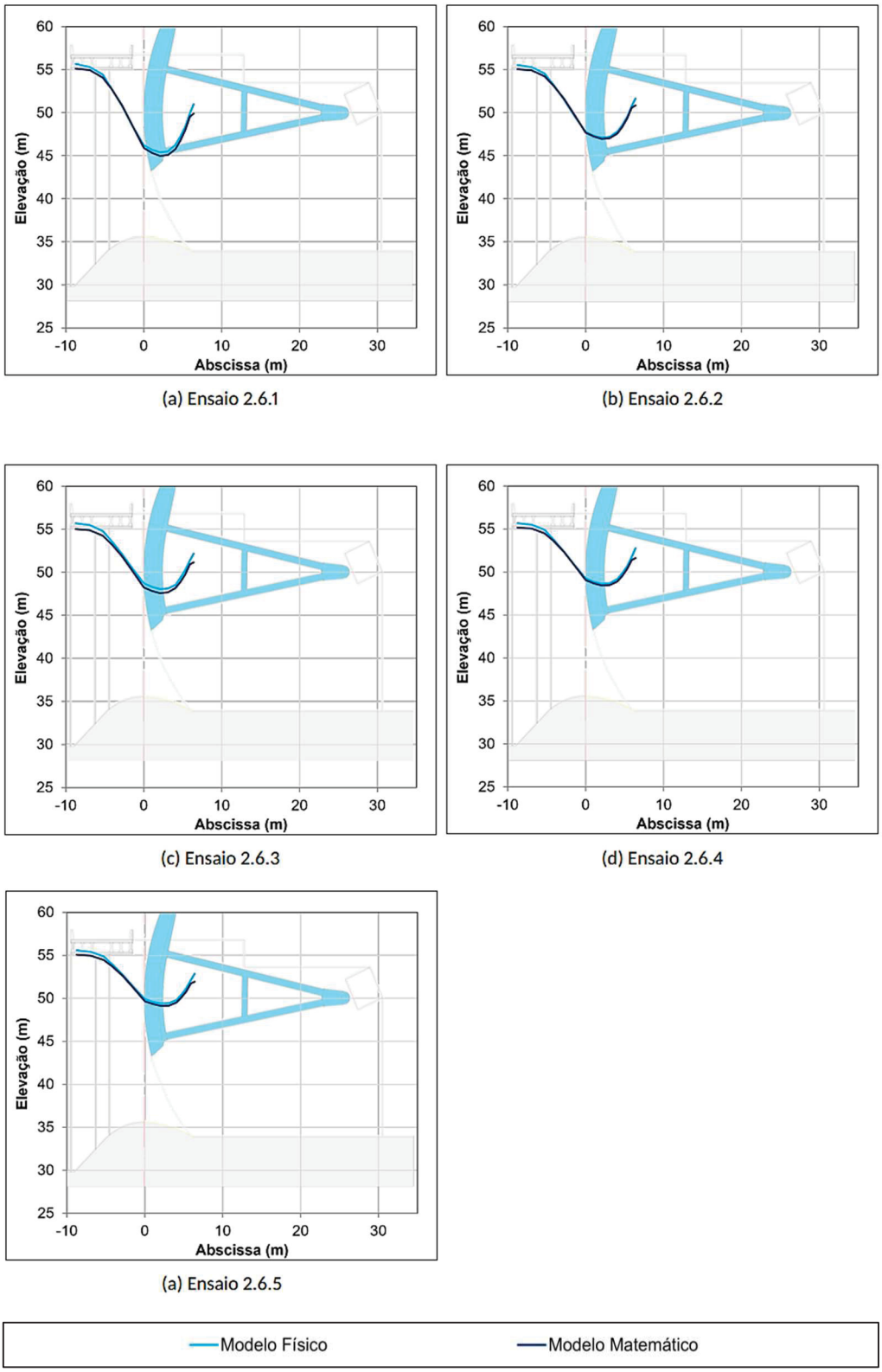


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – PRESSÕES MÉDIAS – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M



Abertura 8 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 3 – PRESSÕES INSTANTÂNEAS – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M

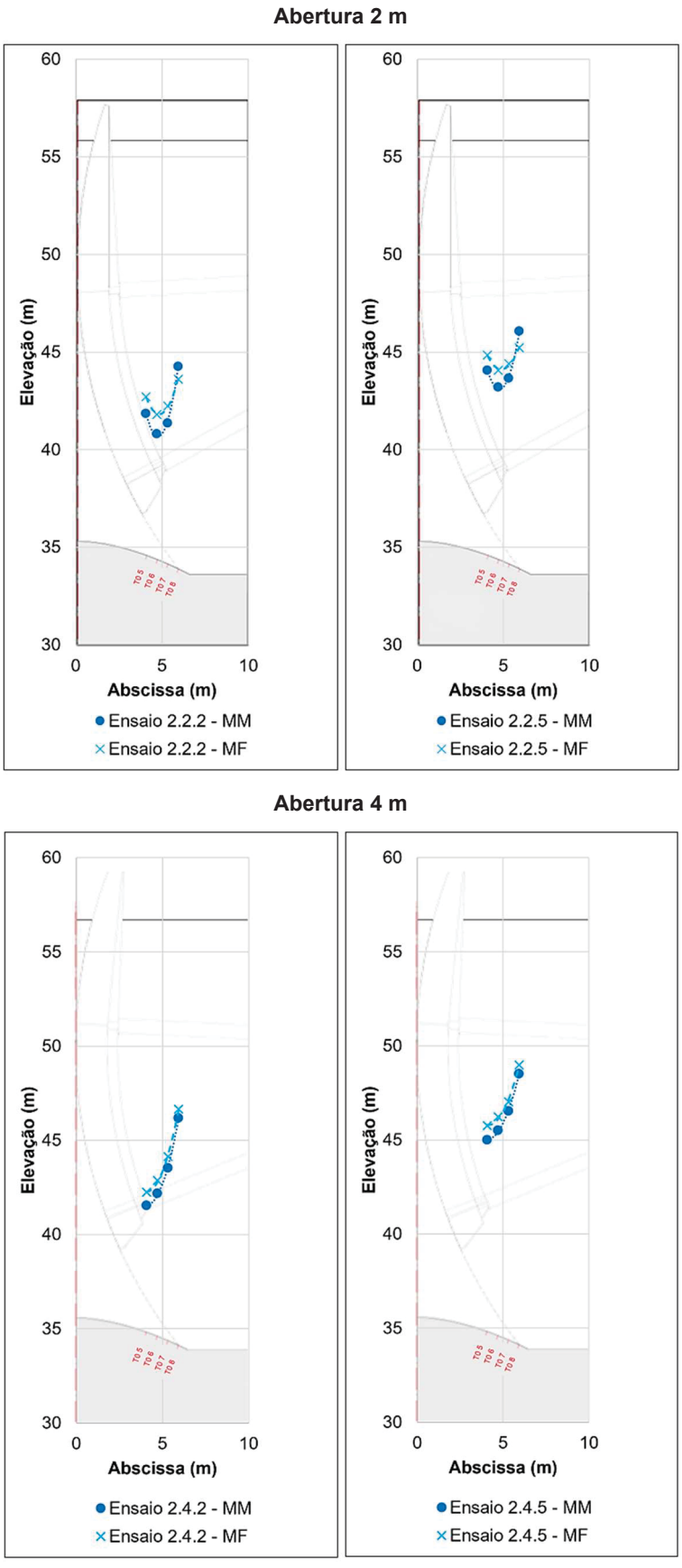
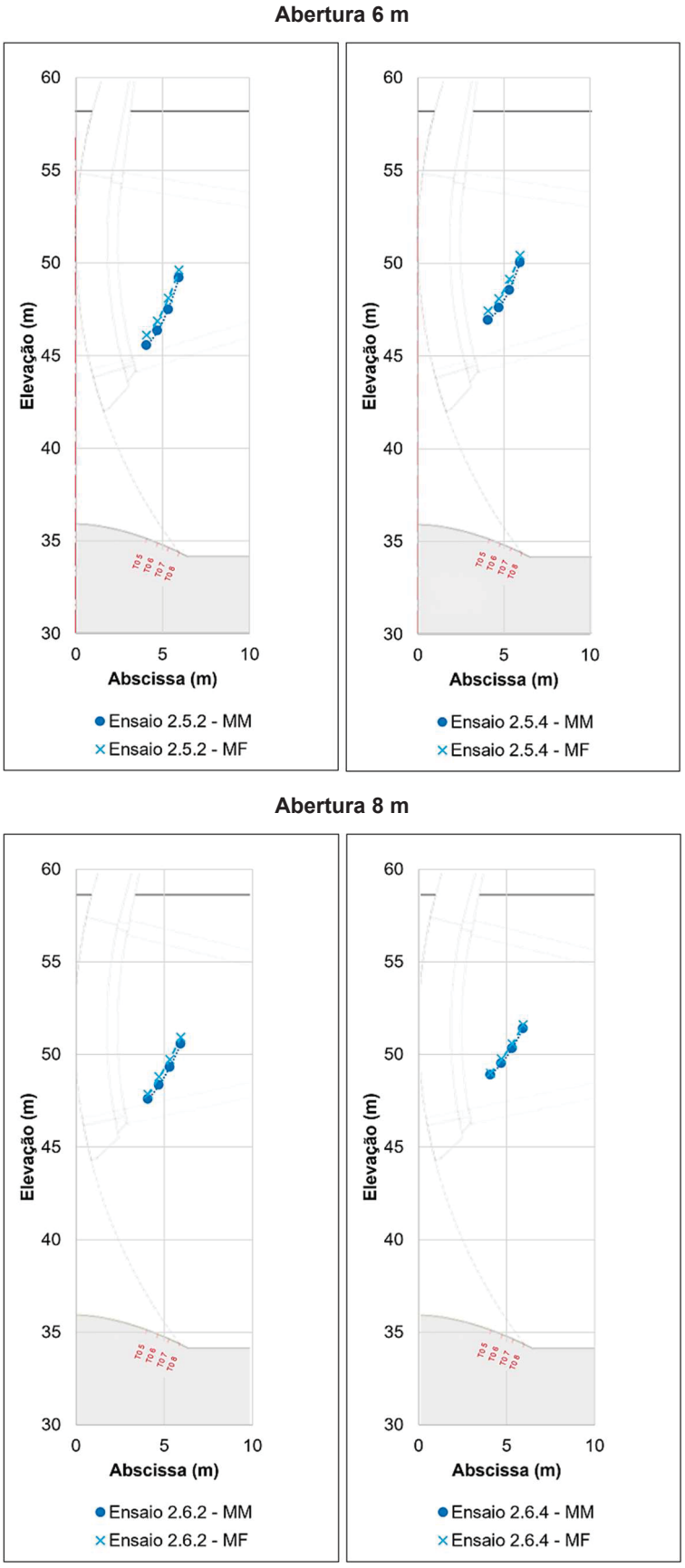
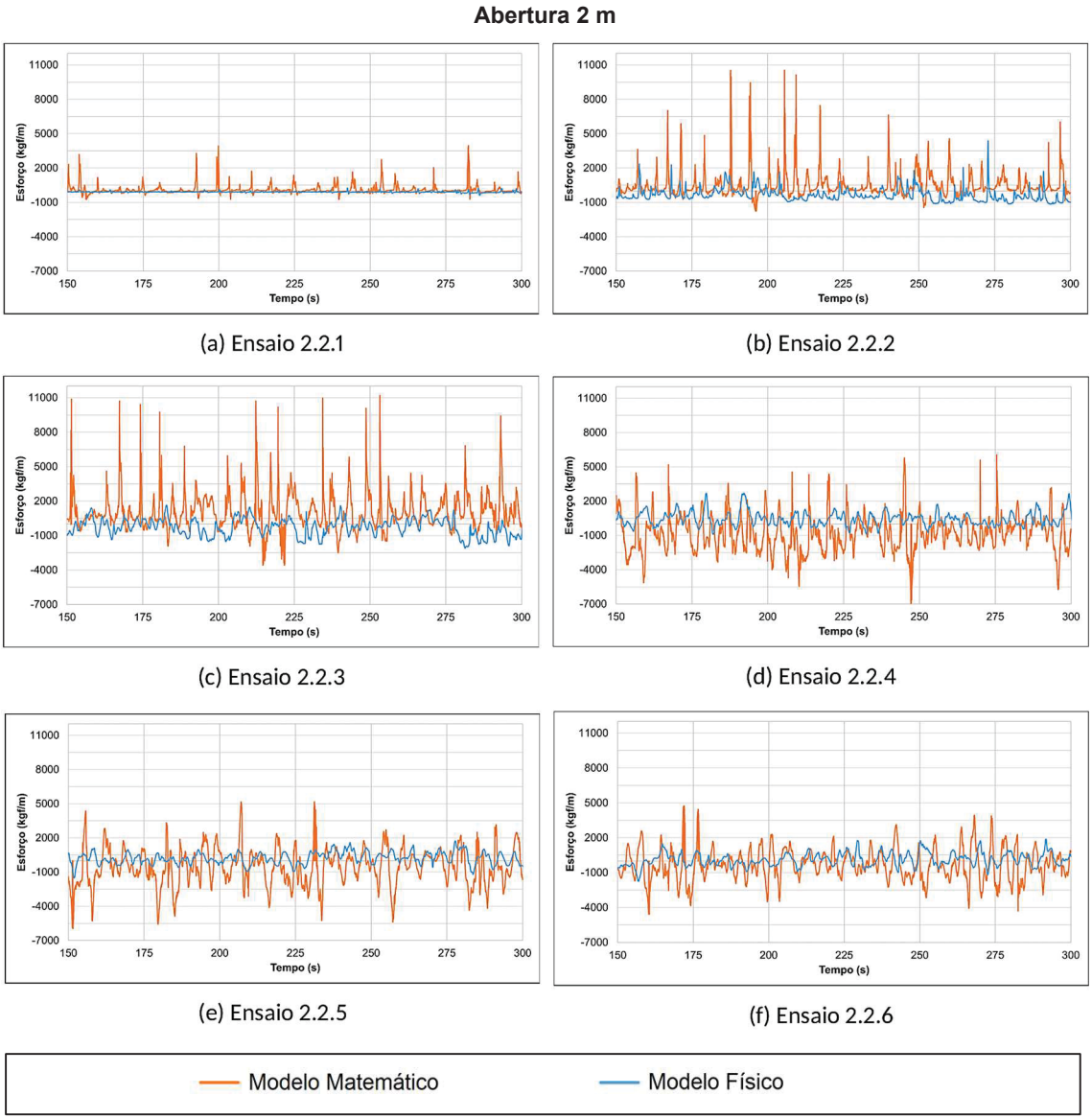


FIGURA 4 – PRESSÕES INSTANTÂNEAS – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M

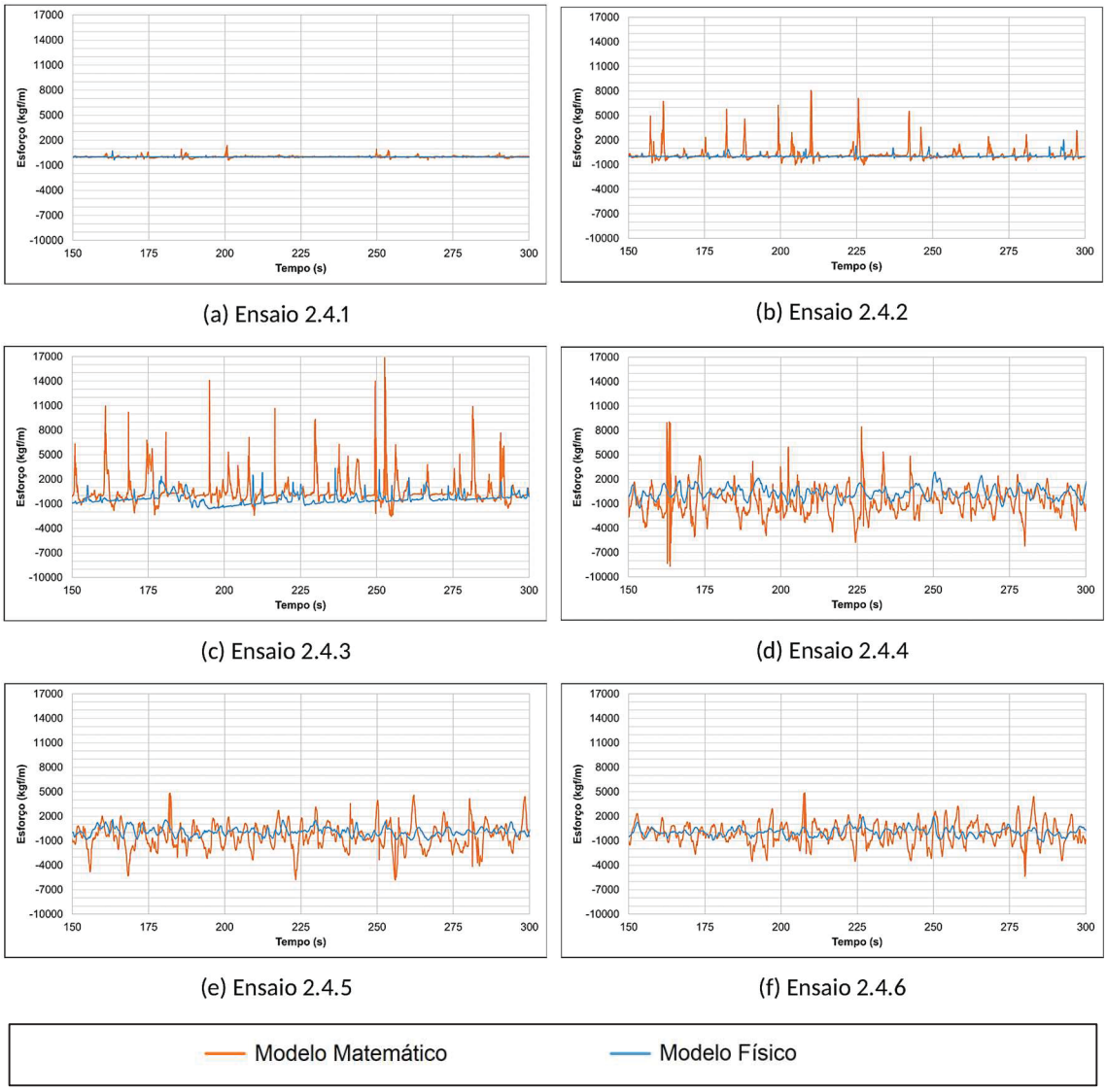


ANEXO 10 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 1

FIGURA 1 – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M



Abertura 4 m



(a) Ensaio 2.4.1

(b) Ensaio 2.4.2

(c) Ensaio 2.4.3

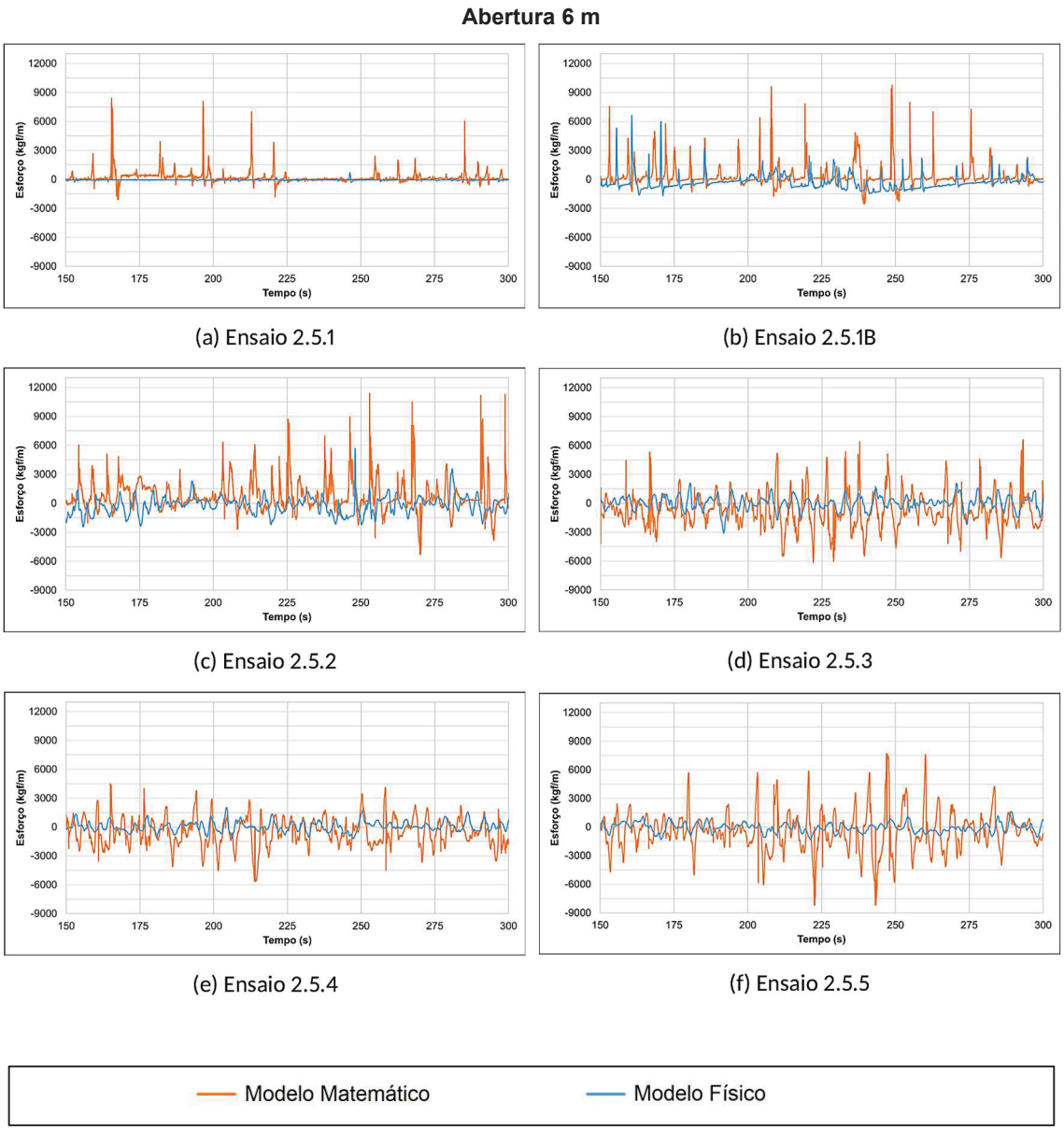
(d) Ensaio 2.4.4

(e) Ensaio 2.4.5

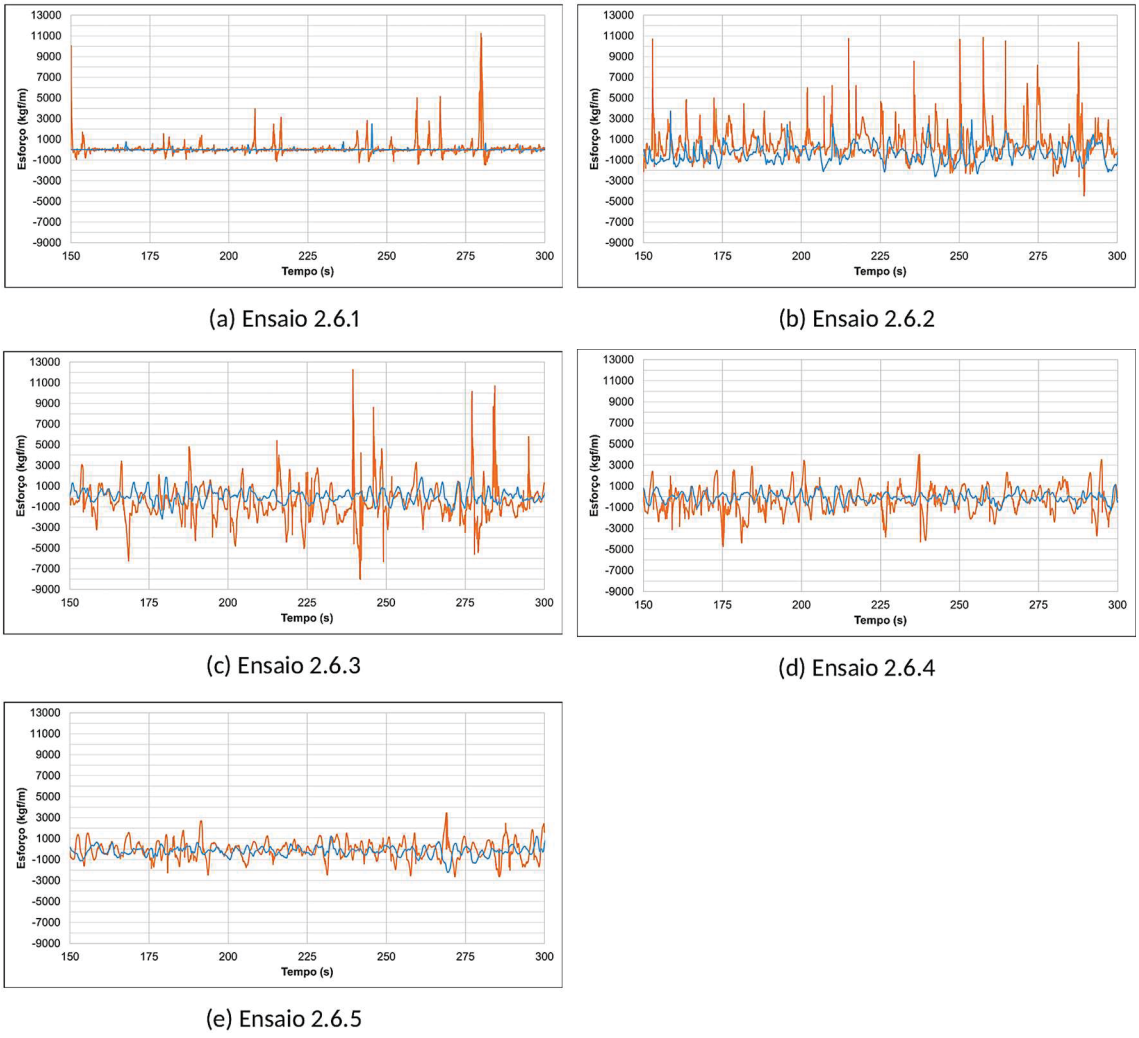
(f) Ensaio 2.4.6

FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M



Abertura 8 m



(a) Ensaio 2.6.1

(b) Ensaio 2.6.2

(c) Ensaio 2.6.3

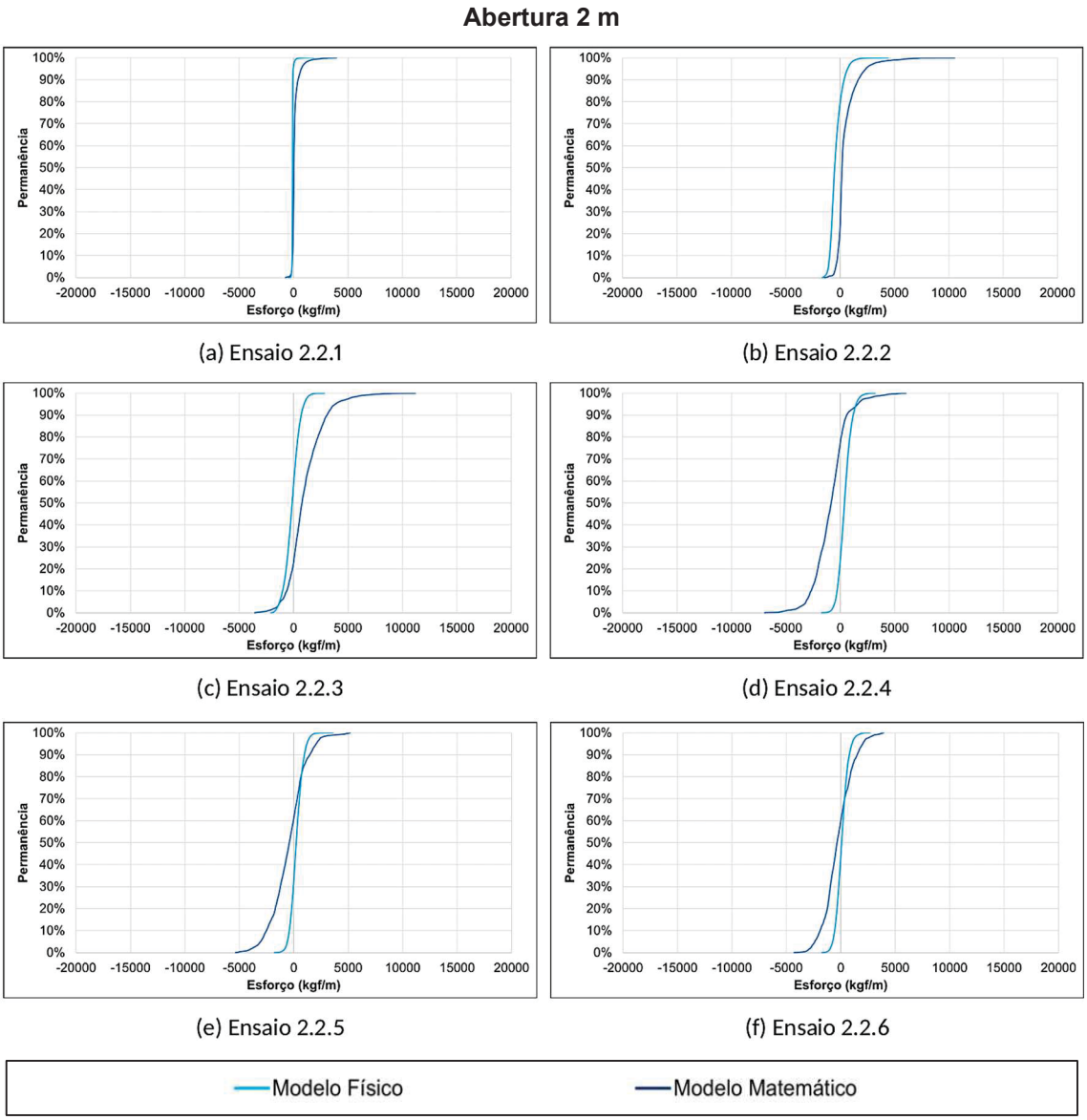
(d) Ensaio 2.6.4

(e) Ensaio 2.6.5

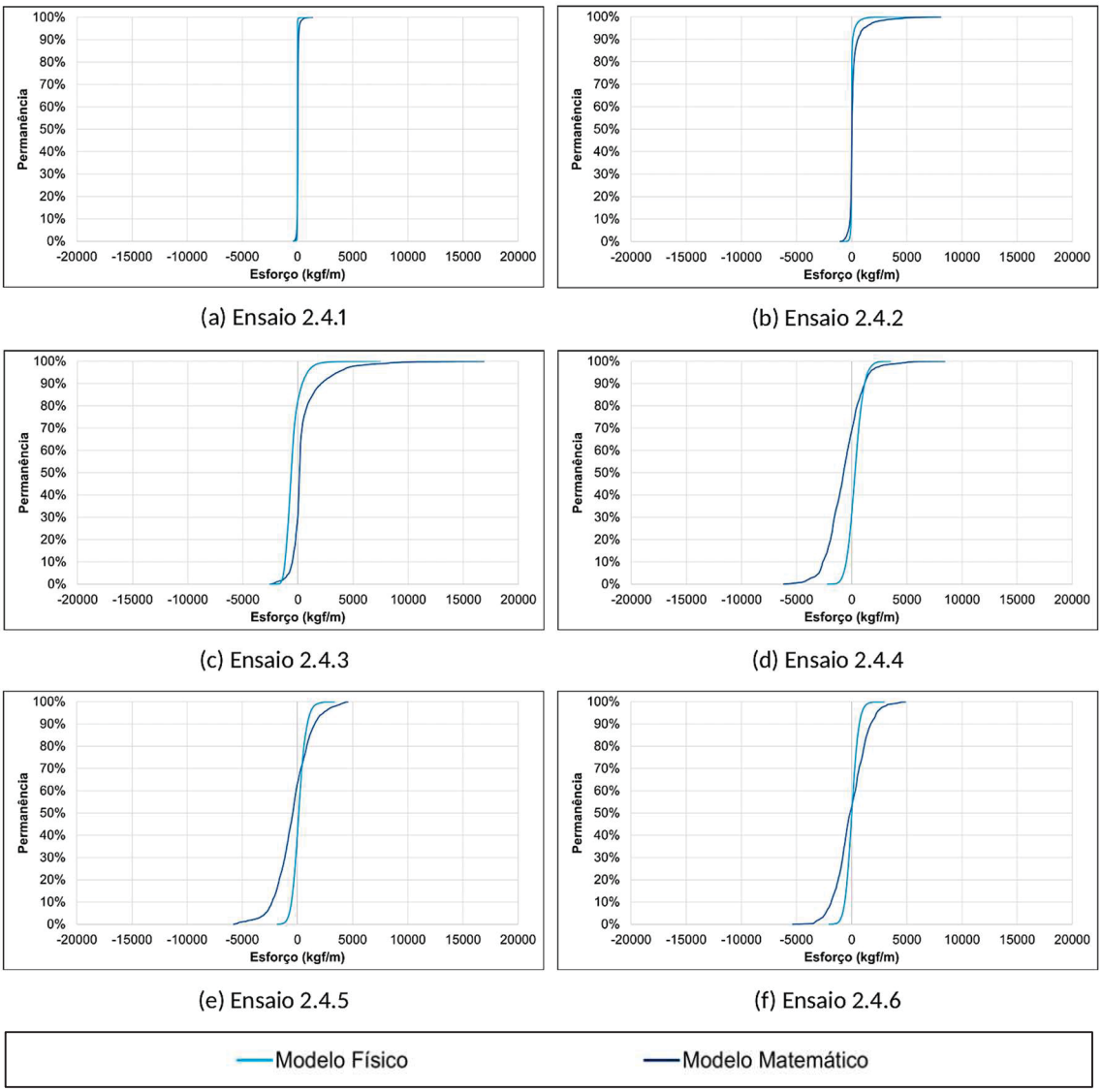
FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

ANEXO 11 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA1

FIGURA 1 – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M

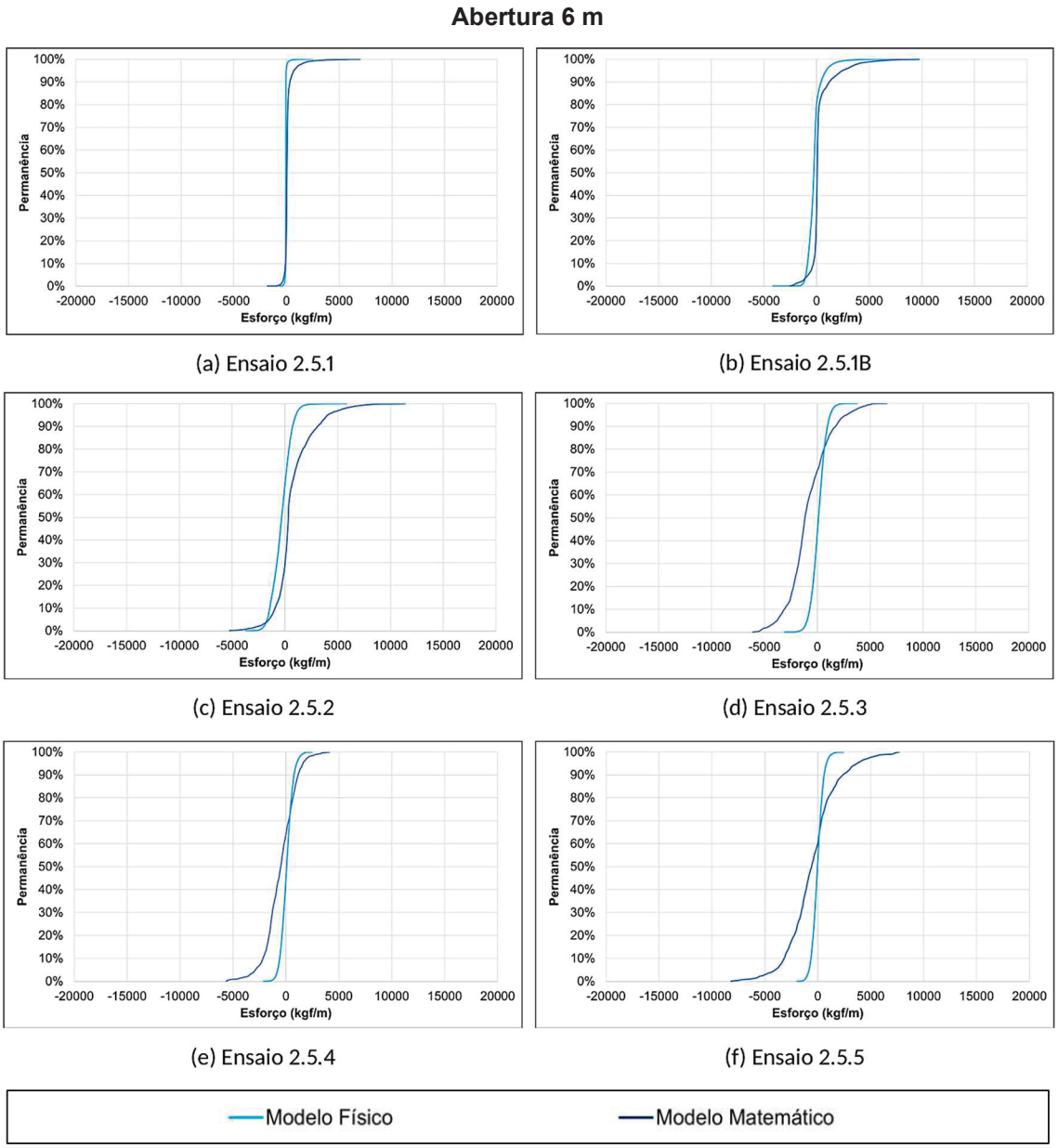


Abertura 4 m

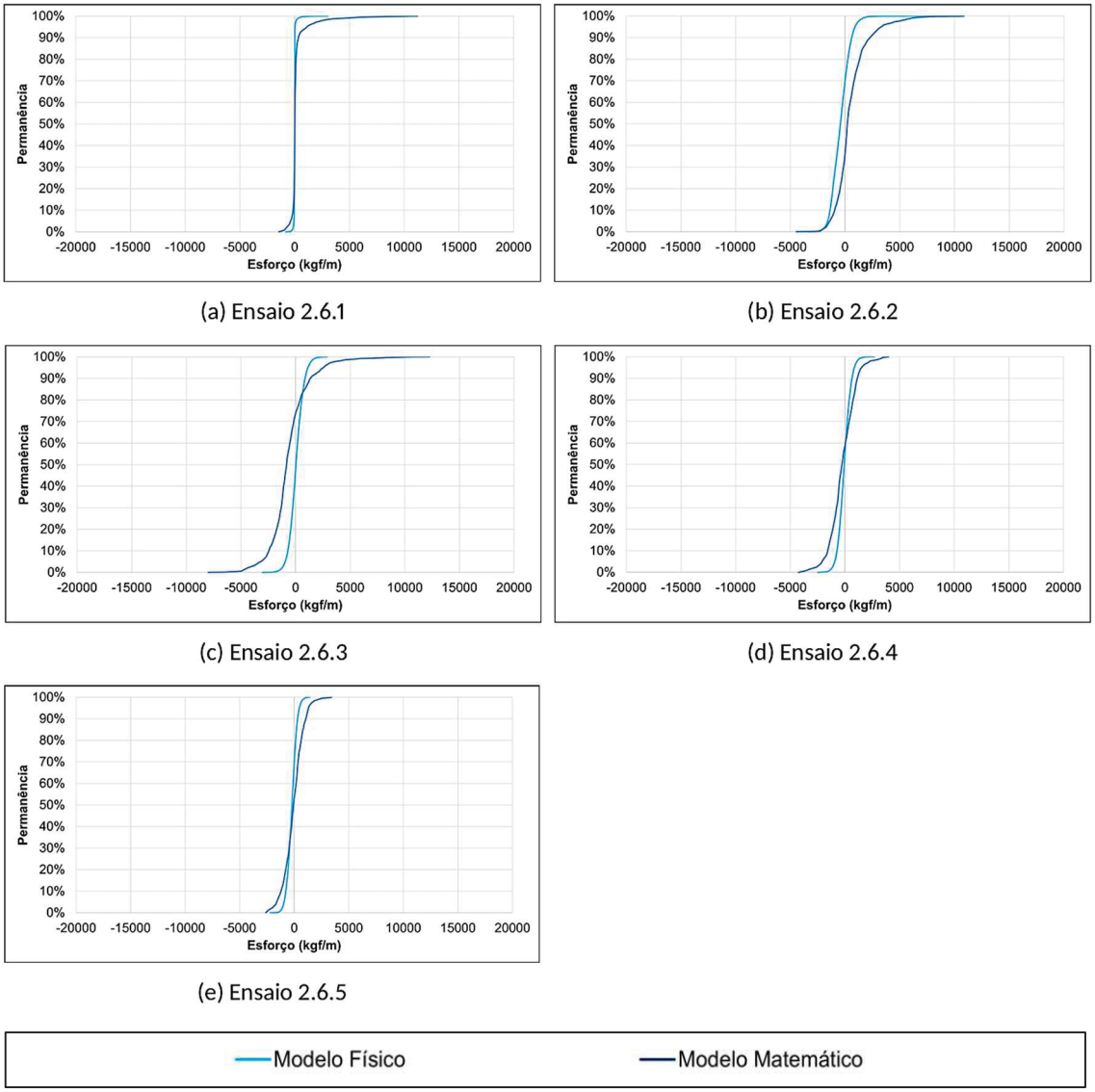


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – ALTERNATIVA 1 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M



Abertura 8 m

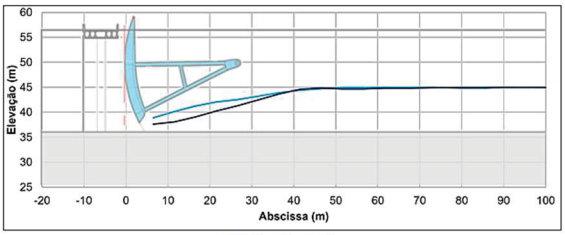


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

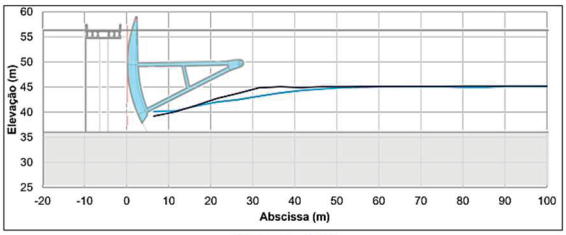
ANEXO 12 – COMPARATIVO DOS PERFIS DE LINHA DE ÁGUA – ALTERNATIVA 2

FIGURA 1 – ALTERNATIVA 2 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M

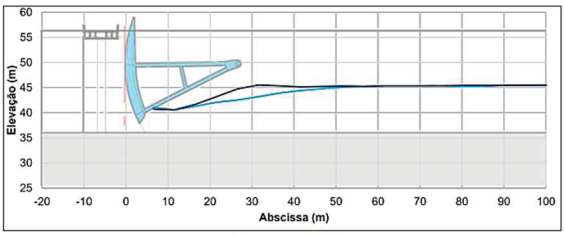
Abertura 2 m



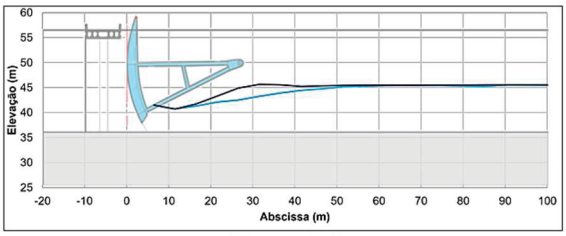
(a) Ensaio 3.2.1



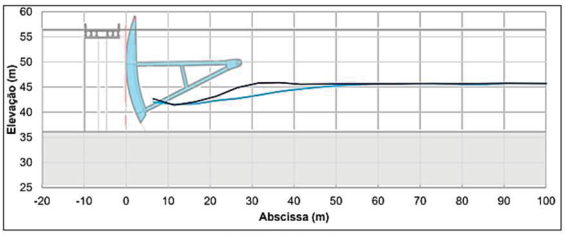
(b) Ensaio 3.2.2



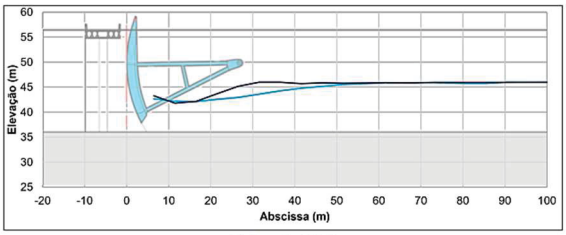
(c) Ensaio 3.2.3



(d) Ensaio 3.2.4

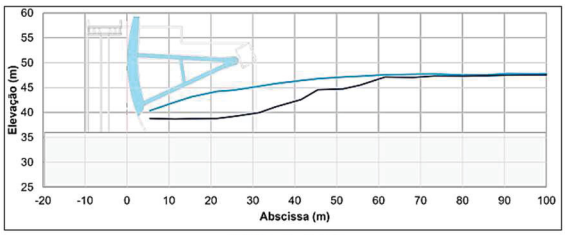


(e) Ensaio 3.2.5

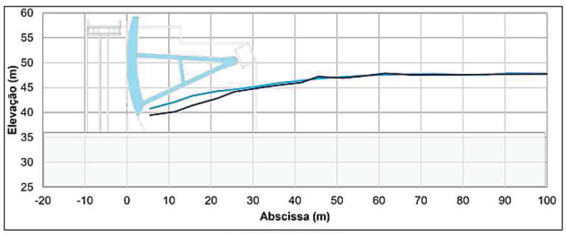


(f) Ensaio 3.2.6

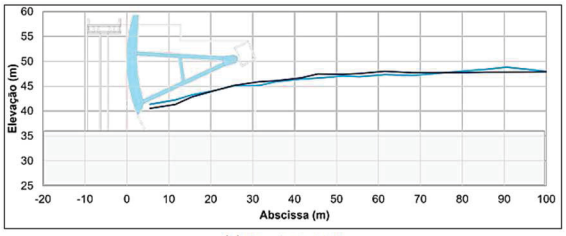
Abertura 4 m



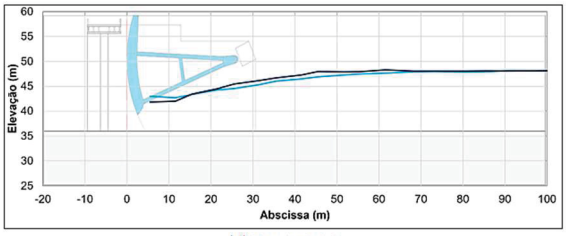
(a) Ensaio 3.4.1



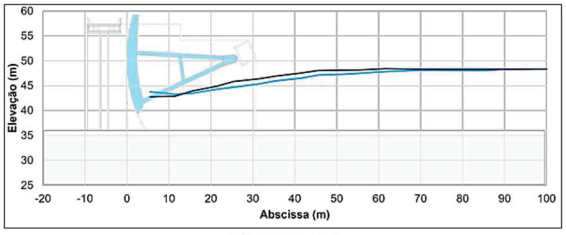
(b) Ensaio 3.4.2



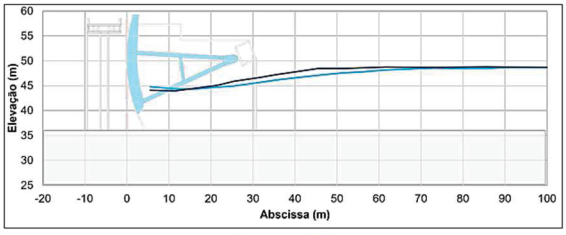
(c) Ensaio 3.4.2B



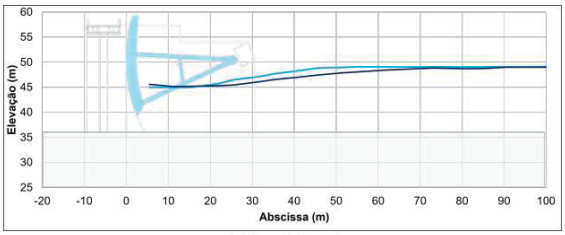
(d) Ensaio 3.4.3



(e) Ensaio 3.4.4



(f) Ensaio 3.4.5

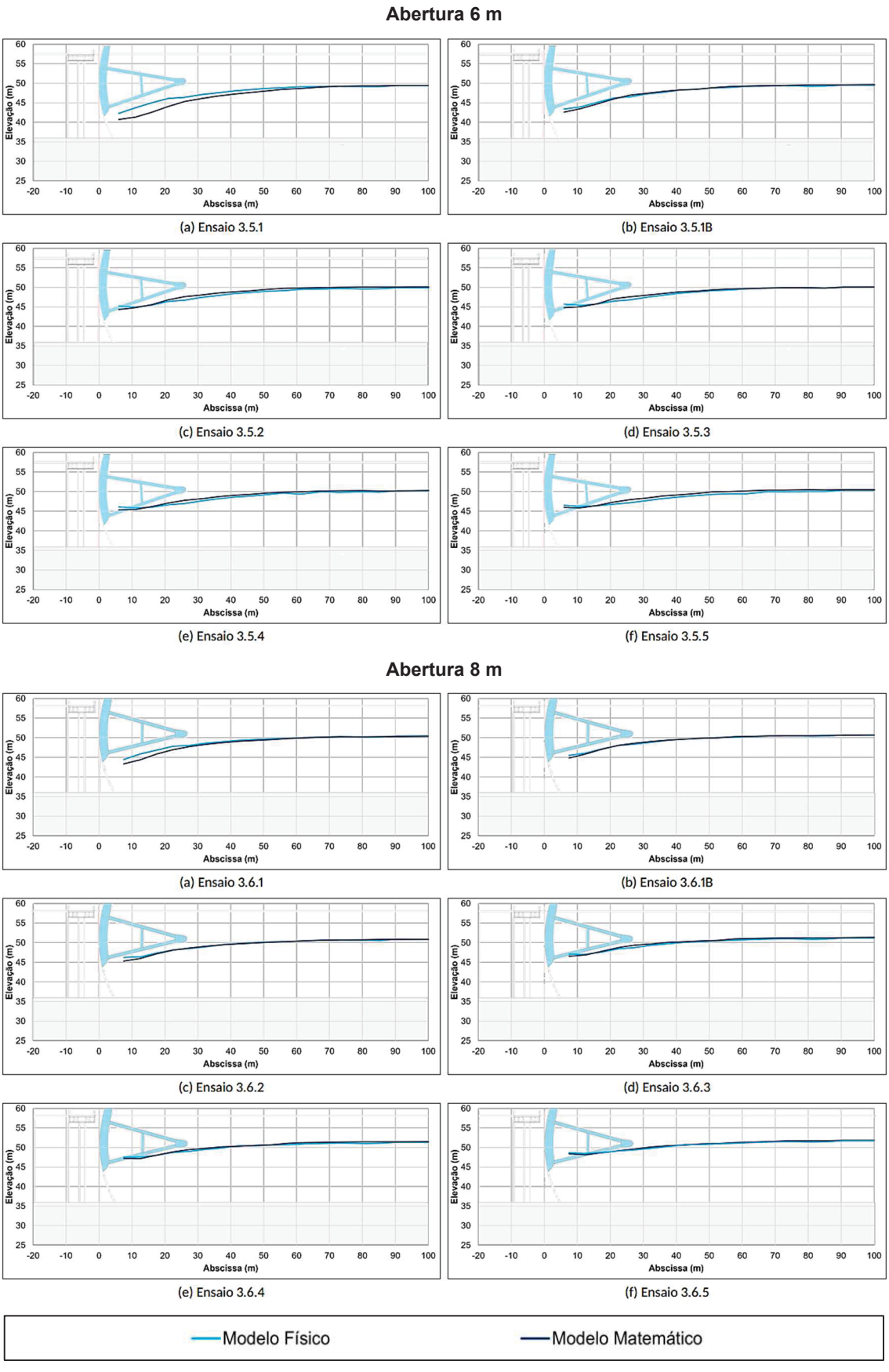


(a) Ensaio 3.4.6

Modelo Físico — Modelo Matemático

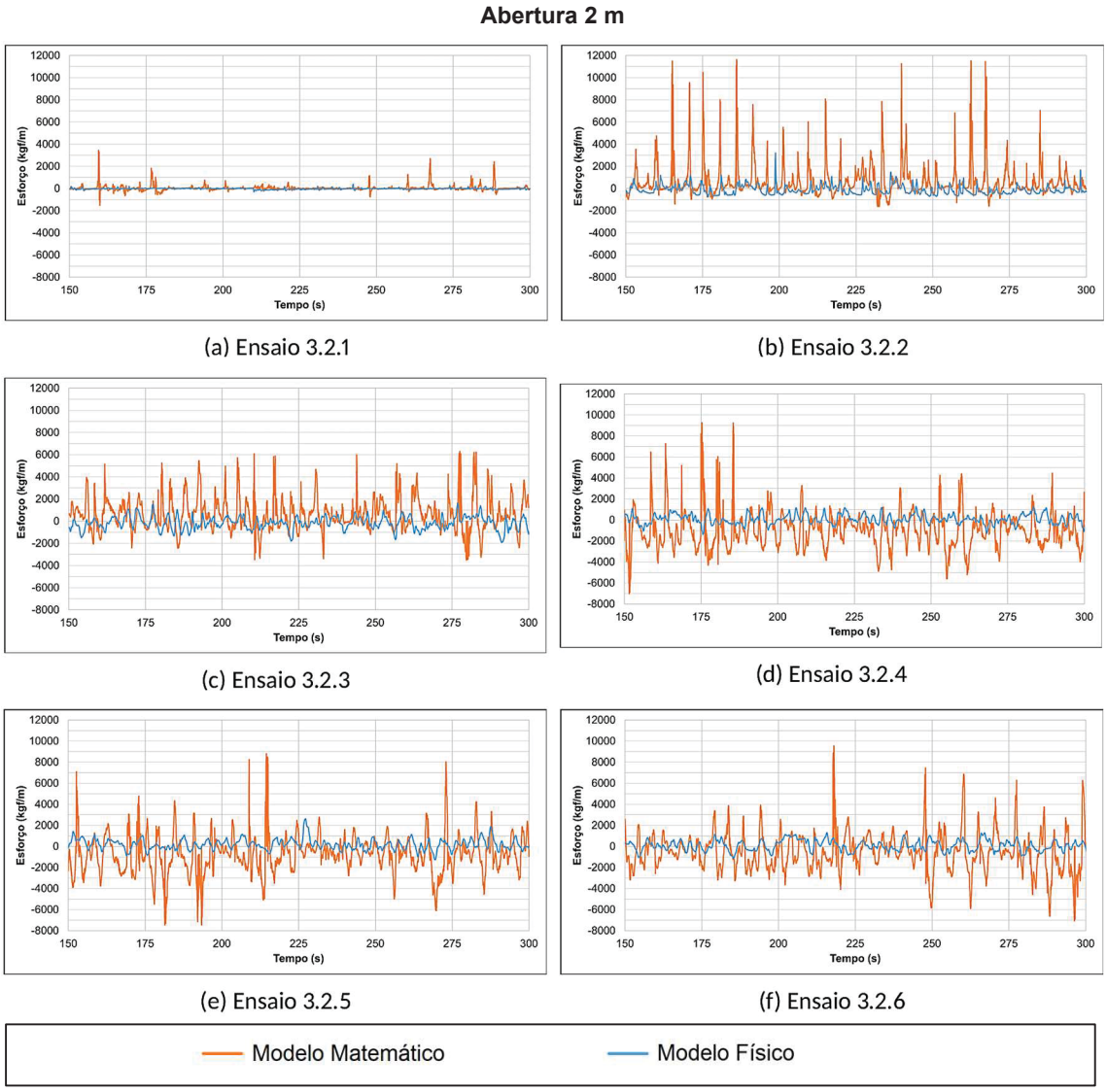
FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – ALTERNATIVA 2 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M

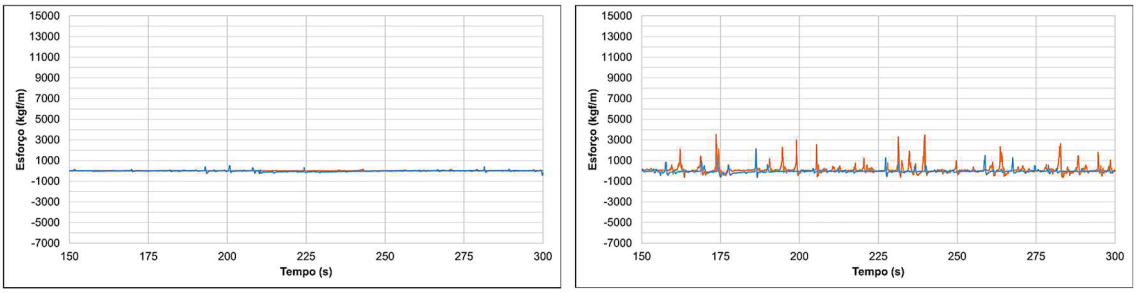


ANEXO 13 – COMPARATIVO DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2

FIGURA 1 – ALTERNATIVA 2 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M

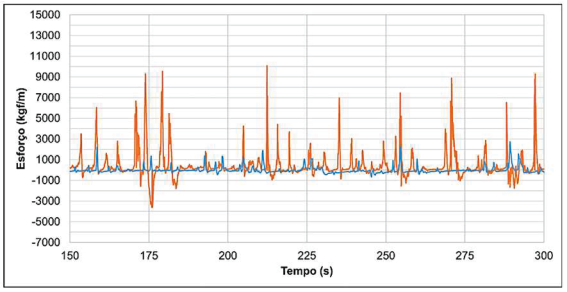


Abertura 4 m

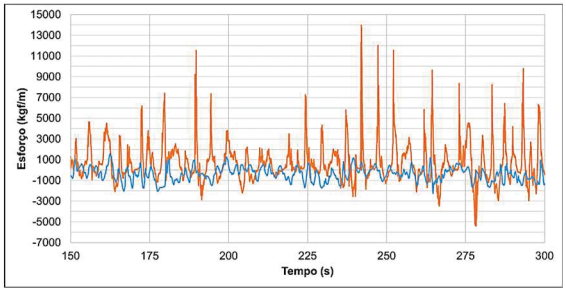


(a) Ensaio 3.4.1

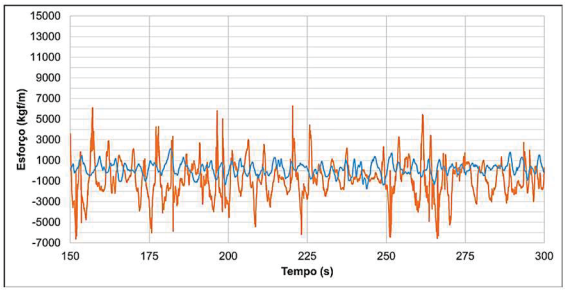
(b) Ensaio 3.4.2



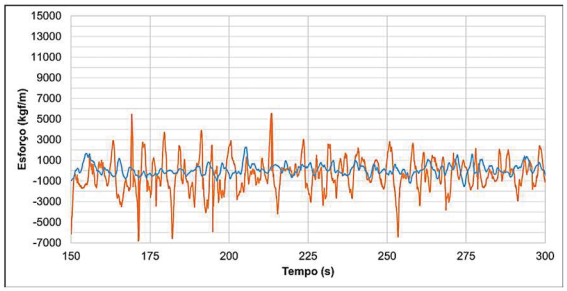
(c) Ensaio 3.4.2B



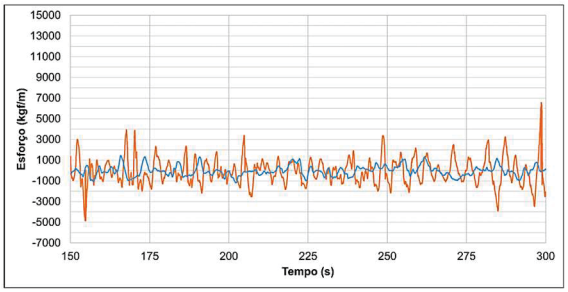
(d) Ensaio 3.4.3



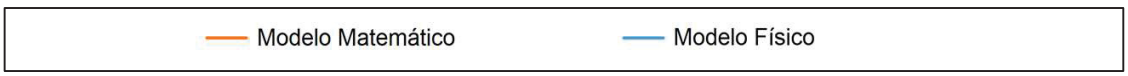
(e) Ensaio 3.4.4



(f) Ensaio 3.4.5

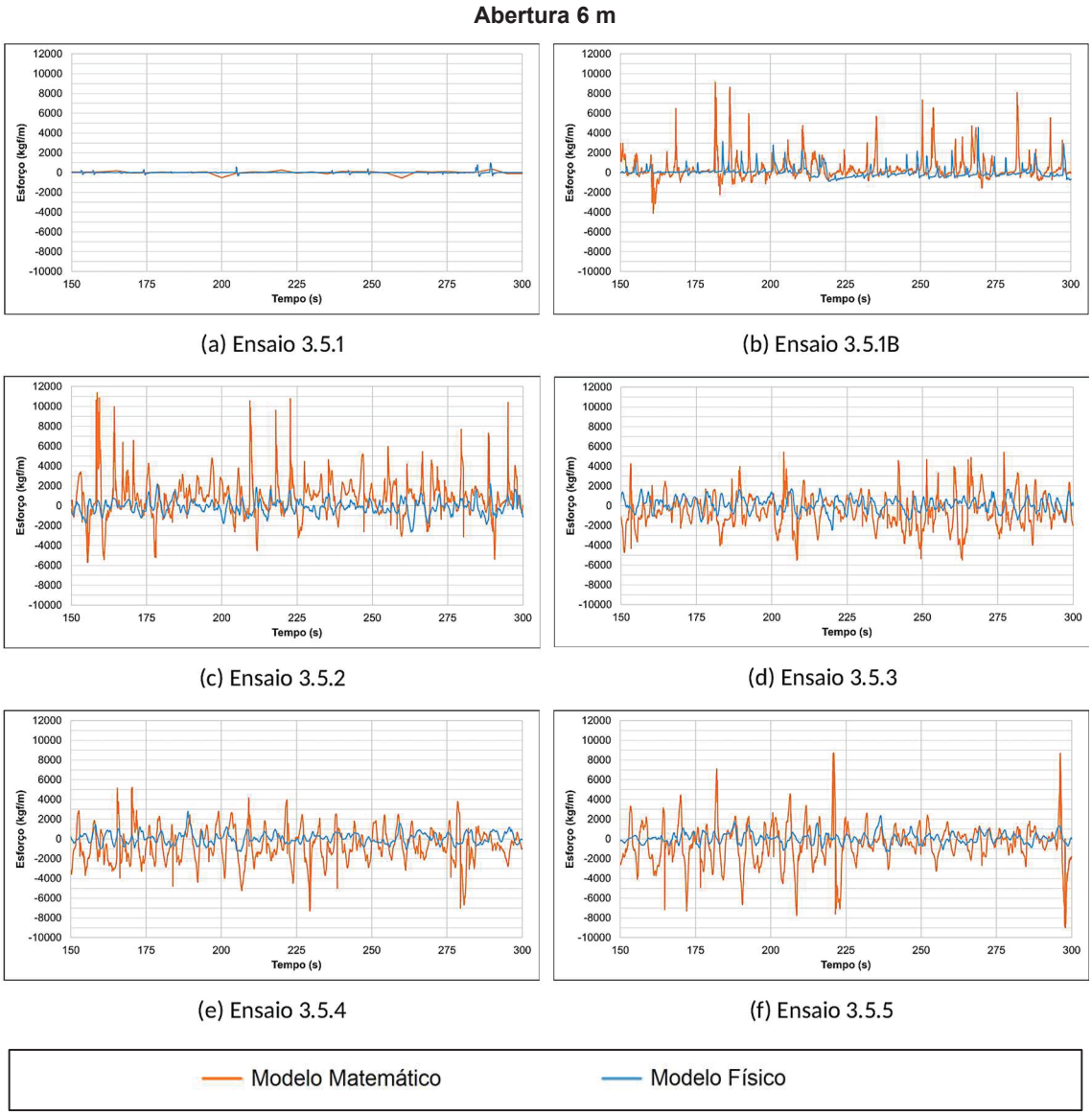


(g) Ensaio 3.4.6

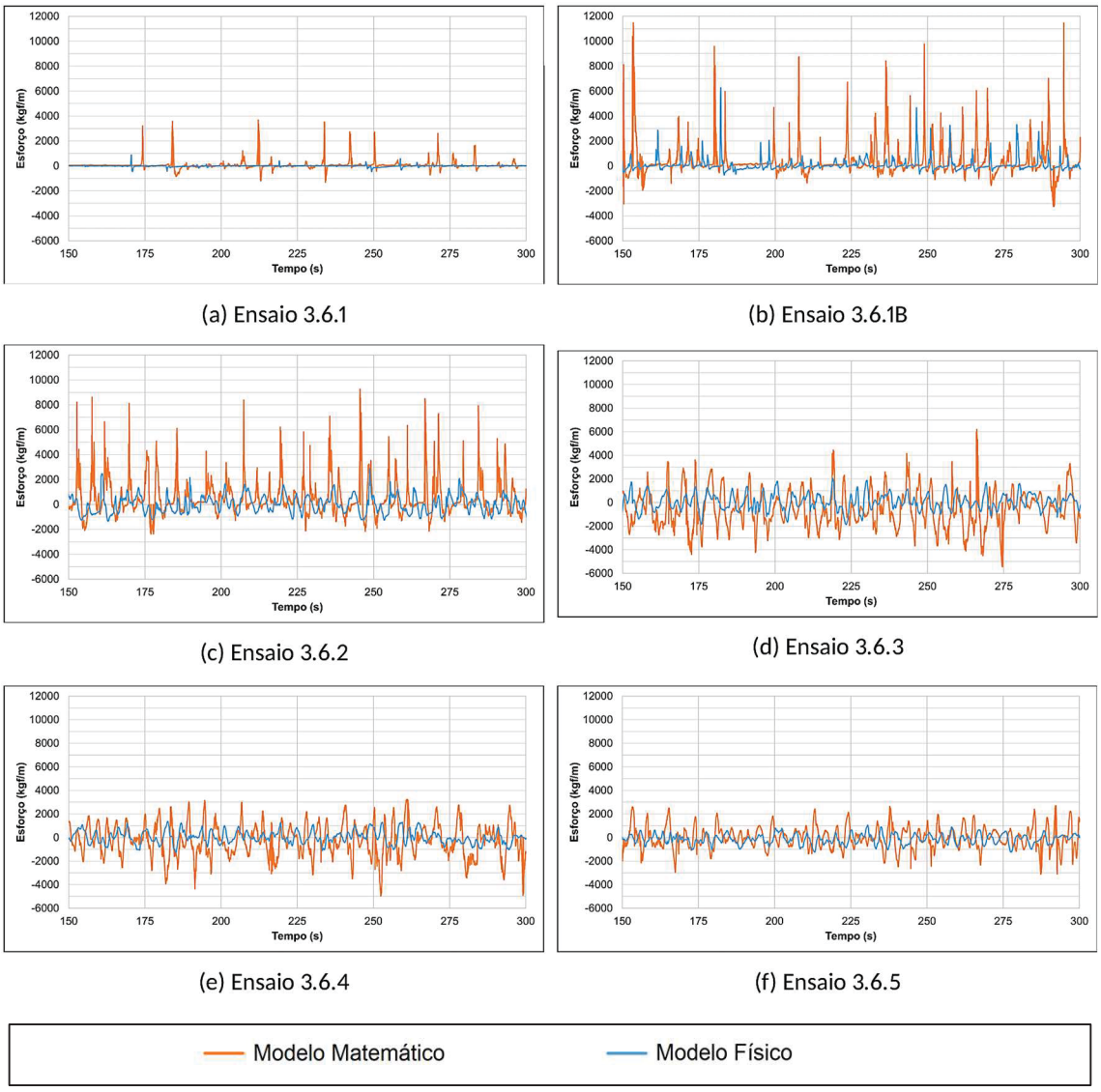


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – ALTERNATIVA 2 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M



Abertura 8 m

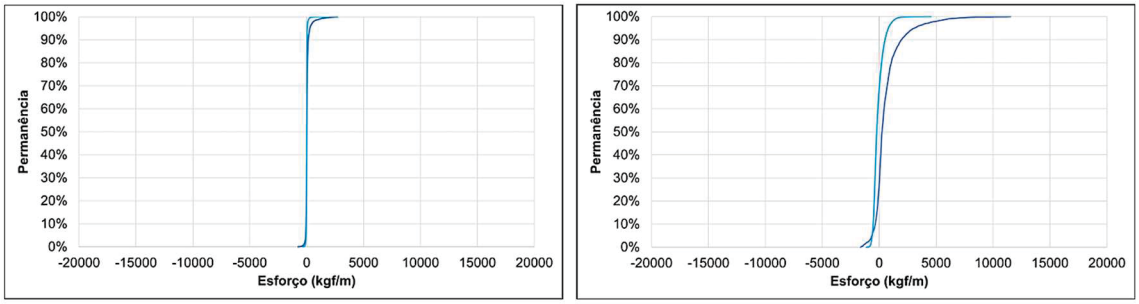


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

ANEXO 14 – COMPARATIVO DAS CURVAS DE PERMANÊNCIA DOS ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS – ALTERNATIVA 2

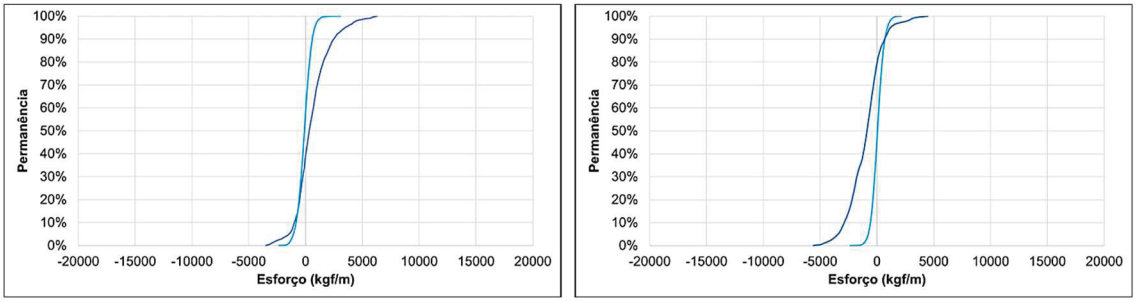
FIGURA 1 – ALTERNATIVA 2 – ABERTURAS DE 2 M E 4 M

Abertura 2 m



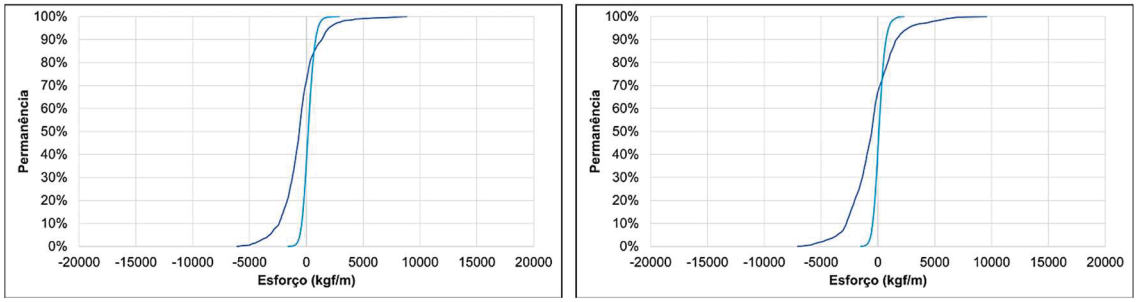
(a) Ensaio 3.2.1

(b) Ensaio 3.2.2



(c) Ensaio 3.2.3

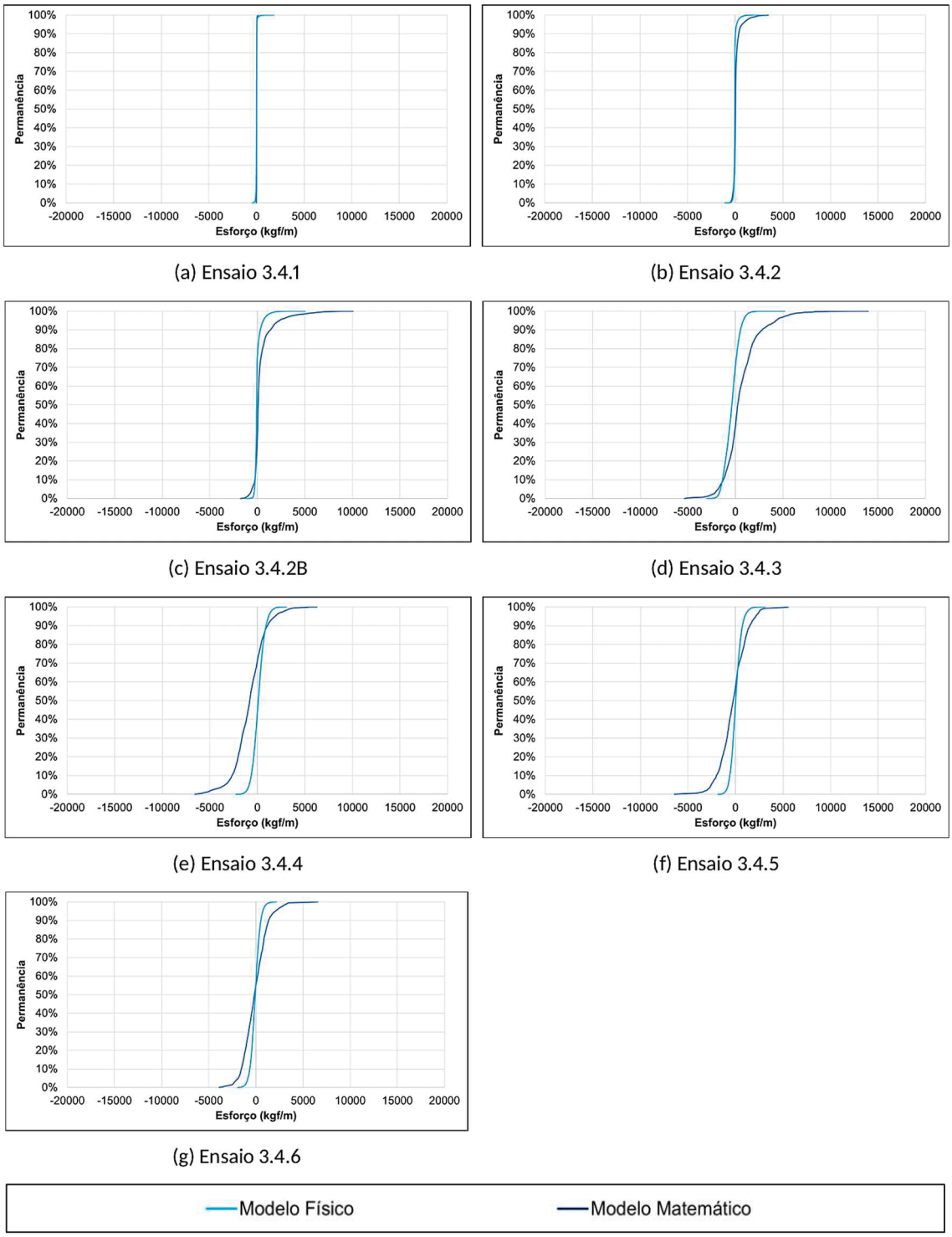
(d) Ensaio 3.2.4



(e) Ensaio 3.2.5

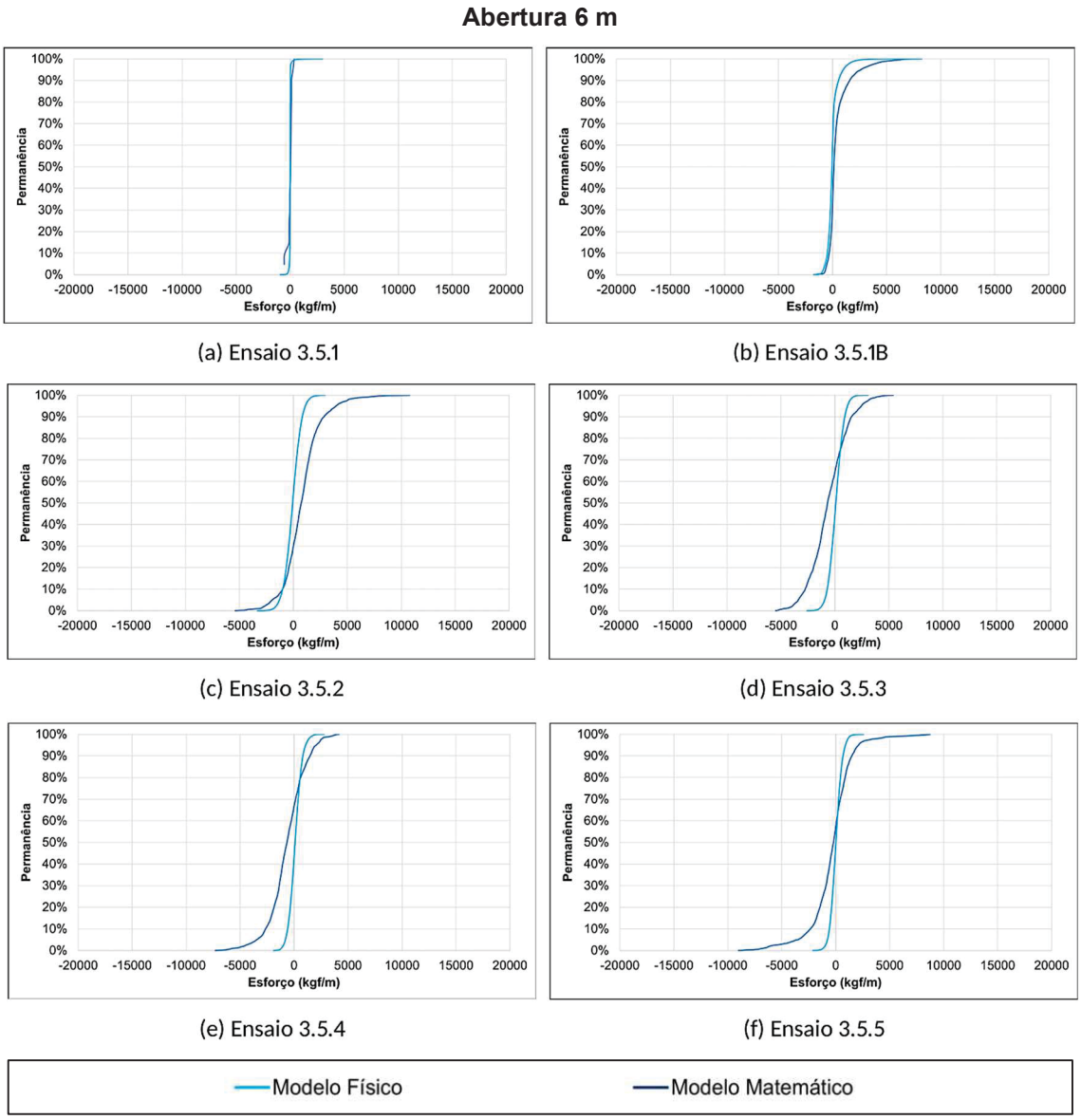
(f) Ensaio 3.2.6

Abertura 4 m

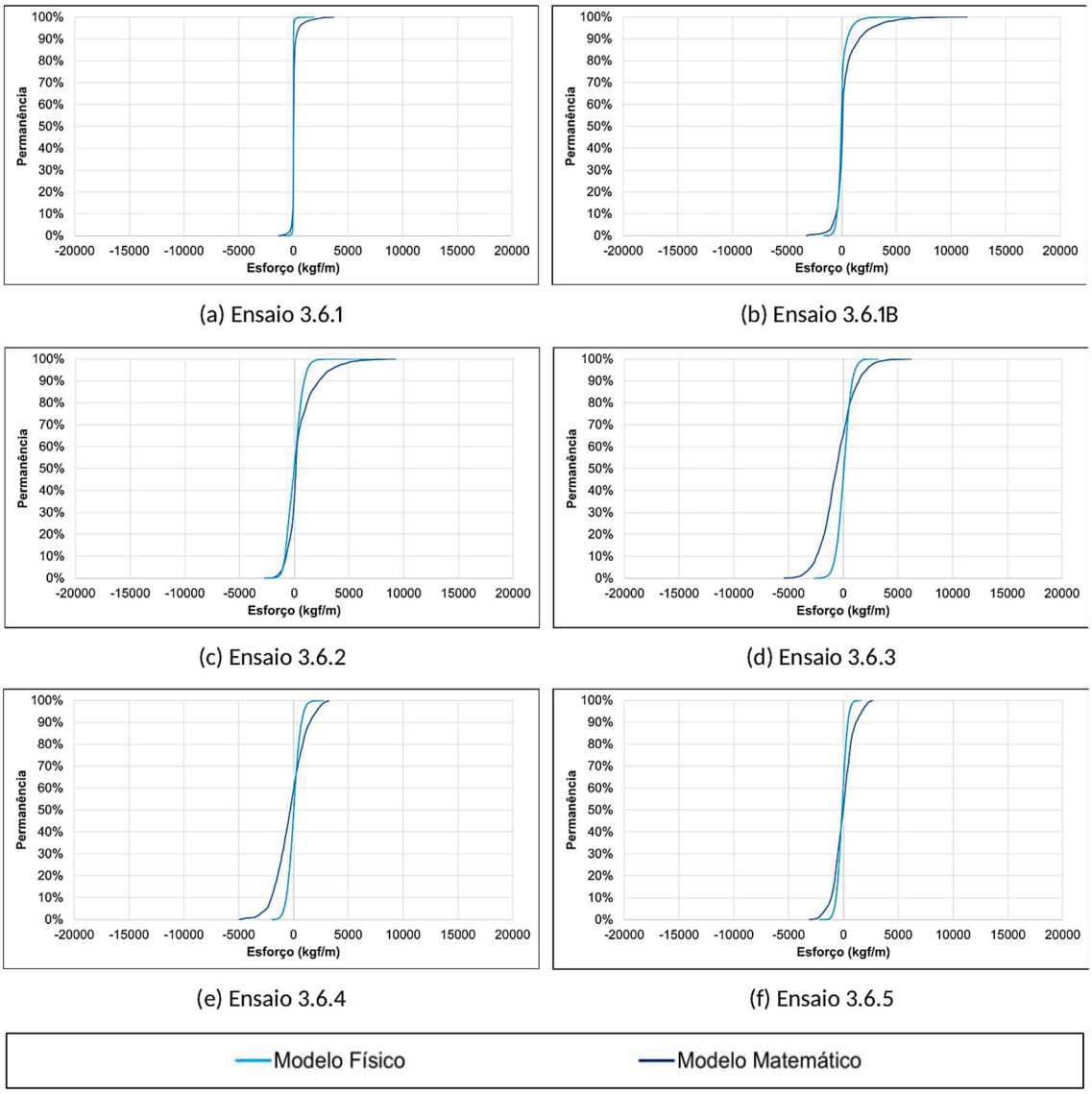


FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).

FIGURA 2 – ALTERNATIVA 2 – ABERTURAS DE 6 M E 8 M



Abertura 8 m



FONTE: Adaptado de PD-06491-0445/2017 (2023).