

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

ESTUDO DE UMA DESCIDA DE ÁGUA
MODULAR POR MEIO DE MODELO FÍSICO
REDUZIDO E CFD

Felipe Ângelo Neves Campera

Belo Horizonte

2020

**ESTUDO DE UMA DESCIDA DE ÁGUA
MODULAR POR MEIO DE MODELO FÍSICO
REDUZIDO E CFD**

Felipe Ângelo Neves Campera

Felipe Ângelo Neves Campera

**ESTUDO DE UMA DESCIDA DE ÁGUA
MODULAR POR MEIO DE MODELO FÍSICO
REDUZIDO E CFD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica

Orientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui

Coorientador: Aloysio Portugal Maia Saliba

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2020

C195e Campera, Felipe Ângelo Neves.
Estudo de uma descida de água modular por meio de modelo físico reduzido e CFD [recurso eletrônico] / Felipe Ângelo Neves Campera. – 2020.
1 recurso online (xiv, 138 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Jorge Luis Zegarra Tarqui.
Coorientador: Aloysio Portugal Maia Saliba.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 135-138.
Bibliografia: f. 130-134.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Dinâmica dos fluidos computacional - Teses. 4. Método dos elementos finitos - Teses. 5. Método dos volumes finitos - Teses. 6. Estruturas hidráulicas - Teses. I. Zegarra Tarqui, Jorge Luis. II. Saliba, Aloysio Portugal Maia. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

[ESCOLA DE ENGENHARIA]

COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

["ESTUDO DE UMA DESCIDA DE ÁGUA MODULAR POR MEIO DE MODELO FÍSICO REDUZIDO E CFD "]

[FELIPE ANGELO NEVES CAMPERA]

Dissertação de Mestrado] defendida e aprovada, no dia [30 de novembro de 2020], pela Banca Examinadora designada pelo [Colegiado do Programa de Pós-Graduação **EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**] da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

[Prof. Dr. José Carlos Cesar Amorim] - Membro Externo]

[IME]

[Prof. Éder Daniel Teixeira] - Membro Externo]

[UFRGS]

[Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba - Coorientador]

[UFMG]

[Prof. Jorge Luis Zegarra Tarqui - Orientador]

[UFMG]

APROVADA PELO COLEGIADO DO PPG SMARH

Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima - Coordenadora

Belo Horizonte, 02 de dezembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Aloysio Portugal Maia Saliba, Professor do Magistério Superior**, em 03/12/2020, às 13:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorge Luis Zegarra Tarqui, Membro**, em 03/12/2020, às 14:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eder Daniel Teixeira, Usuário Externo**, em 03/12/2020, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos Cesar Amorim, Usuário Externo**, em 03/12/2020, às 16:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sonaly Cristina Rezende Borges de Lima, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 12/02/2021, às 14:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0452292** e o código CRC **E1DEF805**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

Aos meus pais pela oportunidade de continuar meus estudos, apoio incondicional e moral ensinada durante toda trajetória de vida.

Aos meus orientadores Dr. Jorge Luis Zegarra Tarqui e Dr. Aloysio Portugal Maia Saliba, pela orientação, paciência e conselhos.

Aos professores Dr. Éder Daniel Teixeira (UFRGS) e Dr. José Carlos Amorim (IME) pelas contribuições ao trabalho e avaliação como banca examinadora.

Ao colega doutorando Maurício Guilherme Alves do Reis, por todos os ensinamentos sobre o OpenFOAM®.

Aos profissionais da empresa Mettallforma, Luciano e Aurélio, pelo auxílio no processamento e desenvolvimento do modelo FLOW-3D®, que apesar de ser um modelo tridimensional completo, devido às limitações de computadores disponíveis para este estudo, teve resultados apenas exploratórios para pesquisa. As investigações foram realizadas de forma simplificada bidimensional e tridimensional fina em outros dois *softwares*. Contudo, as demonstrações enriqueceram o trabalho.

Aos professores do EHR, Luiz Rafael Palmier e Francisco Eustáquio Oliveira e Silva, pelos incentivos e auxílio durante a fase das modelagens.

Ao meu irmão, pela amizade.

A minha avó, Helena, pelos ensinamentos e apoio.

A minha noiva, Pollyanna, por todo apoio e incentivo.

Aos funcionários do CPH, Geraldo e Paulinho, por todo apoio na construção do Modelo Físico.

À CAPES, pela concessão de bolsa durante um período do trabalho.

RESUMO

Estruturas hidráulicas de dissipação de energia em degraus são há muito utilizadas em obras de pequeno, médio e grande portes. A literatura apresenta vários estudos desses dispositivos de forma dissociada, tornando investigativo para dimensionamento o funcionamento simultâneo (descida e bacia de dissipação). Como exemplo de aplicação das descidas em degraus em quedas sequenciais, tem-se, no ambiente de mineração, as drenagens para pilhas de estéril. As descidas de água são construídas nos taludes, aproximadamente 10 metros de desnível, seguidos das bermas, variando de 3 a 8 metros de comprimento. Uma questão chave é a dissipação de energia nas bermas, pois uma dissipação excessiva pode resultar em profundidades subcríticas elevadas, fato antieconômico, uma vez que haverá novo trecho de aceleração em sequência (próximo talude). Para investigação de um sistema (módulo), formado pela descida de água em degraus e bacia de dissipação de configuração variável, foi construído um modelo físico reduzido, adaptável para vários cenários, na escala 1:10. Através de técnicas de filmagem com alta frequência de *frames*, obteve-se resultados para velocidades terminais, níveis de água e energia. Trabalhou-se com três cenários nessa pesquisa: descida de água lisa, em degraus e sistema de descida em degraus e bacia de dissipação. Ainda, em paralelo, com alto desenvolvimento das simulações numéricas aplicadas à fluidodinâmica computacional, do termo em inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD), foi desenvolvida uma análise comparativa da modelagem numérica por meio dos dois métodos mais utilizados pelos *softwares* disponíveis: o Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Volumes Finitos (MVF), ambos aplicados ao modelo físico reduzido para os dois primeiros cenários. Os *softwares* utilizados para este trabalho foram Autodesk® CFD, representante dos programas que discretizam algebricamente as equações de *Navier-Stokes* pelo MEF, OpenFOAM®, que soluciona o mesmo problema pelo MVF, e ainda, de forma exploratória complementar, o FLOW-3D®, modelo tridimensional completo, também operado por meio do MVF. Os resultados para o sistema (módulo) estabeleceram três equações principais para o processo de dimensionamento dessas estruturas. Além disso, o MVF reafirmou-se como o melhor desempenho para as condições simuladas neste estudo. Dentre os três modelos de turbulência mais aplicados a essas estruturas hidráulicas, $k-\epsilon$, SST- $k-\omega$ e RNG, o modelo RNG indicou a melhor representação do fluxo aerado durante os testes.

Palavras-Chave: Vertedouro em degraus, Descidas de água, Drenagem de pilhas de estéril, CFD, Método dos elementos finitos, Método dos volumes finitos.

ABSTRACT

Stepped chutes have long been used in works of different sizes of urban infrastructure, road drainage, spillways, and mine drainage. The literature presents several previous devices studies in a dissociated way, making investigative for dimensioning the simultaneous functioning (stepped chute and stilling basin). As an example of the application of stepped chutes in sequential falls, there are, in the mining environment, drainage for mine waste dumps. The stepped chutes are built on the slopes, approximately 10 meters in height, followed by the shoulders, varying from 3 to 8 meters in length. A key issue is the dissipation of energy on the shoulders, as excessive dissipation can result in elevated subcritical depths, an uneconomic fact since there will be a new stretch of acceleration in sequence (next slope). For the investigation of a system (module), formed by the stepped chute and the stilling basin of variable configuration, a reduced physical model, adaptable for various scenarios, in scale 1:10, was built. Through shooting techniques with high frame frequency, results were obtained for similar, water and energy levels. Three scenarios were worked on in this research: smooth chute, stepped chute and the system formed by stepped chute and stilling basin. In parallel, with the high development of numerical simulations applied to Computational Fluid Dynamics (CFD), a comparative analysis of numerical modeling was developed through the two methods most used by the available software: the Finite Element Method (MEF) and the Finite Volume Method (MVF), both applied to the reduced physical model for the first two scenarios. The software used for this work was Autodesk® CFD, representative of the programs that algebraically discretize as Navier-Stokes equations by MEF, OpenFOAM®, which solves the same problem by MVF, and also, in a complementary exploratory way, FLOW-3D®, full three-dimensional model, also operated through the MVF. Due to the limitations of computers in this study, the complete three-dimensional model was exploratory. The investigations were carried out by the other first two software in a simplified way. The results for the system (module) established three main equations for the structure dimension process. In addition, the MVF was reaffirmed as the best performance for the conditions simulated in this study. Among the three turbulence models most applied to these hydraulic structures, $k-\epsilon$, SST- $k-\omega$ and RNG, the RNG model indicated the best representation of the aerated flow during the tests.

Keywords: Stepped spillway, Stepped chute, Mine waste dump drainage, CFD, Finite element method, Finite volume method.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	XI
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVO GERAL	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3 JUSTIFICATIVA	4
4 REVISÃO DA LITERATURA	5
4.1 DESCIDAS HIDRÁULICAS	5
4.1.1 <i>Histórico e contextualização do uso contemporâneo.</i>	5
4.1.2 <i>Regimes de escoamento em degraus.</i>	8
4.1.2.1 Escoamento em quedas sucessivas	9
4.1.2.2 Escoamento em transição	12
4.1.2.3 Escoamento deslizante sobre turbilhões	12
4.1.3 <i>Aeração e posição de início.</i>	16
4.1.4 <i>Dissipação de energia</i>	20
4.1.4.1 Fator de atrito “f”	20
4.1.4.2 Dissipação de energia	22
4.1.5 <i>Velocidade Terminal.</i>	23
4.1.6 <i>Concepção das pressões atuantes nos degraus</i>	25
4.2 SISTEMA (DESCIDA + BACIA)	27
4.2.1 <i>Análise dimensional e tratamento do sistema (descida e bacia)</i>	30
4.3 MODELAGEM NUMÉRICA (CFD)	33
4.3.1 <i>Princípios Governantes</i>	33
4.3.1.1 Conservação da massa em três dimensões.....	34
4.3.1.2 Conservação da quantidade de movimento em três dimensões	35
4.3.1.3 Equações de Navier-Stokes para fluido Newtoniano.....	37
4.3.2 <i>Noções de turbulência</i>	39
4.3.3 <i>Métodos para discretização numérica.</i>	41
4.3.3.1 Diferenças entre Método dos Elementos Finitos e Método dos Volumes Finitos.....	42
4.3.4 <i>Superfície livre – Método VOF.</i>	43
4.3.5 <i>Modelagens do escoamento em degraus</i>	44
4.3.6 <i>Síntese das etapas de modelagem.</i>	47
5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	51
5.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	51
5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA	53
5.3 CENÁRIOS	54
5.3.1 <i>Cenário 1</i>	55
5.3.2 <i>Cenário 2</i>	56
5.3.3 <i>Cenário 3</i>	56
5.3.3.1 Análise dimensional do módulo proposto.....	57
5.4 INSTRUMENTAÇÃO DE MEDIÇÃO	59
5.4.1 <i>Técnica de análise por filmagem.</i>	60
5.5 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS NUMÉRICOS.....	63
5.5.1 <i>Autodesk® CFD</i>	64
5.5.1.1 Geometria	65
5.5.1.2 Condições de Contorno	66
5.5.1.3 Malha.....	67
5.5.1.4 Condições de simulação	69

5.5.2	<i>OpenFOAM®</i>	70
5.5.2.1	Geometria	71
5.5.2.2	Condições de contorno	72
5.5.2.3	Malha.....	72
5.5.2.4	Condições de simulação	74
5.5.3	<i>FLOW-3D®</i>	75
5.5.3.1	Geometria	76
5.5.3.2	Condições de contorno	76
5.5.3.3	Malha.....	77
5.5.3.4	Condições de simulação	78
5.5.4	<i>Validação das modelagens numéricas</i>	78
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
6.1	CENÁRIO 1	80
6.1.1	<i>Modelo físico reduzido</i>	80
6.1.2	<i>Modelo numérico 1 – MEF</i>	84
6.1.3	<i>Modelo numérico 2 – MVF</i>	88
6.1.4	<i>Modelo numérico 3 –MVF</i>	91
6.1.5	<i>Perfis longitudinais da entrada</i>	93
6.2	CENÁRIO 2	94
6.2.1	<i>Modelo físico reduzido</i>	94
6.2.2	<i>Modelo numérico 1 – MEF</i>	99
6.2.3	<i>Modelo numérico 2 – MVF</i>	103
6.2.3.1	Discussão dos <i>solvers</i> adequados	105
6.2.3.2	Extrapolação para outras vazões.....	108
6.3	CENÁRIO 3	111
6.3.1	<i>Determinação da faixa de trabalho e verificação do Weir Flow</i>	112
6.3.2	<i>Regressão múltipla dos dados à análise dimensional proposta do sistema em estudo</i>	114
6.3.2.1	Análise dos resíduos	116
6.3.3	<i>2° Regressão múltipla para análise dimensional</i>	117
6.3.3.1	Análise dos resíduos	119
6.3.4	<i>3° Regressão múltipla para análise dimensional</i>	119
6.3.4.1	Análise dos resíduos	121
6.3.5	<i>Análise física do fenômeno</i>	122
7	CONCLUSÕES	126
8	RECOMENDAÇÕES	129
	REFERÊNCIAS	130
	APÊNDICE I – DADOS EXPERIMENTAIS CENÁRIO 1	135
	APÊNDICE II – DADOS EXPERIMENTAIS CENÁRIO 2.....	136
	APÊNDICE III – DADOS EXPERIMENTAIS CENÁRIO 3	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Pilha de Disposição de Estéril, Jacaré, Carajás, VALE.....	3
Figura 4.1: (a) Barragem de Arkananian, Grécia, (b) Barragem de New Croton, EUA.....	6
Figura 4.2: Estruturas em degraus, pequeno, médio e grande portes. (a) Descida em drenagem rodoviária, (b) Vertedouro em degraus na barragem Rio da Dona, St° Antônio de Jesus/BA e (c) Vertedouro em degraus na barragem da Dona Francisca, Agudo/RS.....	7
Figura 4.3: Regimes do escoamento em degraus: (a) Escoamento em quedas sucessivas (b) Escoamento de Transição e (c) Escoamento deslizante sobre turbilhões.....	9
Figura 4.4: Subdivisões dos escoamentos em quedas sucessivas. (a) impacto total do jato com formação do ressalto hidráulico, (b) impacto do jato e formação parcial do ressalto hidráulico e (c) impacto do jato sem formação do ressalto hidráulico.....	10
Figura 4.5: Subdivisões do Regime de Escoamento Deslizante. (a) SK1;(b) SK2 e (c) SK3.	14
Figura 4.6: Diferentes tipos de escoamento em degraus. Três principais regimes.	16
Figura 4.7: Zonas do escoamento em Degraus.	17
Figura 4.8: Velocidade final no pé de vertedouros em degraus. Comparação entre lisos e degraus.....	25
Figura 4.9: Situação de <i>Weir Flow</i> , escoamento da esquerda para direita.....	30
Figura 4.10: Esquema de variáveis da descida em degraus e ressalto hidráulico no sistema.	31
Figura 4.11: Relação entre y_1y_2 e $\Delta E y_1$ para diferentes inclinações do paramento (h/l).	32
Figura 4.12: Entrada e saída do fluxo mássico num elemento infinitesimal de fluido	34
Figura 4.13: Componentes de tensão em todas as faces do elemento fluido, (a) em todas as direções (b) na direção x.....	36
Figura 4.14: Medida da velocidade em fluxo turbulento	40
Figura 4.15: (a) Vertedouro liso, (b) Simulação Numérica,(c) Modelo Reduzido.	44
Figura 4.16: Campo escalar e vetorial de velocidades (m/s).....	45
Figura 4.17: Ponto de início da aeração. Modelo Numérico e Físico.	47
Figura 4.18: (a) Malha tetraédrica - Autodesk® CFD e (b) Malha cúbica - OpenFOAM®...	49

Figura 4.19: Acompanhamento da convergência e estabilidade do resultado no Autodesk®CFD.....	50
Figura 5.1: Esquema de montagem experimental.....	52
Figura 5.2: Dimensões em centímetros do modelo físico reduzido.....	52
Figura 5.3: Montagem experimental, estrutura com degraus e bacia horizontal.....	53
Figura 5.4: Variáveis da análise dimensional proposta.....	58
Figura 5.5: Medidor de vazão de marca <i>Endress-Hauser</i> modelo Promag.....	60
Figura 5.6: Definição de um sistema cartesiano de controle experimental.....	61
Figura 5.7: Trajetória de velocidades na entrada de uma rampa lisa. Cenário 1, $Q_m=5,2$ l/s.....	62
Figura 5.8: Interface gráfica do programa Autodesk® CFD versão Ultimate 2019.....	65
Figura 5.9: Entradas de fluido nos modelos numérico e físico.....	66
Figura 5.10: Malha tetraédrica global e local no Autodesk® CFD.....	69
Figura 5.11: Configuração final do <i>solver</i> do Autodesk® CFD.....	70
Figura 5.12: Ambiente de execução de um projeto no OpenFOAM®.....	71
Figura 5.13: Malha global e local no OpenFOAM®.....	73
Figura 5.14: Visualização do Processamento no OpenFOAM® via ParaView.....	74
Figura 5.15: Interface gráfica do programa FLOW-3D® versão 12.0.....	76
Figura 5.16: Malha cúbica em três blocos principais otimizados no FLOW-3D®.....	77
Figura 6.1: Perfil longitudinal de velocidade na entrada do Cenário 1 ($Q=5,2$ l/s).....	81
Figura 6.2: Perfil longitudinal de velocidade na saída do Cenário 1 ($Q=5,2$ l/s).....	81
Figura 6.3: Distribuição de velocidades experimentais por vazão – Cenário 1.....	82
Figura 6.4: Curvas adimensionais da velocidade terminal – Cenário 1 modelo físico.....	83
Figura 6.5: Modelo numérico 1 – Cenário 1 (VOF).....	85
Figura 6.6: Seção no Pé – Modelo numérico 1 (Cenário1).....	86
Figura 6.7: Perfil longitudinal de velocidades na entrada - Modelo numérico 1 (Cenário1).....	87

Figura 6.8: Perfil longitudinal de velocidades na saída - Modelo numérico 1 (Cenário1).	88
Figura 6.9: Modelo numérico 2 – Cenário 1 (VOF).	89
Figura 6.10: Perfil longitudinal de velocidades - Modelo numérico 2 (Cenário1).	90
Figura 6.11: Gráfico de velocidade e VOF na seção do pé – Modelo numérico 2 (Cenário1).	90
Figura 6.12: Modelo numérico 3 – Cenário 1 (Entrada de ar em percentual de volume).....	92
Figura 6.13: Campo velocidades tridimensionais - Modelo numérico 3 (Cenário1).....	92
Figura 6.14: Detalhe físico e numérico do levantamento do escoamento juntos às paredes no pé - Modelo numérico 3 (Cenário1).	93
Figura 6.15: Perfis gráficos longitudinais das velocidades na entrada - Cenário1.	94
Figura 6.16: Perfil longitudinal de velocidade na entrada do Cenário 2 (Q=5,2l/s).....	95
Figura 6.17: Perfil longitudinal de velocidade na seção de saída do Cenário 2 (Q=5,2l/s). ...	96
Figura 6.18: Distribuição das velocidades experimentais por vazão – Cenário 2.....	96
Figura 6.19: Curvas adimensionais da velocidade terminal – Cenário 2 (Modelo Físico).	98
Figura 6.20: Modelo numérico 1 – Cenário 2 (VOF).	100
Figura 6.21: Seção no Pé – Modelo numérico 1 (Cenário 2).....	101
Figura 6.22: Perfil longitudinal de velocidades na entrada – Modelo numérico (Cenário 2).	102
Figura 6.23: Perfil longitudinal de velocidades– Modelo numérico 1 (Cenário 2).....	103
Figura 6.24: Modelo numérico 2 – Cenário 2 (VOF).	104
Figura 6.25: Perfil longitudinal de velocidades – Modelo numérico 2 (Cenário 2).....	104
Figura 6.26: Gráficos de velocidade e VOF da seção no pé – Modelo numérico 2 (Cenário 2).	105
Figura 6.27: Perfil longitudinal de velocidades – <i>Solver interIsoFoam</i>	106
Figura 6.28: Gráfico de velocidade e VOF da seção no pé – <i>Solver interIsoFoam</i>	107
Figura 6.29: Posição de início da aeração – <i>Solver multiphaseEulerFoam</i>	107

Figura 6.30: Regime quedas sucessivas – $Q=2,0$ l/s (VOF).	108
Figura 6.31: Regime quedas sucessivas – $Q=2,0$ l/s (Velocidade).	109
Figura 6.32: Regime quedas sucessivas – $Q=2,0$ l/s (Gráfico Velocidade & VOF).	109
Figura 6.33: Regime deslizante sobre turbilhões – $Q=8,0$ l/s (VOF).	110
Figura 6.34: Regime deslizante sobre turbilhões – $Q=8,0$ l/s (Velocidade).	110
Figura 6.35: Regime deslizante sobre turbilhões – $Q=8,0$ l/s (Gráfico Velocidade & VOF).	111
Figura 6.36: Formação de um pseudo-ressalto para $\Delta z= 3$ cm, $L=37,5$ cm e $Q=6,0$ l/s.	112
Figura 6.37: Fenômeno de Weir Flow, $\Delta z= 7,5$ cm, $L=50,0$ cm e $Q=8,0$ l/s.	113
Figura 6.38: Curva de Energia Específica. ($Q=8,0$ l/s).	113
Figura 6.39: Relação entre Medido e Estimado (y_3/y_h).	115
Figura 6.40: Variância dos resíduos $\ln(y_3/y_h)$	116
Figura 6.41: Relação entre Medido e Estimado (y_2/y_h).	118
Figura 6.42: Variância dos resíduos $\ln(y_2/y_h)$	119
Figura 6.43: Relação entre Medido e Estimado (y_2/y_h) corrigidos.	121
Figura 6.44: Variância dos resíduos $\ln(y_2/y_h)$ corrigida.	122
Figura 6.45: Relações entre y_3/y_h e L/L_b	123
Figura 6.46: Relação entre y_h e y_1 para avaliar o efeito do afastamento e altura da soleira.	123
Figura 6.47: Relação y_1/L_b e L/L_b	124
Figura 6.48: Relação entre y_2/y_h e L/L_b	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Formulações para o comprimento do desenvolvimento da camada limite.....	18
Tabela 4.2: Resumo das proposições teóricas e experimentais do fator de resistência.....	20
Tabela 4.3: Principais bacias de dissipação parametrizadas por órgãos de pesquisa	28
Tabela 4.4: Vantagens e Desvantagens do MEF e o MVF.....	43
Tabela 5.1: Faixa de vazões experimentais proposta.	54
Tabela 5.2: Resumo dos Ensaios realizados por Cenário.....	57
Tabela 5.3: Relações adimensionais encontradas pelo teorema dos π	59
Tabela 5.4: Saída de dados padrão para planilha eletrônica pelo <i>software</i> Kinovea. Tempo em milésimos de segundo.....	62
Tabela 5.5: Convergência da malha a partir de Arantes (2007) e apoiado por Tassinari <i>et al.</i> (2020).	68
Tabela 5.6: Medições físicas e numéricas da velocidade e profundidade finais	79
Tabela 5.7: Medições físicas e numéricas das velocidades finais – Vazões extrapoladas.	79
Tabela 6.1: Bateria de ensaios – Cenário 1.	80
Tabela 6.2: Velocidades terminais experimentais – medianas para o Cenário 1.	82
Tabela 6.3: Resumo de Elementos Finitos – Cenário 1.....	84
Tabela 6.4: Bateria de ensaios – Cenário 2.	94
Tabela 6.5: Velocidades terminais experimentais e Velocidades terminais calculadas – Cenário 2.	97
Tabela 6.6: Resumo de Elementos Finitos – Cenário 2.....	100
Tabela 6.7: Limites da soleira, <i>Weir Flow</i>	112
Tabela 6.8: Resumo da estatística de regressão (y_3/y_h).	114
Tabela 6.9: Resumo da estatística de regressão (y_2/y_h)	117
Tabela 6.10: Resumo da estatística de regressão (y_2/y_h) corrigida.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

CAE: Engenharia Auxiliada por Computador (*Computer-Aided Engineering*)

CCR: Concreto Compactado a Rolo

CFD: Dinâmica Computacional dos Fluidos (*Computational Fluid Dynamic*)

DNS: Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation*)

EQS: Escoamento em Quedas Sucessivas

EDT: Escoamento Deslizante sobre Turbilhões

LES: Simulação de Grande Escala (*Large Eddy Simulation*)

USBR: *United States Bureau of Reclamation*

MDF: Método das Diferenças Finitas

MEF: Método dos Elementos Finitos

MVF: Método dos Volumes Finitos

RANS: Média de Reynolds para Equações de Navier-Stokes (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*)

RNG: Grupo de Equações Re-Normalizadas (*Re-Normalisation Group*)

RPM: Rotações Por Minuto

SST: Transporte da Tensão Cisalhante

TRA: Escoamento em Regime de Transição

VOF: Volume de fluido (*Volume of Fluid*)

SIGLAS E SÍMBOLOS

GERAL

c_f : Coeficiente de atrito $c_f = f/4$

C: Coeficiente de Chézy

Ca: Concentração de ar % (volume de ar/ (volume de ar + volume de água))

C_{mean} : Concentração média de ar (%) associada a uma profundidade média representativa (y)

d: Profundidade do escoamento deslizante sobre os turbilhões (m)

d_0 : Profundidade de água no pé da estrutura (m)

d_w : Profundidade representativa no pé da estrutura $d_w = y_c \left(\frac{f}{8 \text{ sen } \alpha} \right)^{\frac{1}{3}}$ (m)

Da: Difusividade das bolhas de ar (m²/s)

Dh: diâmetro hidráulico da seção considerada (m) (4 * área molhada/perímetro molhado)

E_{dam} : Energia geométrica disponível (m)

E_1 : Energia hidráulica disponível no sistema (m)
 E_m : Energia total disponível a montante na descida em degraus (m)
 $E_{m\acute{a}x}$: Energia hidráulica máxima (m)
 E_p : Energia residual na seção onde está sendo avaliada a dissipação (m)
 E_{res} : Energia Residual do sistema (m)
 E' : Energia total disponível a montante para calha lisa (m)
 f : fator de resistência de Darcy-Weisbach (f)
 f_L : fator de resistência da calha lisa equivalente
 f_k : fator de resistência da calha em degraus
 $f_{m\acute{a}x}$: fator de resistência para $h/yc > 0,5$
 Fr : Número de Froude do escoamento
 Fr_1 : Número de Froude supercrítico do escoamento
 Fr_2 : Número de Froude subcrítico do escoamento
 Fr_3 : Número de Froude do escoamento na saída do módulo (sistema)
 Fr_h : Número de Froude do escoamento na entrada do módulo (sistema)
 F : Distribuição de probabilidade de Snedecor
 F^* : Número de Froude definido pela rugosidade relativa do degrau = $q/\sqrt{g k^3 sen\alpha}$
 g : Aceleração da gravidade (m/s²)
 H : Desnível geométrico entre as cotas da bacia e crista da descida (m)
 La, Lp, Li : Comprimento do desenvolvimento da camada limite (m)
 L : Posição fixada do paramento na bacia de dissipação (m)
 Lb : Comprimento do ressalto ou bacia total de dissipação (m)
 K, Ka e Kr : rugosidade relativa = $h \cos \alpha$
 n : coeficiente de Manning do escoamento
 n_m : coeficiente de Manning do escoamento no modelo
 n_p : Coeficiente de Manning do escoamento no protótipo
 q : vazão específica (m³/sm)
 q_m : vazão específica para o modelo (m³/sm)
 q_p : vazão específica transportada na escala para o protótipo (m³/sm)
 Q_m ou Q : Vazão ensaiada no modelo físico reduzido (m³/s)
 Q_p : Vazão transportada na escala para o protótipo (m³/s)
 Re : Número de Reynolds do escoamento
 s : altura da soleira por Hager (1992) (m)
 $s_{m\acute{a}x}$: altura da soleira máxima por Hager (1992) (m)

$S_{ótimo}$: altura da soleira ótima por Hager (1992) (m)
 s_L : Relação adimensional de Hager (1992) para faixas do *Weir Flow*
 t : tempo (segundos)
 V ou U : Velocidade do fluido em determinado ponto/seção (m/s)
 V_w : Velocidade do fluxo de água no pé da estrutura (m/s)
 V_m : Velocidade no modelo (m/s)
 $V_{máx}$: Velocidade máxima do fluxo de água no pé da estrutura (m/s)
 V_p : Velocidade no protótipo (m/s)
 V_w : Velocidade do fluxo de água no pé da estrutura (m/s)
 W : Estatística de teste de *Shapiro-Wilk*
 y_A : Profundidade ao final da camada limite (m)
 y_c : Profundidade crítica do escoamento (m)
 y_n : Profundidade normal do escoamento uniforme (m). Atingimento na terceira zona.
 y_h : Profundidade do escoamento na entrada do módulo sistema (m)
 y_1 : Profundidade supercrítica do escoamento (m)
 y_2 : Profundidade subcrítica do escoamento (m)
 y_3 : Profundidade de saída do módulo (sistema) do escoamento (m)
 Y_{90} : Distância y (m) a partir do pseudofundo onde $Ca=90\%$
 Y_{50} : Distância y (m) a partir do pseudofundo onde $Ca=50\%$
 α : inclinação (graus)
 δ : Espessura da camada limite (m)
 \emptyset : Diâmetro (mm)
 ΔE : Variação de energia entre seções/pontos de interesse (m)
 Δz : altura física da soleira no modelo físico reduzido (m)
 μ : viscosidade dinâmica(kg/sm)
 ρ : densidade (kg/m³)
 λ : Relação de escala para modelo / protótipo.

EQUAÇÕES GOVERNANTES DO CFD “NAVIER-STOKES”

u, v, w : Componentes vetoriais em (i,j,k) do vetor velocidade (m/s)
 \mathbf{u} : vetor de velocidade em componentes (i,j,k) (m/s)
 $u'(t)$: função de flutuação da velocidade média turbulenta (m/s)
 $S_{Mx,y,z}$: Termo fonte (parcela relativa à coriolis e gravidade)

k : energia cinética turbulenta (kgm^2/s)

p : Pressão (Pa)

F' : fração de preenchimento do elemento por fluido no método VOF

$s_{i,j}$: Componentes de deformação linear

T : Temperatura em graus Celsius

\vec{V} : Campo vetorial de velocidades na forma $P_i+Q_j+R_k$

x, y e z : Coordenadas do sistema cartesiano tridimensional (m)

ε : Taxa de dissipação de k por unidade de massa (m^2/s^3)

τ_{ij} : Componente de tensão viscosa (s^{-1})

ω : Frequência de turbulência (s^{-1})

η : Deformação viscosa volumétrica (Pa s)

μ : Viscosidade dinâmica (kg /sm)

ϕ : Variável de interesse (Equação de transporte)

Γ : Termo de difusão

S_ϕ : Termo fonte função da variável de interesse

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, o uso de vertedouros em degraus pela civilização humana é bastante antigo. A barragem de Arkananian, Grécia 1300 a.C., demonstra a necessidade de vencer-se desníveis no transporte da água sem gerar destruição do “maciço”, com este salvo pela perda gradual de energia.

Vertedouros em degraus e lisos têm sido pesquisados extensamente ao longo dos anos. De forma geral, suas configurações geométricas iniciam com um perfil balístico, muitas vezes do tipo *Creager*, a fim de se evitar ocorrência de pressões negativas na crista e otimizar o coeficiente hidráulico de descarga. Esse cuidado deve ser tomado em obras de grandes estruturas nas quais o fenômeno de cavitação pode tornar inoperante o projeto (CHOW, 1985).

Devido à complexidade do escoamento na calha em degraus, a necessidade de experimentação para se determinar critérios de projeto dessas estruturas é fundamental. O primeiro trabalho experimental que tem-se registro data de 1969, desenvolvido por Horner. Todo conhecimento formal do assunto deriva, então, a partir da década de 1970.

Com desenvolvimento de tecnologias construtivas, como concreto compactado a rolo (CCR) e, recentemente, geossintéticos, o fomento às pesquisas experimentais e teóricas aumentou expressivamente. Dessa forma, diversos trabalhos de relevância podem ser citados como: Sorensen (1985), Rajaratnam (1990), Rajaratnam e Chamani (1999), Chanson (2002), Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004), Chanson (2015), Altalib, Mohammed e Hayawi (2019).

Por sua vez, em obras de pequeno e médio portes, como descidas hidráulicas em taludes rodoviários, ambiente de mineração e infraestrutura urbana em geral, não se faz necessário uso do perfil *Creager*. Além de difícil execução, o custo de obra fica elevado. Do ponto de vista matemático, a diferença nas equações está na formação e prolongamento da camada limite no início do escoamento (CHANSON, 2002).

Apesar da imensa literatura produzida a respeito de modelos experimentais físicos, não existe condição matemática de controle do escoamento em degraus capaz de formalizar as previsões de velocidade, pressão, concentração de ar e início da aeração, por exemplo. Ou seja, cada autor tem sua formulação para um domínio restrito do problema. Obviamente com diferenças de solução para projeto dependendo da metodologia de cálculo adotada.

Nesse contexto, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), pesquisas em modelagens físicas são aliadas aos modelos numéricos computacionais robustos. Os modelos experimentais físicos são limitados na capacidade de medição, tornando a prática da simulação via CFD uma realidade presente e promissora futura.

A literatura apresenta, em sua maioria, trabalhos desenvolvidos escolhendo-se apenas um método numérico. Dessa forma, verificar a resolução por dois dos métodos mais utilizados é interessante como colaboração às pesquisas desenvolvidas para o escoamento em descidas lisas e degraus. Os métodos mais aplicados ao problema são denominados: Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Volumes Finitos (MVF).

A modelagem computacional numérica de fluidos, do inglês *Computational Fluid Dynamic* (CFD), encontra-se cada vez mais interessante no universo atual e futuro. O desenvolvimento da capacidade de processamento como simulação em nuvem, por exemplo, diminuição de custos de projeto e verificação precisa da estrutura em condição de operação são grandes atrativos (FERZIGER; PERIC, 2002).

Diversos trabalhos publicados a partir dos anos 2000 discutem a utilização dos melhores modelos de turbulência, advecção de células, tamanho do passo de tempo e refinamentos de malha adequados para o escoamento em degraus. Podem ser citados: Arantes (2007), Lira (2014), Brandão (2015), Zhan; Zhang e Gong (2016), Salmasi e Samadi (2018), Medhi *et al.* (2019).

A grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura utiliza apenas um modelo numérico através de um dos métodos de discretização algébrica das equações governantes de *Navier-Stokes* para o domínio, ou seja, Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) ou Método dos Volumes Finitos (MVF). A proposta de se analisar comparativamente os dois métodos mais aplicados e utilizados nos *softwares* comerciais atuais, MEF e MVF, não foi encontrada na literatura para essas estruturas de condução em degraus e lisas.

Ainda, como um cenário aplicado, no ambiente de mineração, pilhas de estéril são estruturas para disposição de material não comercial a fim de se atingir a jazida bruta. Esse empilhamento pode atingir até trezentos metros de altura. Possui um projeto geotécnico relativamente parametrizado, taludes de inclinação 1(V):2(H) com altura de cerca dez metros e bermas de três

a oito metros de comprimento. A aceleração progressiva, ou seja, a cada queda na sequência talude berma, deve ser evitada. A verificação de projeto passa pelo empilhamento total com uma bacia de dissipação cara. Dessa forma, pretendeu-se investigar e propor um módulo que possa proporcionar, em apenas uma queda, condições hidráulicas de entrada e saída parecidas. Evitando a verificação global de projeto e reduzindo os custos totais da obra (USBR, 1987).

A ilustração do problema que se encontra com o projetista para otimizar os custos e evitar bacias de dissipação caras ao final do empilhamento pode ser observada na Figura 1.1.

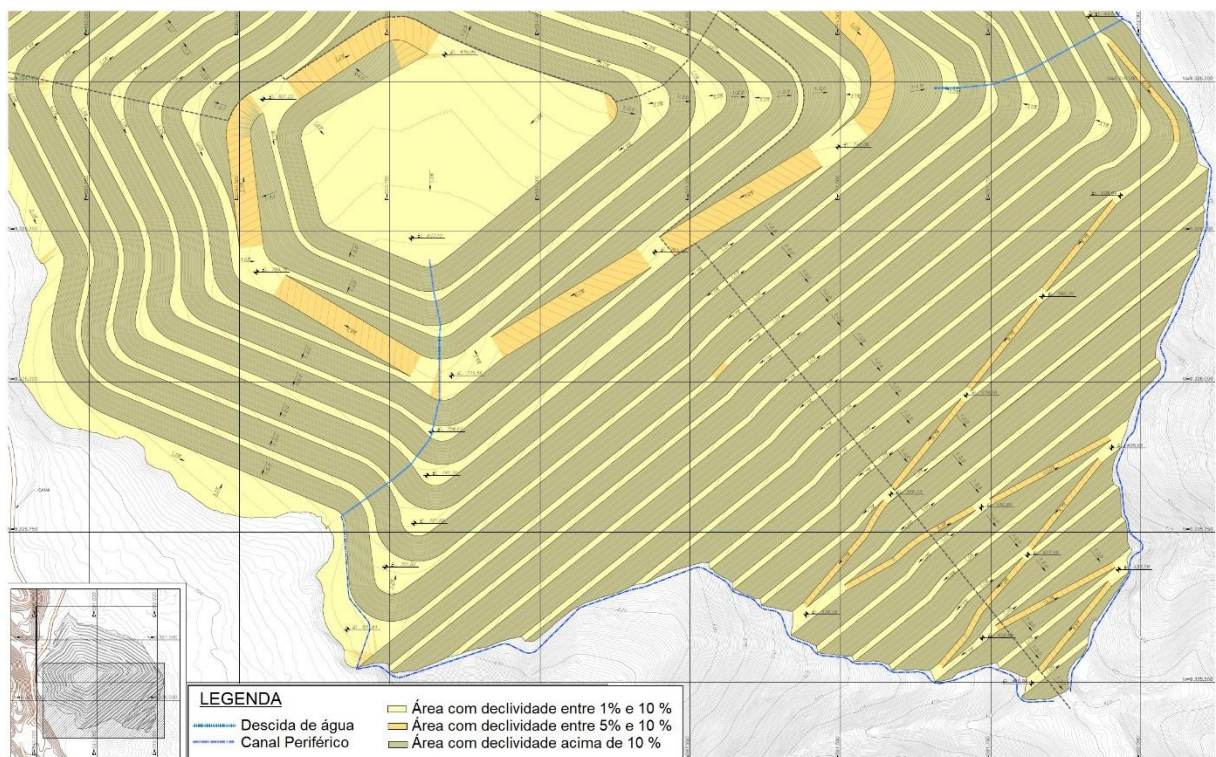


Figura 1.1: Pilha de Disposição de Estéril, Jacaré, Carajás, VALE.

Fonte: Carvalho (2019)

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

Estudar uma descida de água modular aplicada em uma estrutura sequencial de descidas, composta por uma escada em degraus e uma bacia de dissipação, por meio de um modelo físico reduzido e análise dos diferentes modelos numéricos computacionais.

2.2 *Objetivos específicos*

- Caracterizar o escoamento em uma descida de água lisa e em degraus por meio de modelo físico reduzido;
- Avaliar a aplicação da Modelagem Computacional, comparando os Métodos dos Elementos Finitos e dos Volumes Finitos, nas estruturas de descida lisa e em degraus;
- Explorar novas estruturas de bacia de dissipação que permitam reproduzir as condições hidráulicas que antecedem à descida em sequência.

3 JUSTIFICATIVA

Os modelos físicos reduzidos de vertedouros e descidas de água já foram amplamente pesquisados. Atualmente, os modelos numéricos ganham cenário por demonstrar redução de custo, capacidade ilimitada de medição em qualquer ponto e otimização das etapas de projeto. De forma geral, os trabalhos constantes da literatura utilizam um método numérico apenas, sejam Diferenças Finitas (MDF), Elementos Finitos (MEF) ou Volumes Finitos (MVF) para aproximar-se aos dados físicos. Dessa forma, foi investigativo propor a solução de um problema hidráulico clássico por meio dos dois métodos mais utilizados nos *softwares* comerciais. Portanto será investigado o processo de escoamento, com e sem alta aeração, via MEF e MVF.

Ainda como módulo aplicado em campo, no ambiente de mineração, para diminuir as verificações globais de projeto das descidas em pilhas de estéril, foi desenvolvida uma estrutura modular para controlar as condições hidráulicas de entrada e saída em apenas uma queda. Assim, evita-se maior custo de execução da calha e otimiza-se a fase de projeto.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 *Descidas hidráulicas*

4.1.1 Histórico e contextualização do uso contemporâneo

A linha do tempo da civilização humana apresenta registros do uso de calhas em degraus por mais de três milênios passados. A necessidade de reservar água, ou mesmo encaminhar seu excesso, vencendo um desnível geométrico significativo é, provavelmente, a maior causa do uso dessas estruturas. Uma vez que a integridade estrutural do barramento é conseguida, minimiza-se o efeito da erosão intrínseca. Dentre os registros disponíveis, o mais antigo que se tem conhecimento é o da barragem de Arkananian, na Grécia, executada por volta de 1300 a.C. Esse vertedouro apresentava inclinação média de 45°, uma altura de 10,5 metros, 25 metros de comprimento e degraus variando de 0,6 a 0,9 metros de altura. A Figura 4.1(a) apresenta a estrutura dessa histórica obra que foi executada com blocos de pedra e ainda resiste ao tempo (CHANSON, H.; YASUDA; OHTSU, 2002).

Chanson (1994) aponta o fluxo de uso dessas estruturas desde 694 a.C. A região da atual cidade de Mossul, no Iraque, foi palco da cidade assíria de Niniveh. Neste ponto do tempo, os assírios construíram duas barragens com vertedouros em degraus para garantir o abastecimento de água utilizando-se do Rio Khosr. As ruínas dessas obras ainda podem ser investigadas. Em sequência pela linha tempo, a expansão do império romano gerou a construção desse tipo de estrutura em diversos locais, como: Síria, Líbia e Tunísia. Com a queda do império, os mulçumanos levaram a metodologia construtiva para Espanha e Iraque novamente.

Após a reconquista da Espanha, engenheiros civis espanhóis, a partir dos conhecimentos deixados, projetaram vertedouros em degraus (barragens de Almansa, Alicante, Barrueco e Abajo), com a construção, em 1791, da maior barragem com vertimento em degraus já executada à época (barragem de Puentes). Infelizmente em 1802 a estrutura foi levada por uma cheia. Os espanhóis foram os responsáveis pela disseminação da técnica na América, a partir do território Mexicano. É notável a influência espanhola em obras deste tipo no México, França e Estados Unidos. Dessa forma, no século XVII, engenheiros franceses começaram a dominar e aplicar a técnica em construção de canais e cascatas escalonadas (CHANSON, 2002).

De acordo com Chanson (2015), acredita-se que vertedouros em degraus eram utilizados na antiguidade com finalidade de manter a estabilidade estrutural do maciço das barragens. Neste contexto, a visão de dissipação de energia durante a calha não era investigada e otimizada. Com a necessidade de aumento da produção agrícola, em função do crescimento populacional geométrico dos anos, as características dissipativas das quedas em degraus, para canais de irrigação, começaram a ser estudadas. Uma vez que a velocidade terminal é relativamente menor. Nesse panorama, o autor cita a primeira obra dimensionada com a função dos degraus a perda de energia através do escoamento, barragem de New Croton (1906), como pode ser visto na Figura 4.1(b).



Figura 4.1: (a) Barragem de Arkanian, Grécia, (b) Barragem de New Croton, EUA.

Fonte: Chanson (2002)

Com avanço dos estudos de dissipadores de energia a jusante dessas estruturas, fizeram-nas cair em desuso por certo período. Como a energia na bacia de dissipação pode ser controlada com estruturas parametrizadas, não se intensificou pesquisas por certo período após o início do século XX (DAI PRÁ, 2004).

Portanto, a partir da década de 70, com a invenção de recursos tecnológicos construtivos como concreto compactado a rolo (CCR), gabiões e até geogrelhas, o procedimento construtivo dos degraus não se torna tão complexo. Esses ingredientes corroboraram para retomada das pesquisas no assunto e fortaleceram a utilização em obras de pequeno, médio e grande porte. Variações de infraestrutura urbana e rodoviária de drenagem simples até barragens de grande porte são cenários possíveis da aplicação de vertedouros e descidas em degraus. Existem diferenças pequenas no perfil balístico de aproximação de cada uma delas, perfis do tipo *Creager*, por exemplo, que visam diminuir a cavitação no início do escoamento, evitar saltos dos jatos de água e otimizar o coeficiente de descarga (CHANSON, 2015).

Dessa forma, refere-se pela terminologia de forma ampla na literatura atual como descidas hidráulicas para obras de pequeno e médio porte sem construção de perfil balístico. E, por fim, como vertedouros em degraus, obras constantes de perfil balístico, muitas vezes do tipo *Creager*, na entrada da calha escalonada.

Como já enunciado nas referências citadas, o interesse pela execução dos degraus passou a ser além da estabilidade estrutural das estruturas de condução hidráulica. Mas como possibilidade adicional do controle de energia ao longo do escoamento. Estudos brasileiros como de Tozzi (1992), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Arantes (2007), Simões (2008), Vianna, Braz e Silva (2013) e Osmar (2016), mostram que calhas escalonadas em degraus podem reduzir de 60% até 90% da energia total a montante em relação ao valor final de pé para uma vazão específica. A Figura 4.2 demonstra, claramente, os usos típicos atuais amplos de descidas e vertedouros em degraus em obras executas no Brasil.

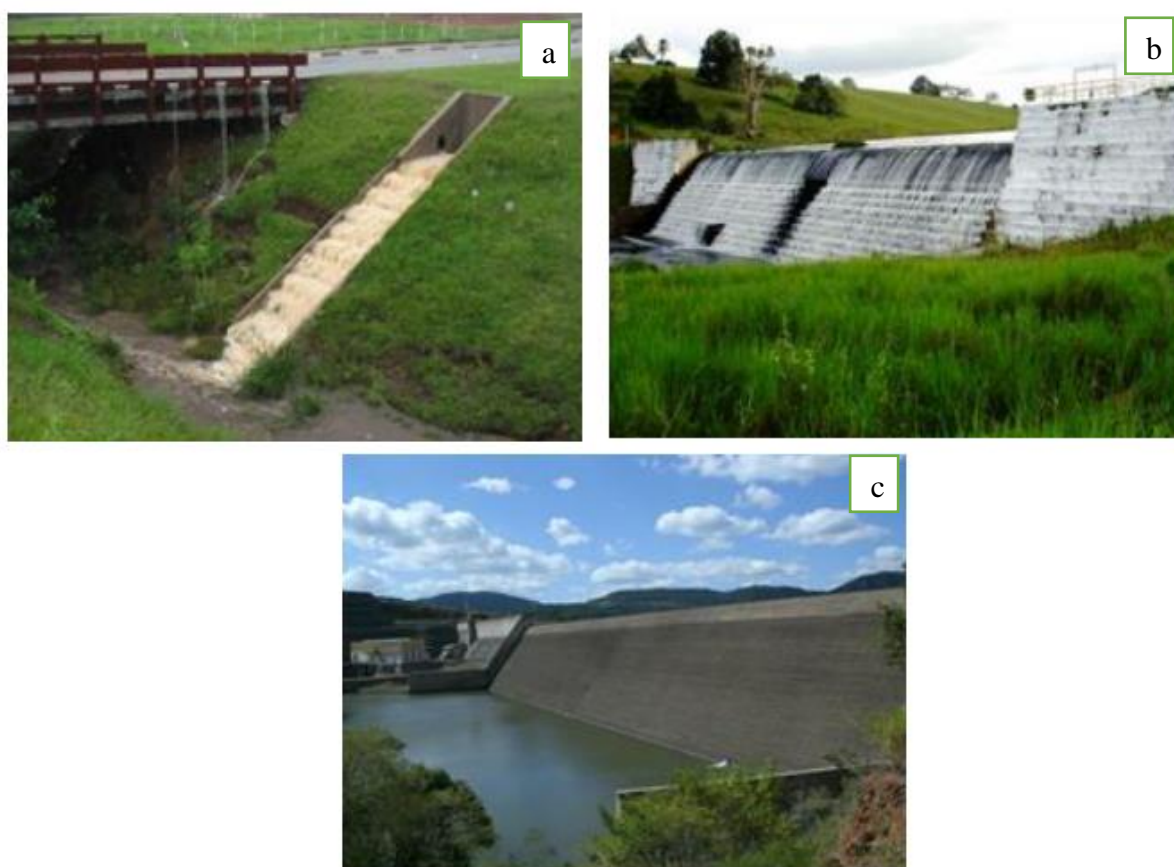


Figura 4.2: Estruturas em degraus, pequeno, médio e grande portes. (a) Descida em drenagem rodoviária, (b) Vertedouro em degraus na barragem Rio da Dona, Stº Antônio de Jesus/BA e (c) Vertedouro em degraus na barragem da Dona Francisca, Agudo/RS.

Fonte: Adaptado de Conterato (2014)

4.1.2 Regimes de escoamento em degraus

Os estudos de Sorensen (1985) já se apoiavam em teste experimentais anteriores da década de 70, principalmente pelos trabalhos de Horner, para notar as diferenças dos regimes de escoamento em função da vazão estabelecida na calha, seja descida ou vertedouro em degraus. Para uma geometria fixa e vazões variáveis são observadas diferentes configurações de linha d'água, além das formações em cada degrau particular.

Rajaratnam (1990) e outros autores destacam-se por atribuir duas nomenclaturas para os regimes observados. Tratava-se do *nappe flow* e *skimming flow* como classificações únicas existentes. Para o contexto do vocabulário técnico português, Matos e Quintela (1995), propuseram os nomes de escoamento em quedas sucessivas e escoamento deslizante sobre turbilhões atribuídos aos regimes *nappe flow* e *skimming flow*, respectivamente.

Uma terceira classificação, entre os dois regimes existentes, foi denominada por Ohtsu e Yasuda (1997) como regime de transição. Trata-se de um escoamento intermediário entre o escoamento em quedas sucessivas e o deslizante sobre turbilhões. Suas características são divergentes dos dois anteriormente descobertos do ponto de vista da formulação matemática aos dados experimentais, não sendo tão previsível como os regimes extremos.

A Figura 4.3 apresenta os três regimes principais estabelecidos em uma descida de água em degraus, extraídos do modelo físico reduzido que será apresentado neste estudo.

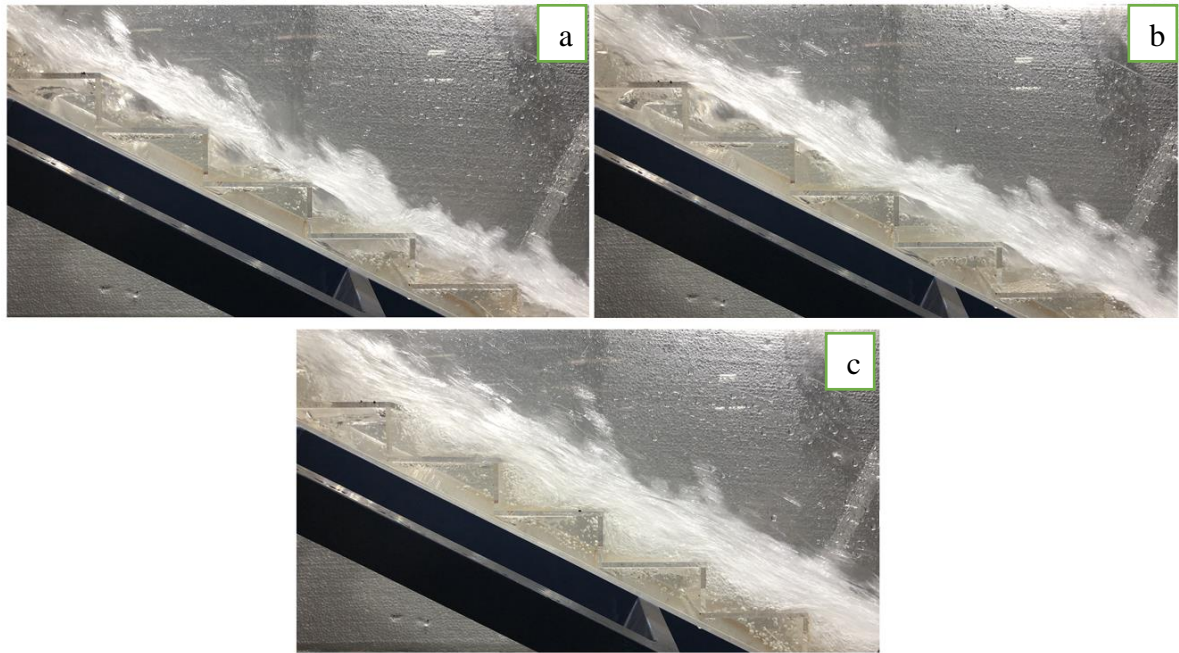


Figura 4.3: Regimes do escoamento em degraus: (a) Escoamento em quedas sucessivas, (b) Escoamento de Transição e (c) Escoamento deslizante sobre turbilhões.

4.1.2.1 Escoamento em quedas sucessivas

Na hierarquia das vazões possíveis de trabalho de uma descida ou vertedouro em degraus, o regime de escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*) apresenta-se com os valores de entrada, ou seja, mais baixos em relação à certas referências. Este tipo de escoamento pode ter a formação ou não de um ressalto hidráulico em cada degrau isolado. Como a sugestão do próprio nome deriva, cada queda é possível ser estudada isoladamente. O impacto do jato de água em cada degrau pode ser dividido em total ou parcial em seu piso (CHANSON, 1994).

Dessa forma, Chanson (1994) aborda três subdivisões do regime em quedas sucessivas:

- NA1 – Ressalto plenamente desenvolvido;
- NA2 – Ressalto parcialmente desenvolvido; e
- NA 3 – Sem formação do ressalto.

A Figura 4.4 apresenta o esboço das situações possíveis que são visualizadas dentro da faixa de vazões representativa do escoamento em quedas sucessivas nas suas três diferentes variações.

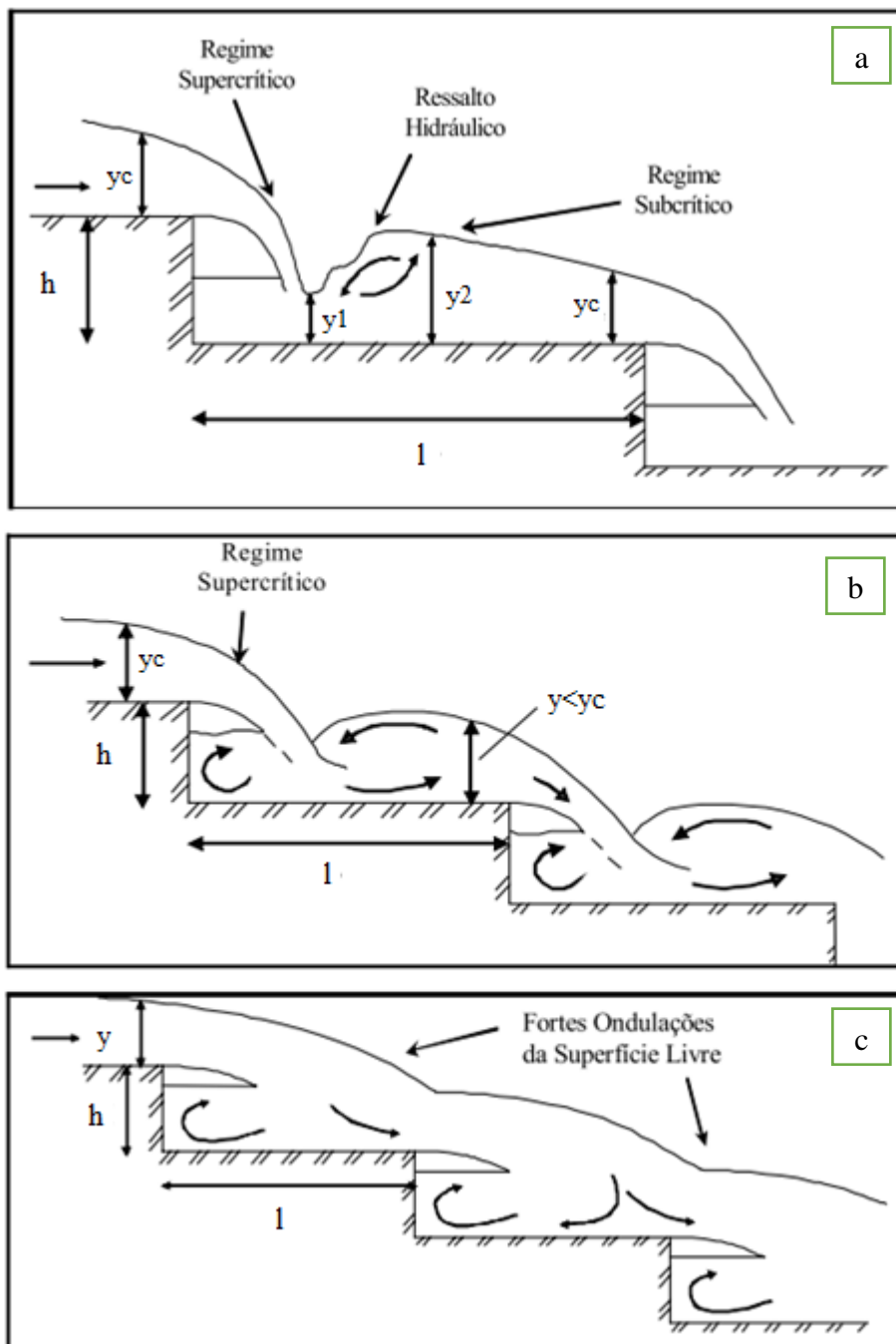


Figura 4.4: Subdivisões dos escoamentos em quedas sucessivas. (a) impacto total do jato com formação do ressalto hidráulico, (b) impacto do jato e formação parcial do ressalto hidráulico e (c) impacto do jato sem formação do ressalto hidráulico.

Fonte: adaptado de Dai Prá (2004)

O escoamento em degraus é de difícil parametrização matemática em qualquer regime, toda previsão de comportamento, no que tange a localização do regime de escoamento real, exige experimentação e adaptação de curvas e equações auxiliares. Assim, todas as diversas funções encontradas na extensa literatura apresentam certo grau de erro, coeficientes de ajuste altos

foram encontrados pelos autores mais citados e serão os principais abordados para apresentação deste estudo.

Através de várias obras de vertedouros em degraus realizadas na África do Sul, e dados de outros autores, Chanson (1993) sugere que as condições mais sustentáveis para verificação do regime geral em quedas sucessivas situam-se na faixa dada pela Equação 4.1:

$$\tan \alpha = \frac{h}{l} < 0,20 \text{ e } \frac{y_c}{h} < \frac{1}{3} \quad (4.1)$$

na qual: α = inclinação (graus); h =altura do espelho do degrau (m); l =comprimento do patamar do degrau (m) e y_c =profundidade crítica do escoamento(m).

Com vazões específicas máximas de $0,066 \text{ m}^3/\text{sm}$, relações de h / l variáveis entre 0,2 e 0,5, além de degraus de 5 centímetros de altura, foi possível para Fael e Pinheiro (2003) determinarem a condição de ocorrência do escoamento em quedas sucessivas, conforme o limite pela Equação 4.2:

$$\frac{y_c}{h} \leq 0,125 \left(\frac{h}{l} \right)^{-1,313} \quad (4.2)$$

A avaliação de um limite, variando-se a vazão para uma faixa também de configurações geométricas dos degraus, é essencial para definir limites superiores e inferiores capazes de estabelecer onde começa e termina cada um dos regimes de escoamento. Ohtsu *et al.* (2001) definiram o limite superior do regime de escoamento em quedas sucessivas, aplicável a experimentos com calhas na faixa de declividade de 5° até 55° , por meio da Equação 4.3:

$$\frac{h}{y_c} = 0,57 (\tan \alpha)^3 + 1,3 \quad (4.3)$$

Como formulação e ajuste fortes à contribuição para definição dos limites deste regime de escoamento, Chanson (2001) analisou muitos dados disponíveis na literatura e propôs mais uma equação, desta vez admitindo-se a existência do regime de transição, válida para relações de h/l entre 0,05 e 1,7. A Equação 4.4 estabelece tal limite superior do regime de quedas sucessivas, segundo autor supracitado:

$$\frac{y_c}{h} = 0,89 - 0,4 \left(\frac{h}{l} \right) \quad (4.4)$$

4.1.2.2 Escoamento em transição

O regime de escoamento de transição, situado entre o regime em quedas sucessivas e deslizantes sobre turbilhões, apresenta características bem distintas dos extremos. Do ponto de vista de modelagem matemática, a previsão de comportamento é menos refinada nas regressões realizadas com dados experimentais. Os desastres causados por falhas nas barragens de Arizona Canal, em 1905, e New Croton, em 1955, foram atribuídos pela operação dos vertedouros em degraus trabalharem no regime de transição mencionado (CHANSON,2002).

Segundo Dai Prá (2004), o que se sabe é que para pequenas vazões ocorre o regime em quedas sucessivas (*nappe flow*) e para grandes vazões o regime deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*). Diversos autores debatem sobre a possível caracterização desse regime. Ohtsu e Yasuda (1997) apresentaram o conceito do escoamento de transição delimitado, principalmente, pelas intensas flutuações hidrodinâmicas, não pela exclusividade da faixa de vazões.

Através do trabalho de Chanson e Toombes (2004), exclusivo para o escoamento de transição, foram tratados vários dados disponíveis na literatura experimental e outros produzidos. A aeração é não uniforme, se comparada ao regime deslizante sobre turbilhões. Trata-se de um colchão de recirculação nos degraus com aeração variada em cada um deles com projeções de respingos intensos e não atingimento de um comportamento padrão, principalmente pela irregularidade da aeração. O trabalho também desenvolveu limites a partir desses dados para tentar localizar a região de transição, conforme desenvolveu-se as Equações 4.5 (limite inferior) e 4.6 (limite superior):

$$\frac{yc}{h} > 0,9174 - 0,381 \left(\frac{h}{l}\right) \quad \text{p/} \quad 0 < h/l < 1,7 \quad (4.5)$$

$$\frac{yc}{h} < 0,9821 / \left(\frac{h}{l} + 0,388\right)^{0,384} \quad \text{p/} \quad 0 < h/l < 1,5 \quad (4.6)$$

4.1.2.3 Escoamento deslizante sobre turbilhões

O escoamento deslizante sobre turbilhões, em descidas ou vertedouros em degraus, ocorre para maiores vazões na escala hierárquica. Caracteriza-se basicamente pela formação de um pseudofundo constante de vórtices de recirculação da mistura água e ar, a formação do fenômeno é devida transmissão dos esforços cisalhantes da camada deslizante direta superior (CHANSON, 2015).

Do ponto de vista de projeto, é a condição hidráulica mais favorável para o processo de dimensionamento das estruturas em degraus. Em barragens de água o uso desse tipo de conceito é fundamental para dissipação de energia durante a queda, preservando o maciço, como em usinas de geração de energia, por exemplo, como também em barramentos que não se alimentarão as turbinas, mas de alívio de carga de montante. Ou seja, trata-se da condição máxima de esforços sobre a estrutura (ZHAN; ZHANG; GONG, 2016).

Chanson (2002), por meio de trabalhos anteriores próprios, estabelece três subdivisões do regime de escoamento deslizante sobre turbilhões, seguindo a lógica da tríplice divisão do regime em quedas sucessivas:

- SK 1 – Escoamento com recirculação instável e com interferência esteira - degrau (*wake-step interference*);
- SK 2 – Escoamento com circulação instável e com interferência esteira – esteira (*wake-wake interference*); e
- SK 3 – Escoamento com recirculação estável (*recirculating cavity flow*).

A verificação, destes diferentes escoamentos, está relacionada com a geometria dos degraus. Se esses apresentarem inclinações pequenas e um comprimento elevado, verifica-se um escoamento com recirculação instável e com interferência esteira – degrau (*wake-step interference*). Caso os degraus sejam muito inclinados ocorre um escoamento com recirculação estável (*recirculating cavity flow*).

A Figura 4.5 demonstra os sub-regime citados. Pequenas diferenças nas vazões específicas podem causar a mudança de sub-regime, sendo usual a adoção do regime SK 3 para dimensionamento geral (CHANSON, 1994).

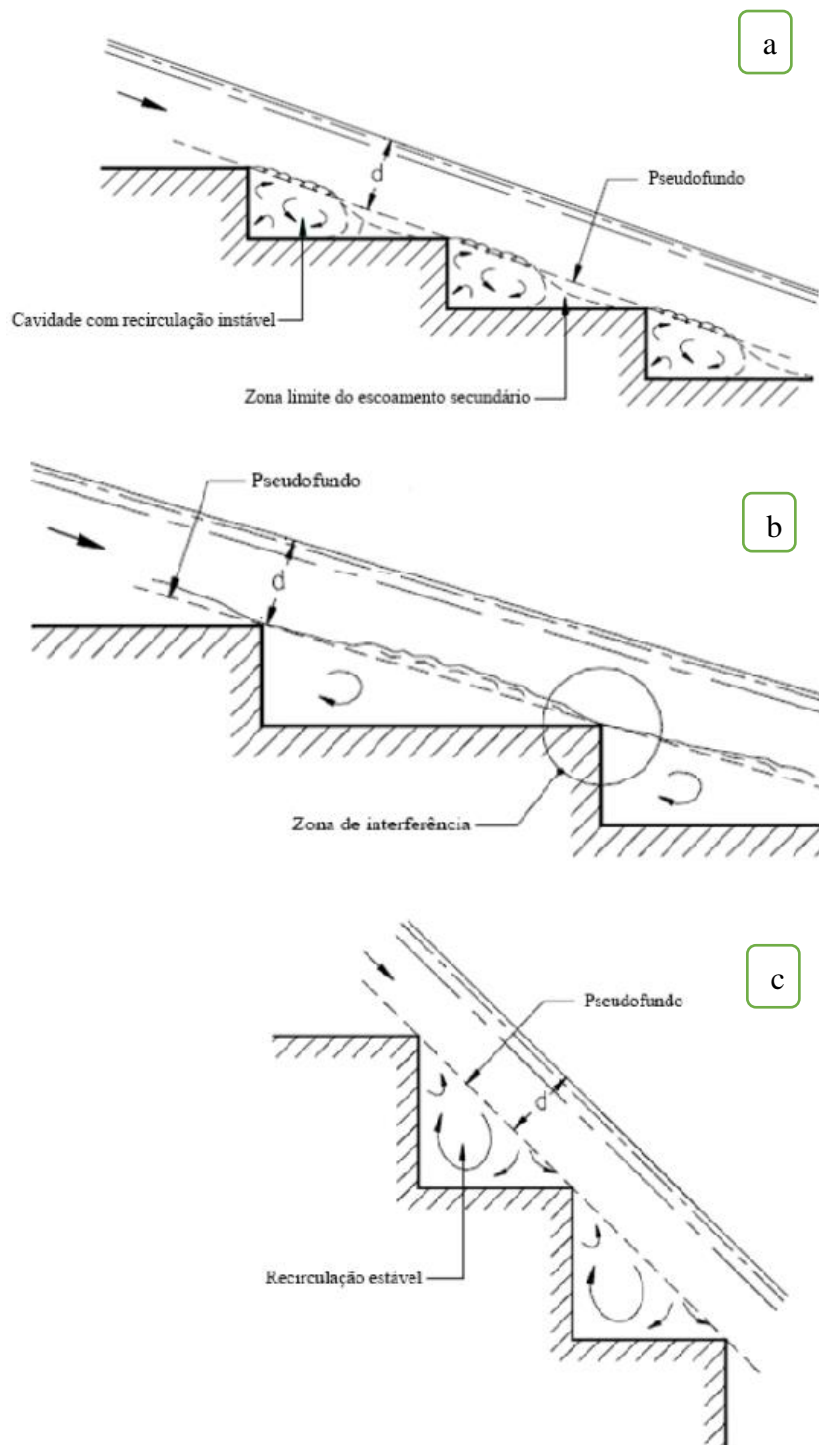


Figura 4.5: Subdivisões do Regime de Escoamento Deslizante. (a) SK1; (b) SK2 e (c) SK3.

Fonte: Adaptado de Faria (2014)

Também para o último regime de escoamento, aumentando-se o valor da vazão sobre uma descida ou vertedouro em degraus, inúmeros autores propuseram equações de ajuste aos dados experimentais para localização dos limites.

Chanson (1994), através dos dados de Horner (1969) e outros autores, propôs uma expressão para a ocorrência do escoamento deslizante sobre turbilhões. Por meio de um limite da profundidade crítica (y_c) associada à geometria, conforme Equação 4.7. Ou seja, quando valor de y_c calculado pela equação for superior ao valor disponível pelo escoamento, tem-se o regime supracitado. Pode-se adotar essa medida como limite inferior do escoamento deslizante sobre turbilhões.

$$\frac{y_c}{h} = 1,057 - 0,465 \left(\frac{h}{l}\right) \quad (4.7)$$

Porém, a equação acima foi desenvolvida ainda quando o autor não reconhecia a existência do regime de transição proposto, pela primeira vez, por Ohtsu e Yasuda (1997). Dessa forma, em 2001, por meio de análise de vários outros dados disponíveis na literatura e experimentos próprios, Chanson (2001), formulou nova equação para o limite inferior do escoamento deslizante, conforme Equação 4.8:

$$\frac{y_c}{h} = 1,2 - 0,325 \left(\frac{h}{l}\right) \quad (4.8)$$

As Equações 4.7 e 4.4 foram adaptadas a partir de dados de vertedouros em degraus com piso horizontal e para valores de h/l entre 0,05 e 1,7 ($2,9^\circ < \alpha < 59,5^\circ$).

Finalmente, para conclusão dos pares superiores e inferiores por autores dos regimes de quedas sucessivas, transição e deslizante sobre turbilhões, Ohtsu et al. (2001), também desenvolveram o seu limite inferior do último regime por meio da Equação 4.9. Assim, como a Equação 4.3, estabelece-se também o regime de transição:

$$\frac{h}{y_c} = 1,16 (\tan \alpha)^{0,165} \quad (4.9)$$

Diversos autores elaboraram suas equações para os regimes, através da diversidade delas é possível concluir que os regimes de escoamentos em degraus são complexos e necessitam de experimentação para previsão. Boes e Hager (2003) também propuseram um equação para o regime deslizante, para ângulos de 30° , 40° e 50° graus com a horizontal (α), Equação 4.10:

$$\frac{y_c}{h} = 0,91 - 0,14 (\tan \alpha) \quad (4.10)$$

Na Figura 4.6 é possível a visualização global dos regimes possíveis de escoamento em degraus. Ou seja, variando-se a vazão em dada geometria, tem-se três regimes possíveis. Não citando seus subregimes. O regime de escoamento deslizante sobre turbilhões EDT1 correspondente ao escoamento com recirculação instável com interferência esteira-degrau (SK1) e o regime de escoamento deslizante sobre turbilhões EDT2 refere-se ao interferência esteira-esteira (SK2).

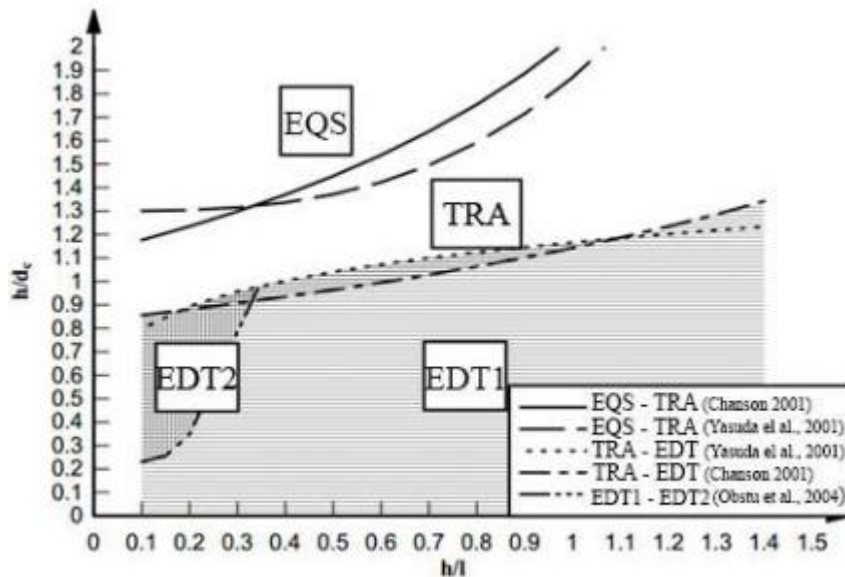


Figura 4.6: Diferentes tipos de escoamento em degraus. Três principais regimes.

Fonte: Faria (2014)

4.1.3 Aeração e posição de início

O fenômeno de incorporação de ar no escoamento em degraus é altamente complexo. A dissipação de energia no regime deslizante ocorre, principalmente, pela fricção da camada acima do pseudofundo com os vórtices abaixo por efeito de tensão cisalhante entre elas. Além disso, a partir do atingimento da camada limite à superfície livre, inicia-se a incorporação de ar no escoamento, aumentando a turbulência e dissipação da energia (CHANSON, 2015).

Para vital entendimento do escoamento global em uma descida ou vertedouro em degraus, Chanson (1994), propôs a classificação de três zonas distintas, como bem destacou Dai Prá (2004):

- **zona sem aeração do fluxo:** nota-se no trecho inicial do vertimento que em seu interior desenvolve-se a camada limite até esta atingir a superfície livre, ponto a partir do qual inicia-se o processo de aeração natural do escoamento;
- **zona de escoamento gradualmente variado:** esta região de escoamento é caracterizada por fluxos aerados com concentrações de ar variáveis ao longo da calha. Além de aumento gradual da profundidade; e
- **zona de escoamento uniforme:** região onde, para uma mesma vazão, tem-se um escoamento com profundidades, concentração de ar e distribuições de velocidades constantes. Neste regime de escoamento verifica-se uma profundidade uniforme do escoamento (y_n).

A Figura 4.7 ilustra bem essas citações da literatura. Importante ressaltar que o desenvolvimento ideal, bem comportado, da camada limite na primeira zona está condicionada à existência do perfil balístico, muitas vezes do tipo *Creager*. Porém, a não existência do perfil de aproximação não impede o aparecimento da primeira zona e sua “formação”. Como diversos estudos mostram (BENTALHA; HABI, 2019; MEDHI *et al.*, 2019; ZHAN; ZHANG; GONG, 2016; ZHANG; CHANSON, 2016b):

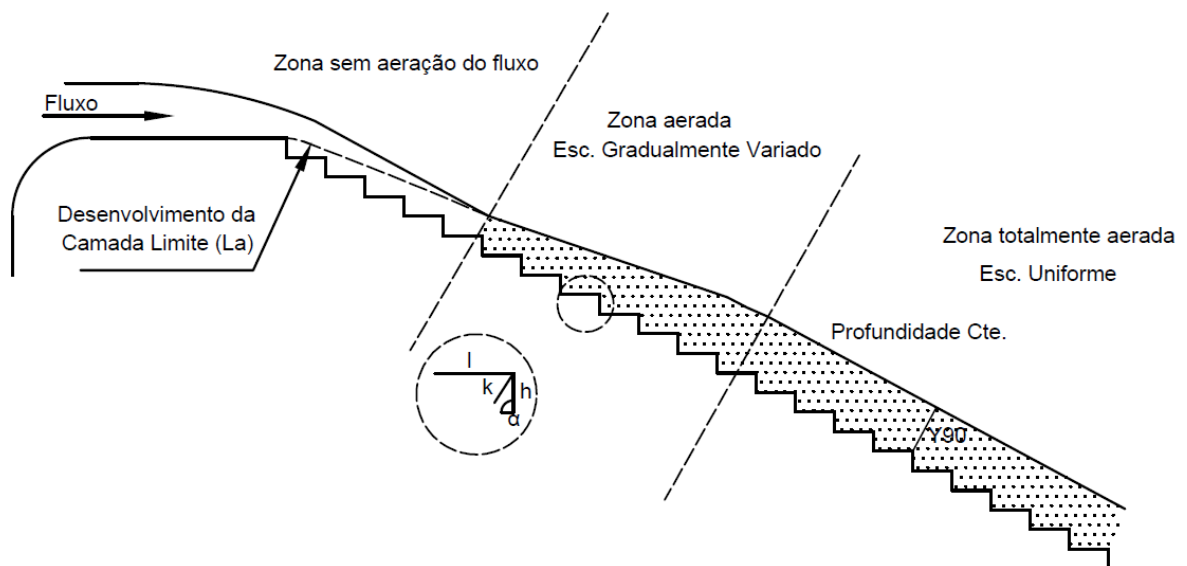


Figura 4.7: Zonas do escoamento em Degraus.

De forma sintética, apresenta-se as principais formulações desenvolvidas no referencial teórico por meio dos autores mais citados na matéria através da Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Formulações para o comprimento do desenvolvimento da camada limite.

Formulações propostas	Autores	Equação
$\frac{\delta}{L_p} = 0,8 \left(\frac{L_p}{K_r}\right)^{-0,233}$	Bauer, 1954	4.11
$\frac{y_A}{L_A} = 0,8 \left(\frac{L_A}{K_A}\right)^{-0,233}$ $K_A = h * \cos\alpha$	Tozzi, 1992	4.12
$\frac{L_A}{K} = 9,8 * \text{sen}(\alpha)^{0,08} * (F^*)^{0,71}$ $\frac{y_A}{K} = \frac{0,4}{(\text{sen}(\alpha)^{0,04} * (F^*)^{0,64}}$	Chanson, 1994	4.13
$\frac{L_A}{K} = 8,29 \left(\frac{q}{\sqrt[2]{g * K^3 * \left(\frac{h}{l}\right)}}\right)^{0,85}$	Chamani, 2000	4.14
$\frac{L_A}{K} = 6,75 * (F^*)^{0,76}$	Meireles <i>et al.</i> , 2012	4.15

Observação: L_A, L_p = Comprimento do desenvolvimento da camada limite (m) total (a) e a certo ponto (p), q = vazão específica (m^3/sm), h e l são espelho e patamar do degrau (m), K, K_A e K_r = rugosidade relativa, α = inclinação em graus, F^* o número de *Froude* definido pela rugosidade relativa do degrau = $q/\sqrt{g k^3 \text{sen}\alpha}$ e y_A é a profundidade ao final da camada limite (m).

Além da posição de início da aeração, ou seja, local onde a camada limite atinge o nível de superfície e inicia-se o processo de incorporação de ar, é extremamente importante mensurar a concentração e distribuição total e média de ar da mistura. Dessa forma, diversos autores trabalharam com dados experimentais variados e obtiveram aproximações para concentração de ar “Ca” (volume de ar/volume de ar + volume de água) da mistura em dado ponto (DAI PRÁ *et al.*, 2016).

Para os estudos de pressões reinantes, curvas probabilísticas de cavitação e velocidade final da descida ou vertedouro em degraus, as formulações contam com equações de previsão da concentração do ar. Essa variável afeta diretamente a velocidade final. Saliencia-se que a aeração começa na segunda zona de escoamento gradualmente variado, indo até a terceira final com escoamento uniforme. A formação completa dos zoneamentos depende de comprimento suficiente da queda, geometria e vazão (VALERO, DANIEL; BUNG, 2016).

A forma genérica teórica é proposta por Chanson (2002) a partir da Equação 4.16 seguinte. Clara é a visualização das camadas e variáveis relevantes.

$$C_{mean} = \int_0^{Y_{90}} C_a dy \quad (4.16)$$

na qual: C_a = concentração de ar (%), Y_{90} = distância y (m) a partir do pseudofundo onde $C_a=90\%$ e C_{mean} = concentração média associada a uma profundidade média representativa (y).

Como enunciado, o escoamento em degraus é altamente complexo. Nesse sentido, diversas são as metodologias e ajustes matemáticos feitos aos inúmeros dados experimentais disponíveis. Um relevante trabalho para todos os cálculos, da concentração de ar até a velocidade final da descida ou vertedouro, foi desenvolvido por Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004). O programa SisCCoH, desenvolvido pelo Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, utiliza, em seu algoritmo, as equações desses autores para o escoamento em degraus. A referida formulação também será adotada no presente trabalho. A Equação 4.17 demonstra a concentração média obtida pelos autores por meio do tratamento de inúmeros dados experimentais.

$$C_{mean} = D - 0,3 e^{-5\left(\frac{h}{yc}\right) - 4\left(\frac{h}{yc}\right)} \quad (4.17)$$

na qual: $D = 0,3$ se $5,7^\circ \leq \alpha \leq 19^\circ$ e $0,1 \leq \frac{h}{yc} \leq \left(\frac{h}{yc}\right)_s$ com $\left(\frac{h}{yc}\right)_s = \frac{7}{6}(\tan \alpha)^{1/6}$ p/ $5,7^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$.

ou $D = -2 * 10^{-4} \alpha^2 + 2,14 * 10^{-2} \alpha - 3,57 * 10^{-2}$ se $19^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ e $0,1 \leq \frac{h}{yc} \leq \left(\frac{h}{yc}\right)_s$

Como efeito demonstrativo da progressão temporal de pesquisas e novos ajustes à concentração de ar média e total da massa líquida em um ponto, Zhang e Chanson (2017), por meio de estudos envolvendo a difusividade das bolhas de ar (Da) alcançaram nova formulação. A Equação 4.18 conta com índices complexos descritos no trabalho citado, obtida através de uma parametrização de variáveis.

$$C_{mean} = \frac{1,82 \sqrt{Da * t}}{Y_{50} + 1,82 \sqrt{Da * t}} \quad (4.18)$$

na qual: Da = difusividade das bolhas de ar, obtida por formulações derivadas do trabalho citado, $t = (x - L_i)/V_a$ sendo x a posição longitudinal (m) a partir da crista com L_i sendo desenvolvimento da camada limite (m) e V_a a velocidade de fluxo média no ponto (m/s). Y_{50} é a profundidade y (m) onde $C_a=50\%$.

4.1.4 Dissipação de energia

O principal motivo da utilização de descidas e vertedouros em degraus é a diminuição da energia do escoamento ao longo do próprio percurso. Ou seja, a energia residual no pé da estrutura deve ser a menor possível, diminuindo os custos de estrutura a jusante e aumentando a segurança do projeto geotécnico dos taludes e bermas, quando se envolver sequenciamento.

4.1.4.1 Fator de atrito “f”

Por meio da consideração de que a terceira zona de escoamento, uniforme com sua profundidade constante, foi atingida, diversos autores propuseram metodologias de cálculo para o fluxo em degraus envolvendo o fator de atrito de Darcy-Weisbach (f). No regime de escoamento deslizante sobre turbilhões é necessário verificar se o comprimento da calha é suficiente para formação da última zona. Uma vez que no regime em quedas sucessivas não se bifurcam as formulações quanto ao atingimento ou não da condição uniforme (DAI PRÁ *et al.*, 2016).

Rajaratnam (1990) definiu o cálculo do coeficiente de atrito (c_f) a partir da equação da quantidade de movimento e considerando o escoamento plenamente desenvolvido após os primeiros degraus. Portanto, o coeficiente de atrito e o fator estão relacionados pela razão de 1/4, ou seja, $c_f = f/4$.

Com objetivo de otimizar as imensas informações disponíveis sobre as formulações existentes para o fator de resistência do escoamento deslizante em degraus, apresenta-se a Tabela 4.2 com a compilação das principais fórmulas obtidas da literatura. Salienta-se especial atenção ao trabalho de Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004) que será adotado no trabalho e é o método de cálculo do programa SisCCoH já citado.

Tabela 4.2: Resumo das proposições teóricas e experimentais do fator de resistência.

Condições	Formulações propostas	Autores	Equação
Teórica	$c_f = \frac{f}{4} = \frac{2 y_n^3 g \operatorname{sen} \alpha}{q^2}$	Rajaratnam, 1990	4.19
Teórica	$f = \left(1,14 + 2 \log \frac{4h}{k} \right)^{-2}$	Stephenson, 1991	4.20
Teórica	$f = \frac{8 y_n^2 g \operatorname{sen} \alpha Dh}{q^2 4}$	Chanson, 1993	4.21

53°; 5 ≤ k ≤ 60mm	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2,16 + 1,24 \log\left(\frac{h}{k}\right)$ para $\frac{h}{k} > 1,8$	Tozzi, 1992	4.22
8,5°; 19,8 ≤ k ≤ 39,6mm	$f = 0,163$ para $\frac{h}{k} \leq 1,8$		
51,34° e 59° 31,2 ≤ h ≤ 125mm	$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3,53 + 3,85 \log\left(\frac{h}{k}\right)$	Chamani e Rajaratnam, 1999	4.23
5,7° ≤ α ≤ 19°	$f = f_{m\acute{a}x} - A \left(0,5 - \frac{h}{yc}\right)^2$ para 0,1 ≤ h/yc ≤ 0,5 ou $f = f_{m\acute{a}x}$ para 0,5 ≤ h/yc ≤ $\left(\frac{h}{yc}\right) s$		
	$A = -1,7 * 10^{-3} * \alpha^2 + 6,4 * 10^{-2} * \alpha - 1,5 * 10^{-1}$ $f_{m\acute{a}x} = -4,2 * 10^{-4} * \alpha^2 + 1,6 * 10^{-2} * \alpha + 3,2 * 10^{-2}$ $R^2 = 0,919$	Ohtsu; Yasuda e Takahashi, 2004	4.24
19° ≤ α ≤ 55°	$f = f_{m\acute{a}x} - A \left(0,5 - \frac{h}{yc}\right)^2$ para 0,1 ≤ h/yc ≤ 0,5 ou $f = f_{m\acute{a}x}$ para 0,5 ≤ h/yc ≤ $\left(\frac{h}{yc}\right) s$		
	$A = 0,452$ $f_{m\acute{a}x} = 2,32 * 10^{-5} * \alpha^2 - 2,75 * 10^{-3} * \alpha + 2,31 * 10^{-1}$ $R^2 = 0,835$		
1V:1H h=30,60,90 mm	$\frac{f_L}{f_k} = 1,09 e^{-0,834 \frac{Lp}{LA}}$ $R^2 = 0,83$	Dai Prá <i>et al.</i> , 2016	4.25

Observação: f_L = fator de resistência da calha lisa equivalente, f_k = fator de resistência da calha em degraus, $K = h \cos \alpha$, α = inclinação em graus, y_n = profundidade normal do escoamento uniforme (m), D_h = diâmetro hidráulico da seção considerada ($4 * \text{área molhada} / \text{perímetro molhado}$) e $\left(\frac{h}{yc}\right) s$ limite dimensional superior aos dados apresentado no trabalho de Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004).

Portanto, é imprescindível para avaliação de projeto e científica a determinação do fator de atrito da descida ou vertedouro em degraus. A literatura prevê comparação entre descidas lisas e escalonadas (degraus), o coeficiente de Chézy (C) pode ser igualado ao fator e ao coeficiente de Manning. Conforme mostra a Equação 4.26, importante para comparação com descidas lisas.

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} = \frac{Rh^{\frac{1}{6}}}{n} \quad (4.26)$$

4.1.4.2 Dissipação de energia

A estimativa da energia residual no pé do vertedouro ou descida em degraus é primordial para qualquer etapa de projeto. Vários autores buscaram relações a partir de experimentos, mas devido à complexidade do fenômeno nas estruturas em foco, diversos trabalhos optam por gráficos com as relações adimensionais envolvidas para previsões futuras. As principais cargas hidráulicas envolvidas no processo são (CHANSON,2015):

- **Energia geométrica disponível (E_{dam}):** Energia disponível no desnível geométrico bruto entre a crista do vertedouro ou descida e a cota final de pé;
- **Energia hidráulica disponível (E_1):** Energia de carga hidráulica estática disponível na reservação de montante ou reservatório. Soma de $E_{dam} + \text{nível de água}$;
- **Energia máxima hidráulica ($E_{máx}$):** Energia de carga hidráulica dinâmica disponível no vertimento da descida ou vertedouro em degraus. Soma de $E_{dam} + \frac{3}{2} y_c$; e
- **Energia Residual (E_{res}):** Energia residual final após a queda. $E_{res} = d_0 + \frac{V^2}{2g}$, com d_0 sendo a profundidade final no pé da estrutura e V a velocidade.

O trabalho de Dai Prá et al. (2016) avaliou a dissipação de energia em vertedouros em degraus de inclinação de 45°. A faixa de redução da energia, comparado delta de entrada e saída das estruturas, foi da ordem de 90% para algumas geometrias (adimensionais envolvendo h/l). O efeito da aeração também ficou evidenciado. Observou-se que para os degraus de 90 mm, um máximo de 45% da energia disponível a montante foi dissipada na região não aerada da calha. Já para os degraus de 60 mm e 30 mm os percentuais correspondem, em média, a 55% e 65% respectivamente na região. Ou seja, de fato a incorporação de ar é vital para o aumento da turbulência e dissipação da energia.

A avaliação da dissipação pode ser determinada em qualquer ponto da calha por meio de um delta de eficiência, conforme demonstra Equação 4.27 (DAI PRÁ *et al.*, 2016).

$$\frac{\Delta E}{E_m} = (E_m - E_p)/E_m \quad (4.27)$$

na qual: E_m é a energia total disponível a montante e E_p é a energia residual na seção onde está sendo avaliada a dissipação, ambas em metro.

No regime de escoamento deslizante sobre turbilhões usualmente considerado no projeto de descidas e vertedouros em degraus, um forte consumo de energia por transferência de momento entre a cavidade do degrau e a camada acima do pseudofundo é observada. A energia residual (E_{res}) é diretamente relacionada ao fator de atrito (f), conforme Equação 4.28 (CHANSON, 2015).

$$\frac{E_{res}}{E_{m\acute{a}x}} = \frac{\left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \alpha}\right)^{\frac{1}{3}} + \frac{a}{2} \left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \alpha}\right)^{-\frac{2}{3}}}{\frac{3}{2} + \frac{E_{dam}}{y_c}} \quad (4.28)$$

na qual: “ a ” é um fator de correção da energia cinética em relação a distribuição de velocidades acima do pseudofundo, usualmente igual a 1,1.

Chanson (2002) afirmou que, para o regime de escoamento em quedas sucessivas, a energia residual pode ser estimada pelas Equações 4.29 e 4.30. Como para todo processo de escoamento em degraus, os dados foram ajustados de pesquisas experimentais disponíveis na literatura desde Horner (1969). Chanson (2002) enunciou que os dados se ajustam bem aos sub-regimes NA1 e NA2, ou seja, sem formação de ressalto hidráulico. A ordem exposta na literatura é sempre o tratamento adimensional para cada regime que se pretende estudar, a partir de dados experimentais, dada complexidade do fenômeno desse tipo de escoamento.

$$\frac{E_{res}}{y_c} = 6 * \left(\frac{E_{dam}}{y_c}\right)^{-0,3} \quad 2 < \frac{E_{dam}}{y_c} < 20 \quad (4.29)$$

$$\frac{E_{res}}{y_c} = 3,34 * \left(\frac{E_{dam}}{y_c}\right)^{-0,027} \quad 30 < \frac{E_{dam}}{y_c} < 75 \quad (4.30)$$

A perda de energia na calha escalonada é função, brevemente, da geometria dos degraus, vazão e comprimento para obtenção das três zonas distintas.

4.1.5 Velocidade Terminal

A velocidade terminal de uma descida ou vertedouro em degraus é função de diversas variáveis como abordado neste capítulo. Para determinação analítica teórica, do ponto de vista

matemático, é inevitável diversos passos de cálculo anteriores. A Equação 4.31 traduz a determinação do valor escalar aproximado da velocidade (V_w) em função da profundidade da água no escoamento deslizante sobre turbilhões (OHTSU; YASUDA; TAKAHASHI, 2004).

$$V_w = \frac{q}{d_w} \quad (4.31)$$

na qual: profundidade da região acima do pseudofundo no pé da estrutura $d_w = y_c \left(\frac{f}{8 \operatorname{sen} \alpha} \right)^{\frac{1}{3}}$ e q é a vazão específica por metro (m^3/sm).

Ainda, por Chanson (2015), para tratamento adimensional do problema é interessante destacar a velocidade máxima ideal ($V_{m\acute{a}x}$) possível pela Equação 4.32:

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2 * g * (E_1 - d \cos \alpha)} \quad (4.32)$$

Como as variáveis são muitas como altura e comprimento do degrau, inclinação do paramento, rugosidade e vazão, é difícil estabelecer uma única equação para atender todas as configurações possíveis. Dessa forma, é extremamente utilizado pela literatura curvas adimensionais para obtenção da velocidade final. A Figura 4.8 ilustra os ajustes de diversos dados reunidos no trabalho importante de Chanson (2015).

É bastante notável a importância da abordagem experimental do problema da velocidade terminal, tanto para descidas lisas quanto para degraus. O cálculo tradicional por meio de curvas do escoamento gradualmente variado, na configuração de uma descida lisa, por exemplo, encontra limitações, apesar de ser uma alternativa para primeira aproximação da resposta. Como uso do método de passo padrão e estimativa da profundidade final. Portanto, a validade da aplicação do coeficiente e equação de Manning para faixas de inclinação até 10° , distribuição de pressões não hidrostáticas (fator do cosseno ao quadrado) e incorporação de ar não são levadas em conta, ocasionando erros. Dessa forma, as curvas adimensionais experimentais em função do coeficiente universal (f), geometrias e relações de energia disponível e desnível total são excelentes alternativas de contorno a esses problemas limitantes (CHANSON, 2015).

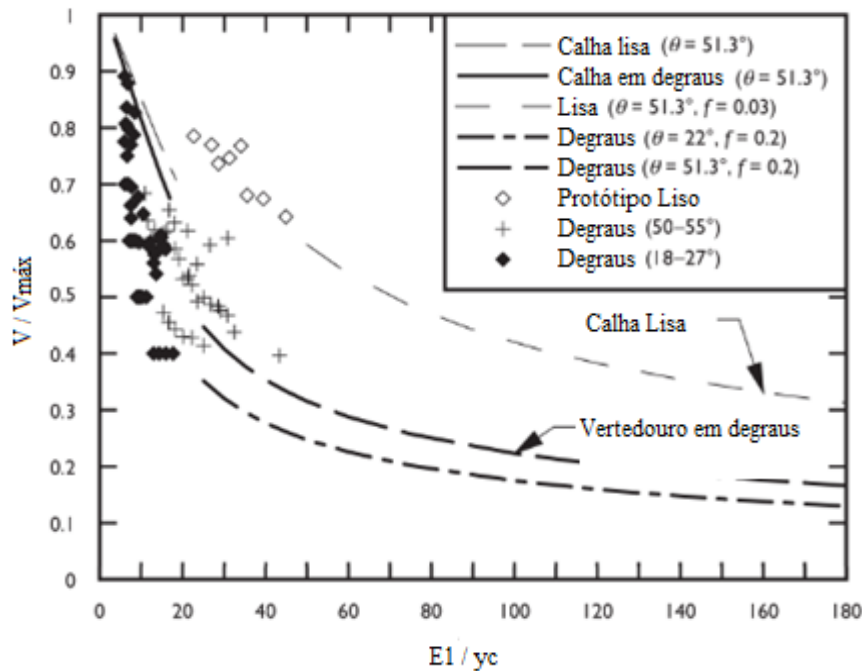


Figura 4.8: Velocidade final no pé de vertedouros em degraus. Comparação entre lisos e degraus.

Fonte: adaptado de Chanson (2015)

4.1.6 Concepção das pressões atuantes nos degraus

O estudo das pressões atuantes nos degraus de vertedouros ou descidas de água tem sido explorado continuamente em pesquisas ao redor do mundo. O controle da possibilidade de cavitação, principalmente na primeira zona do escoamento não aerado, ao longo da calha é fundamental. Além disso, mesmo após a zona primária, existem flutuações de pressão nos espelhos e patamares das macro-rugosidades que podem ocasionar degradação estrutural.

Osmar (2016) analisou os esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H. Dentre diversas conclusões importantes sobre a atuação das pressões instantâneas e médias nas regiões da queda, estão a reafirmação da existência de pressões mínimas negativas nas faces superiores dos espelhos e máximas positivas nos finais dos patamares. Foram ensaiadas diversas situações para estabelecimento de curvas probabilísticas de ocorrência do fenômeno de cavitação. Prova da continuidade e importância de se entender e controlar pressões nesse tipo de obra hidráulica, uma vez que Tozzi (1992) já estabeleceu curvas de probabilidade de

ocorrência de pressões negativas de 1% e 10% em calhas com 53,53° e quatro rugosidades relativas¹, (k= 10, 20, 30 e 60 mm).

Através de determinada configuração geométrica típica do vertedouro ou descida, é possível estabelecer faixas de vazões de segurança para o controle de cavitação. O uso de concreto compactado à rolo (CCR) a partir da década de 70 e, atualmente, de geocélulas revestidas em cimento exigem o entendimento correto das flutuações de pressões negativas na estrutura. Uma vez que o concreto não é recomendável ao trabalho demasiado de tração (GOMES, 2006) (OSMAR, 2016).

Sanagiotto (2003) instrumentou um vertedouro, em escala 1:10, de 1V:0,75H com três diferentes alturas de rugosidades relativas (k=18, 36 e 54 mm). Foram utilizados piezômetros convencionais e transdutores de pressão. A autora encontrou um aumento das pressões no piso do degrau com o aumento destes (k). As pressões médias máximas foram verificadas nas posições mais externas do piso de cada macro-rugosidade, e estão na faixa de -0,014 e 0,455 m.c.a. Já as pressões médias mínimas foram detectadas no espelho dos degraus, nas posições próximas ao vértice superior que delimita o pseudofundo. Esses valores ficaram compreendidos entre -0,062 e 0,245 m.c.a. O efeito de recirculação dos vórtices causa, evidentemente, a flutuação no escoamento deslizante sobre turbilhões. Regime que é adotado no dimensionamento de projeto.

Xu *et al.* (2015) trabalharam com calhas escalonadas com espelhos de 2,5, 5 e 10 centímetros de altura com 24 e 48 degraus de combinação nos experimentos, a fim de se verificar a formação das três zonas possíveis e premeditar a ocorrência de pressões negativas. De fato, a possibilidade maior de cavitação encontra-se na zona primária não aerada, local onde a camada limite ainda não se desenvolveu completamente antes de tocar a superfície da água. Portanto, analisou-se os valores em escala para previsão futura de instalação de um aerador nessa região mais crítica. Solução alternativa bastante comum em projetos, a fim de se evitar o problema da cavitação. Além disso, foi detectada ocorrência de pressões negativas nos extremos superiores dos espelhos, ao longo da calha, e pressões extremas positivas nos finais dos patamares de cada degrau. Indo de acordo aos demais autores citados nesse assunto. Assim, é recomendável a verificação da faixa de vazões possíveis de projeto quanto à cavitação global e local.

¹ Termo derivado do inglês e adotado pela literatura de trabalhos em português

4.2 Sistema (Descida + Bacia)

A estrutura de dissipação a jusante de descidas ou vertedouros lisos ou escalonados (degraus) são de alto valor econômico. Por sua vez, garante maior segurança global ao projeto a fim de se evitar erosões de pé e controle da velocidade de queda para o próximo desnível em sequência, se este houver. Diversos órgãos de pesquisa ao redor do mundo estabeleceram configurações típicas dessas bacias de dissipação para condições de entrada do fluxo bem pré-estabelecido. O Departamento de Recuperação do Estados Unidos (USBR) propôs inicialmente cinco tipos padrões de bacias de dissipação. Tornando-se dez tipos alguns anos depois. Dentre eles, destacaram-se os tipos II e III para altos números de *Froude* e o tipo IV para baixos números (PADULANO *et al.*, 2017).

O estudo isolado dessa estrutura é inteligente quando não há o problema do sequenciamento de quedas. Por meio da verificação da velocidade final, e conseqüente número de *Froude* associado, torna-se suficiente para o dimensionamento da estrutura final de dissipação. Porém, uma vez que se constata a existência de quedas sucessivas no projeto, como drenagem de taludes rodoviários e empilhamentos, como caso de pilhas de estéril, faz-se necessária a avaliação das estruturas associadas de descidas em degraus e bacia de dissipação. A simples utilização de uma bacia parametrizada pode levar a uma profundidade subcrítica elevada antes da próxima queda. Fato não econômico. Dessa forma, é correto dissipar o suficiente de energia para que as condições hidráulicas de entrada e saída do sistema sejam iguais ou muito próximas.

Teixeira (2008) demonstrou como a influência do efeito de escala afeta a flutuação das pressões junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. A gama de curvas de probabilidade de cavitação e extremos de pressão que geram o dimensionamento da estrutura não é consolidado. Portanto, cabe ao ensaio experimental definir a correta escolha por faixas de domínio de vazões e geometrias.

Valero, Bung e Crookston (2018) analisaram diversas configurações de quedas lisas e em degraus para o tipo III de bacia de dissipação do Departamento de Recuperação dos Estado Unidos. Inclinações variando de 1V:0,8H até 1V:4H e números de *Froude* de 3,1 até 9,5 foram testados. Os ensaios foram realizados através de simulações numéricas por meio de CFD. Foi possível concluir que, no caso em degraus, a configuração geométrica pode ser otimizada. Uma vez que as flutuações de pressão são desfavoráveis para certas vazões. Ou seja, cada tipo deveria ser verificado para o projeto específico ao contrário de uma simples prescrição pelo número de

Froude. Processos de aeração e, conseqüentemente, atingimento das zonas completas na descida não são levadas em conta no processo de dimensionamento clássico. Vale apontar a relevância atual, e maior futura, das simulações computacionais aplicadas no estudo.

Simões (2008) apresentou metodologias adimensionais para o pré-dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico aplicadas a jusante de vertedouros em degraus. Trata-se de uma ideia interessante para início dos trabalhos de modulação de um sistema.

De forma geral, a Tabela 4.3 aponta resumidamente as principais configurações típicas de bacias de dissipação desenvolvidas por laboratórios de pesquisas hidráulicas ao redor do mundo (CHANSON, 2015).

Tabela 4.3: Principais bacias de dissipação parametrizadas por órgãos de pesquisa.

Instituição de Pesquisa	Bacias de Dissipação	Recomendações
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo I	$1,7 < Fr < 2,5$ Sem presença de blocos, raramente recomendada devido às questões de segurança.
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo II	$Fr_1 > 4,5$ $V_1 > 18 \frac{m}{s}$ Barragens com altura expressiva, canais e vertedouros largos.
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo III	$Fr_1 > 4,5$ $V_1 < 18,3 \frac{m}{s}$ $q < 18,6 \frac{m^3}{s m}$
Departamento de Recuperação dos Estados Unidos (USBR)	Tipo IV	$2,5 < Fr < 4,5$ Ressaltos hidráulicos oscilantes e obras de médio porte.
Laboratório (SAF) Saint Anthony Falls. Universidade de Minnesota.	SAF	$1,7 < Fr < 2,5$ A Jusante de pequenas estruturas hidráulicas como bueiros, tubulações e descidas ou vertedouros.
Departamento de Obras Públicas (PWB) & Estação Experimental (WES) - EUA	PWB (Public Works Department) WES (Waterways Experiment Station)	Jusante de tubos circulares com diâmetro: $450mm \leq \phi \leq 1850mm$ Estruturas de queda menor que 3ϕ e velocidades menores que $U < 2\sqrt{g\phi} = 6,264\phi^{0,5}$

Administração Federal de Rodovias (FWHA) – EUA	FWHA	Jusante de bueiros e canais. Recomendadas três partes com diferentes inclinações e cotas em cada uma delas.
Instituto Hidráulico de Leningrad (VNIIG)	Gunko	Bacias de dissipação compactas com bloco contínuo, dimensionado pelo Froude, e quedas menores que 40 metros. Além de $q < 80 \frac{m^3}{s m}$
	Lyapin	Bacias de dissipação compactas com linha de blocos, dimensionada por função auxiliar, e quedas menores que 20 metros. Além de $q < 80 \frac{m^3}{s m}$
	Kumin	Bacias de dissipação compactas com presença de alta aeração. Adequada para quedas menores que 30 metros. Além de $q < 100 \frac{m^3}{s m}$

Portanto, o tratamento da estrutura da bacia de dissipação de forma isolada não é o mais recomendado, principalmente para obras com quedas sequenciais. A verificação da energia residual, disponível na entrada da bacia, é função de variáveis complexas devido a incorporação de ar, no caso do escoamento em descidas ou vertedouros em degraus. Assim, faz-se necessária a investigação do sistema completo de queda e dissipação final (CHANSON, 2001).

Novakoski *et al.* (2017) realizaram ensaios com bacias de dissipação acopladas a descidas em degraus e lisas para números de *Froude* variando de 5 a 8 e 4,5 a 10, respectivamente. O controle do sistema é fundamental na estrutura final devido à presença de flutuação de pressão causada pelo ressalto hidráulico. O comprometimento do material constituinte pode se dar por fadiga, subpressão e cavitação. Esse estudo verificou a distribuição longitudinal das pressões médias, das flutuações e dos coeficientes de assimetria e curtose, oriundos dos ensaios realizados em modelos físicos hidráulicos do sistema.

Hager (1992) discutiu a existência de um fenômeno denominado *Weir Flow*. Os trabalhos de Alikhani, Behrozi-Rad e Fathi-Moghadam (2010) e Conterato (2014) também mostraram essa condição hidráulica em soleiras a jusante de vertedouros em degraus. Trata-se da elevação altamente aerada do escoamento formando um “reservatório” a montante da soleira. Salienta-se que, mesmo abaixo de uma transição vertical crítica, segundo a curva de energia específica do escoamento, existe a “mudança de regime” para subcrítico com dissipação de energia. O fenômeno não é recomendado para obras de grande porte, por causar turbulência e flutuações de pressões negativas intensas, antes e depois da soleira.

O comportamento hidráulico nessa condição, segundo Hager (1992) foi estabelecido por duas alturas, máxima e ótima da soleira, para evitar-se o *Weir Flow*. O autor limitou o número de *Froude* no pé do vertedouro ou descida (Fr_1) à altura máxima da soleira (s) em função de um adimensional ($s_L = s/y_1$) relacionado à profundidade final y_1 . As Equação 4.33 e 4.34 mostram essas relações.

$$s_L = \frac{1}{6} Fr_1^{1,645} \quad (4.33)$$

$$s_{ótimo} = 1 + \left(\frac{1}{200}\right) Fr_1^{2,5} \quad (4.34)$$

Hager (1992) e Conterato (2014) ressaltam que o fenômeno o *Weir Flow* é ocasionado pela alta aeração do escoamento e formação de vórtices antes e após a soleira que verte o “reservatório mistura” formado a montante. A Figura 4.9 demonstra o *Weir Flow* em um estudo experimental realizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CONTERATO, 2014).

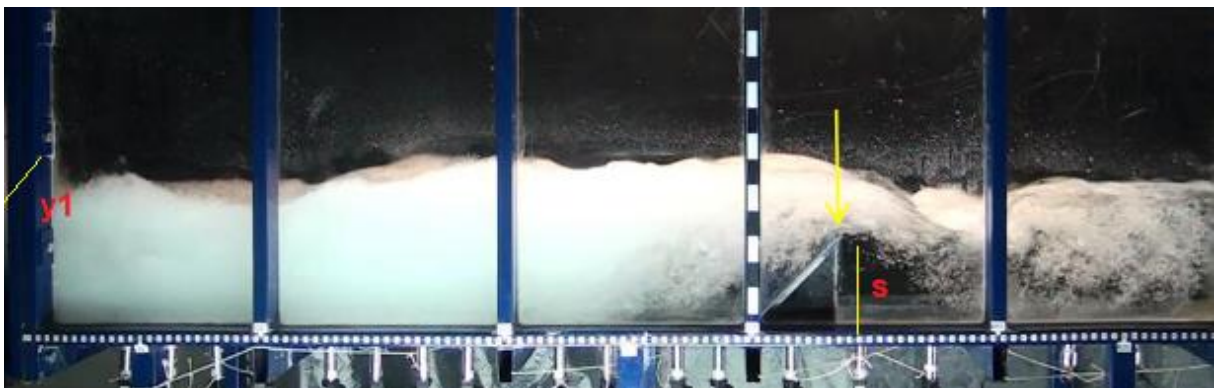


Figura 4.9: Situação de *Weir Flow*, escoamento da esquerda para direita.

Fonte: Adaptado de Conterato (2014)

4.2.1 Análise dimensional e tratamento do sistema (descida e bacia)

Como trabalho explicativo e motivador para o presente estudo foi escolhida uma pesquisa experimental com paramentos em degraus de diferentes inclinações, alturas e número de degraus associados, no sistema, a bacias de dissipação por ressalto hidráulico. O estudo foi desenvolvido no laboratório hidráulico de barragens e pesquisas de engenharia hidráulica da Universidade de Mossul. O número de degraus variou de 9,12 e 15, as relações de inclinação (h/l) de 1/2, 1/3 e 1/4, e as alturas totais dos paramentos de 36 ,45 e 54 centímetros. Sempre com vazão fixa de 55,85 l/s (ALTALIB; MOHAMMED; HAYAWI, 2019).

O trabalho de Altalib, Mohammed e Hayawi (2019) foi desenvolvido em um canal com vazão constante de 55,85 l/s. A Figura 4.10 demonstra a configuração típica do sistema e principais variáveis envolvidas para o tratamento daquela análise dimensional.

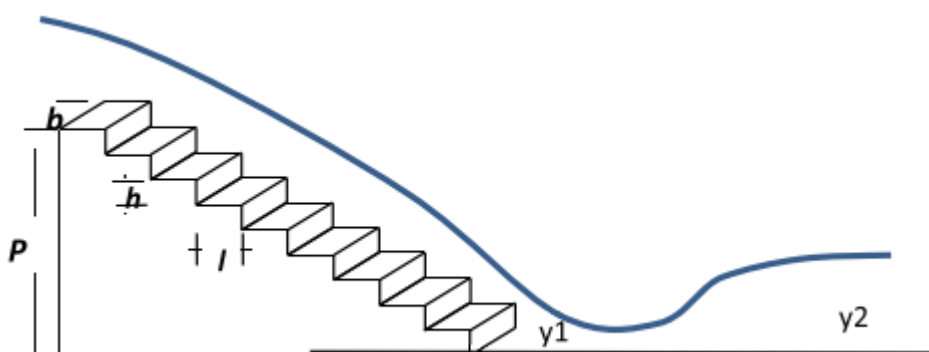


Figura 4.10: Esquema de variáveis da descida em degraus e ressalto hidráulico no sistema.

Fonte: Altalib, Mohammed e Hayawi (2019)

A partir da identificação das variáveis geométricas, cinemáticas e dinâmicas envolvidas no problema, como requisito à aplicação do teorema de Buckingham, a fim de se encontrar igualdade dimensional de massa, comprimento e tempo foi possível aos autores encontrarem a dependência final demonstrada na Equação 4.35.

$$\Delta E = f(P, l, h, n^\circ, b, V_1, V_2, g, y_1, y_2, Lb, \mu, \rho, y_c) \quad (4.35)$$

na qual: n° =número de degraus, Lb = comprimento do ressalto(m), μ =viscosidade dinâmica(kg/sm), ρ = massa específica (kg/m³) e V_1 e V_2 as velocidades de entrada e saída do ressalto na bacia de dissipação (m/s).

A aplicação do teorema de Buckingham finaliza-se com as relações adimensionais entre as variáveis elencadas. Dessa forma, a escolha apropriada das três grandezas representativas pode ser infeliz. É necessário um trabalho de tentativas até a relação final, após igualdade dos π gerados. Assim, os autores, através do teorema, chegaram à Equação 4.36.

$$\Delta E = y_1 \varphi\left(\frac{y_1}{y_2}, \frac{P}{y_c}, \frac{Lb}{b}, \frac{h}{l}, n^\circ, Fr_1, Fr_2, Re\right) \quad (4.36)$$

na qual: Fr_1 e Fr_2 são os números de *Froude* na entrada e saída do ressalto e Re é o número de Reynolds.

Para todas as configurações geométricas narradas, os autores, com os dados experimentais encontrados executaram uma regressão múltipla. O número de Reynolds tem parcela de expoente praticamente desprezível, confirmando a característica do escoamento em canal aberto. A Equação 4.37 demonstra o excelente ajuste com coeficiente de correlação próximo de 1 ($R^2 = 0,998$) (ALTALIB; MOHAMMED; HAYAWI, 2019).

$$\frac{\Delta E}{y_1} = \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^{-0,488} \left(\frac{P}{y_c}\right)^{0,242} \left(\frac{Lb}{b}\right)^{0,39} \left(\frac{h}{l}\right)^{0,562} n^{\circ-2,24} Fr_1^{2,87} Fr_2^{-2,46} \quad (4.37)$$

Dentre os diversos resultados encontrados, como uma das conclusões do trabalho, os autores obtiveram a maior taxa dissipação de energia associada a menor quantidade de degraus na menor altura de queda ($P=36$ cm). Ou seja, na relação de carga altimétrica e macro-rugosidade (degraus), a carga proporcionada pelo desnível geométrico vence. O melhor modelo, levando-se em conta custos de obra, foi o modelo com menor altura e maior inclinação com número de degraus. Assim o comprimento do ressalto fica reduzido, diminuindo-se a estrutura da bacia de dissipação.

A Figura 4.11 demonstra a alta correlação da Equação 4.37 encontrada pelos autores, dentre diversas outras curvas estabelecidas no trabalho.

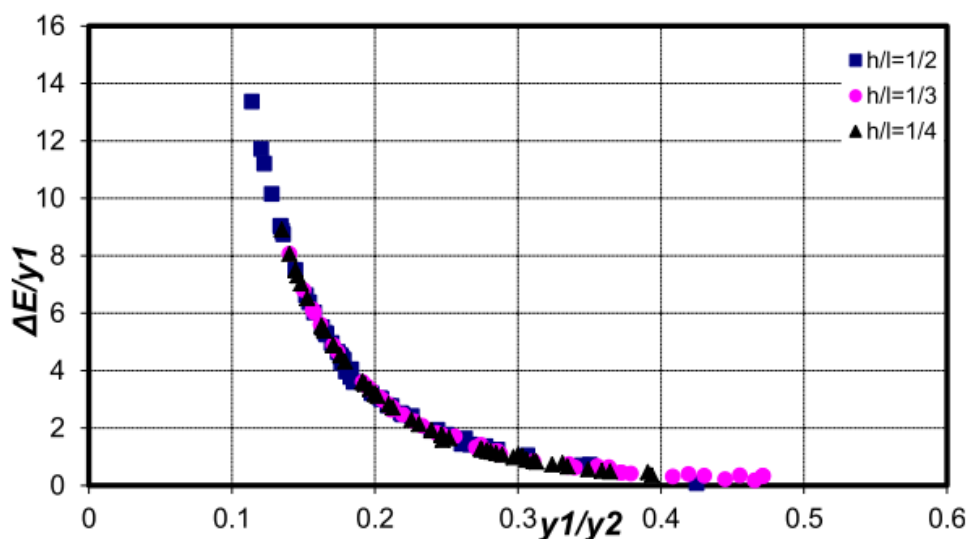


Figura 4.11: Relação entre $\frac{y_1}{y_2}$ e $\frac{\Delta E}{y_1}$ para diferentes inclinações do paramento (h/l).

Fonte: Altalib, Mohammed e Hayawi (2019)

Portanto, fica evidente o problema de dimensionar-se uma descida e bacia, sistema, juntos.

4.3 Modelagem numérica (CFD)

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), os *softwares* utilizados para a modelagem numérica de fluidos ainda não são aplicados na prática de engenharia como outros *softwares* de CAE (*computer-aided engineering*). Essa menor fiabilidade, relativamente aos outros *softwares*, deve-se essencialmente à enorme complexidade na predição do comportamento de um fluido, resultante do comportamento não linear dos respetivos modelos matemáticos. Contudo, esta tendência está decrescendo com o surgimento de computadores cada vez mais poderosos, capazes de analisarem mais eficazmente as propriedades físicas dos fluidos. Atualmente a capacidade de processamento é aumentada, principalmente devido à possibilidade do processamento em nuvem.

A definição precisa do processo de modelagem computacional foi bem descrito por Faria, 2014:

Modelagem Numérica de Fluidos ou Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD segundo a literatura inglesa) é o ramo, da mecânica dos fluidos, responsável pela resolução e análise de escoamentos através de algoritmos e métodos numéricos.

Nesse sentido, é fundamental avaliar os resultados numéricos encontrados na simulação com medidas físicas em campo ou em modelos construídos. Por outro lado, com avanço da capacidade de processamento associada ou unificada, será cada vez mais confiável o modelo computacional (FERZIGER; PERIC, 2002).

4.3.1 Princípios Governantes

As equações matemáticas aplicáveis à fluidodinâmica computacional e, portanto, à grande maioria dos *softwares* disponíveis no mercado são discutidas há décadas. Os subitens que serão discutidos a seguir são referenciados ao trabalho de Versteeg e Malalasekera (2007). Na obra, as principais propriedades dos fluidos são dadas como \mathbf{u} , u , v , w , ρ , p e τ . Trata-se do vetor velocidade em componentes (i,j,k) , escalares de velocidade em x , y e z , densidade, pressão e tensão viscosa respectivamente. Essas equações que regem o fluxo de um fluido representam expressões matemáticas amparadas nas leis de conservação da física:

- Não há perda de massa em uma trajetória da partícula fluida infinitesimal, fato que leva a lei de conservação da massa;

- A variação da quantidade de movimento é igual a soma resultante das forças que atuam em uma partícula de fluido (segunda Lei de Newton); e
- A taxa de mudança de energia é igual a soma da taxa de adição de calor e do trabalho realizado em um partícula fluida (primeira lei da termodinâmica).

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), líquidos e gases fluindo em baixas velocidades se comportam como fluidos incompressíveis. Sem variação de densidade não há ligação entre a equação da energia e as equações de conservação de massa e momento. O campo de fluxo, nesses casos, é resolvido a partir das equações de conservação da massa e momento, como é o caso do presente trabalho.

4.3.1.1 Conservação da massa em três dimensões

O balanço de massa em um elemento infinitesimal de fluido é o primeiro passo para gerar a equação diferencial da conservação da massa. A taxa de aumento da massa num elemento fluido é igual a taxa líquida de fluxo mássico no referido elemento, conforme Equação 4.38.

$$\frac{\partial (\rho \delta x \delta y \delta z)}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (4.38)$$

O fluxo de massa através da face de um elemento é dado pelo produto da densidade, área e componente normal da velocidade na face, como ilustra Figura 4.12.

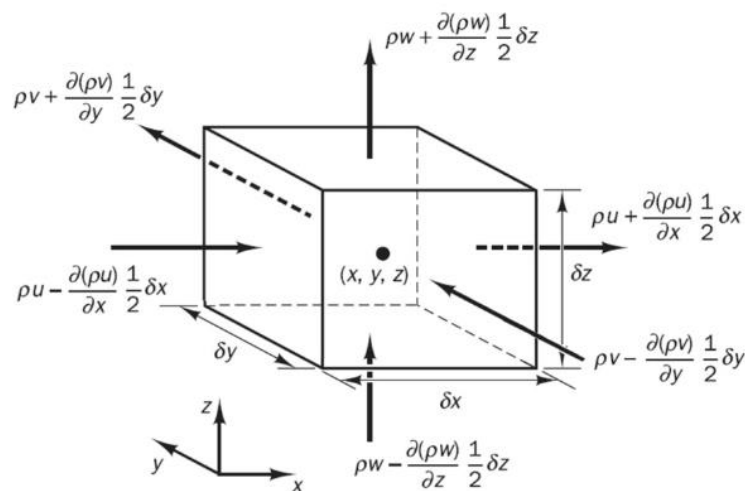


Figura 4.12: Entrada e saída do fluxo mássico num elemento infinitesimal de fluido.

Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

Uma vez que todos os componentes são somados, a fim de se obter o resultado líquido, rearranjados e equiparados à Equação 4.38, é gerada a equação tridimensional da conservação ou continuidade da massa em um ponto de um fluido compressível, Equação 4.39:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4.39)$$

Para casos mais simplificados e problemas físicos envolvendo escoamento de água, como abordado neste estudo, o fluido é considerado incompressível. Assim a massa específica ρ é constante. Transformando a Equação 4.39 na Equação 4.40.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{ou} \quad \text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (4.40)$$

4.3.1.2 Conservação da quantidade de movimento em três dimensões

É possível afirmar para um escoamento, a partir da segunda lei de Newton, que a variação do momento em uma partícula fluida é igual a soma das forças atuantes nessa partícula.

Devido à simetria aplicada ao estado triplo de tensões de um elemento infinitesimal, será avaliada condição para variação do momento no eixo x por unidade de volume da partícula fluida, conforme Equação 4.41.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{u}\mathbf{u}) \quad (4.41)$$

Existem três tipos de forças elencáveis para partículas fluidas. São elas forças de superfície (pressão e forças viscosas) e forças de corpo (gravidade, centrífuga, Coriolis e eletromagnética). É usual destacar as contribuições devido as forças de superfície como termos separados na equação do momento. Assim, é possível incluir os efeitos das forças de corpo como termos de origem. O estado de tensão de um elemento fluido é definido em termos de pressão e dos nove componentes de tensão viscosa, Figura 4.13.

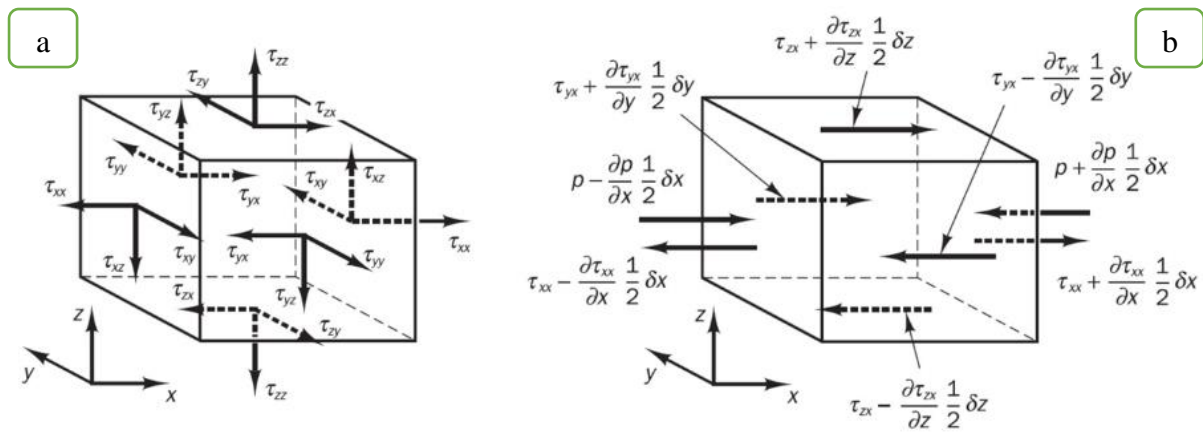


Figura 4.13: Componentes de tensão em todas as faces do elemento fluido, (a) em todas as direções (b) na direção x.

Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

A força resultante em uma face é o produto da tensão pela respectiva área da face. Assim, a força total por unidade de volume no fluido devido às tensões na superfície na direção x é, Equação 4.42:

$$\frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} \quad (4.42)$$

As considerações das forças de corpo, como gravidade e Coriolis, podem ser incluídas na análise pela definição de uma fonte (S_{Mx}) de momento em x por unidade de volume e por unidade de tempo. Dessa forma, a Equação 4.43 reuni a Equação 4.41 igual à 4.42, somado efeito de S_{Mx} .

$$\frac{\rho DU}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + S_{Mx} \quad (4.43)$$

Por simetria do elemento infinitesimal fluido, a componente y da equação de momento é obtida, conforme Equação 4.44.

$$\frac{\rho Dv}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + S_{My} \quad (4.44)$$

Por fim, ainda por simetria do elemento cúbico, a componente z da equação de momento é:

$$\frac{\rho Dw}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + S_{Mz} \quad (4.45)$$

4.3.1.3 Equações de Navier-Stokes para fluido Newtoniano

As equações analisadas até o momento no volume de controle infinitesimal de fluido contêm incógnitas, os componentes de tensão viscosa τ_{ij} . As formas mais usuais das equações de conservação dos fluidos são obtidas através da introdução de um modelo adequado para as tensões viscosas τ_{ij} . Em muitos fluxos de fluidos, essas tensões viscosas podem ser expressas como funções da taxa de deformação local ou, simplesmente, taxa de deformação. Nos fluxos tridimensionais, a taxa local de deformação é composta pela taxa de deformação linear e pela taxa de deformação volumétrica. Todos os gases e muito líquidos são isotrópicos, portanto, nesses casos, as tensões viscosas podem ser expressas como funções da taxa de deformação local ou taxa de deformação, que possui nove componentes em três dimensões, composta por três componentes de deformação linear alongados, Equações 4.46:

$$s_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; s_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; s_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4.46)$$

Existem, além das deformações normais, seis componentes lineares de deformação por cisalhamento, Equação 4.47:

$$s_{xy} = s_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); s_{yz} = s_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right); s_{zx} = s_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (4.47)$$

Sendo a deformação volumétrica, Equação 4.48, dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div } \mathbf{u} \quad (4.48)$$

Por sua vez, em um fluido Newtoniano, as tensões viscosas são proporcionais às taxas de deformação. A forma tridimensional da lei da viscosidade de Newton para fluidos incompressíveis envolve duas constantes de proporcionalidade: a primeira viscosidade (dinâmica), μ , relacionada a deformações lineares e a segunda viscosidade, η , para relacionar tensões com a deformação volumétrica. Usualmente aproxima-se $\eta = 2/3\mu$ (SCHLICHTING, 1979). As nove componentes de tensão viscosas, das quais seis são independentes, são:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \text{div } \mathbf{u}; \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \eta \text{div } \mathbf{u}; \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \eta \text{div } \mathbf{u}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right); \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right); \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (4.49)$$

Finalmente, a partir da substituição das Equações 4.49 nas Equações 4.43 a 4.45, é possível obter o pacote da formulação de **Navier-Stokes** completo, Equações 4.51, para fluidos compressíveis e com viscosidade variável:

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_{Mx} \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \eta \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_{My} \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \eta \operatorname{div} \mathbf{u} \right] + S_{Mz}\end{aligned}\quad (4.50)$$

As equações completas de Navier-Stokes levam à esforços computacionais gigantescos para capacidade das máquinas disponíveis atualmente. Felizmente, existem simplificações, aliadas ao avanço tecnológico que permitem o processamento em tempos atuais. Como é o caso do presente estudo, o fluido é considerado incompressível, então a conservação da massa gera $\operatorname{div} \mathbf{u}=0$. Além disso, a viscosidade é constante. Então, uma primeira simplificação já é demonstrada pelas Equações 4.51.

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_{Mx} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \operatorname{div}(\nabla u) + S_{Mx} \\ \rho \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_{My} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \operatorname{div}(\nabla v) + S_{My} \\ \rho \frac{Dw}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_{Mz} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \operatorname{div}(\nabla w) + S_{Mz}\end{aligned}\quad (4.51)$$

É bastante evidente a semelhança, principalmente entre as Equações 4.39 e 4.51. Por conseguinte, uma equação geral de transporte para fluidos incompressíveis pode ser escrita na forma da Equação 4.52. Para o cálculo via CFD, as equações primárias são adaptadas ao formato padrão, com a equação de transporte da variável de interesse ϕ . Trata-se dos termos de tempo, advectivo, difusivo e fonte, respectivamente.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \operatorname{div}(\phi \mathbf{u}) = \frac{1}{\rho} \operatorname{div}(\Gamma (\nabla \phi)) + S_{\phi}\quad (4.52)$$

Finalmente, para representar diferentes equações de conservação, alteram-se apenas três componentes da Equação 4.52: a variável ϕ , o coeficiente de difusão Γ e o termo de fonte S .

Como exemplo, para equação da conservação da massa, a variável de interesse ϕ é igual a 1, o coeficiente de difusão e fonte são nulos. Apesar deste padrão ser amplamente utilizado para aplicações em CFD, pode-se afirmar que, até o presente momento, não existe solução analítica da equação acima.

Dessa forma, torna-se necessário reescrevê-la em forma algébrica e resolvê-la por meio de algum método de discretização. Gerando-se, portanto, o MEF, o MVF e o MDF.

4.3.2 Noções de turbulência

O processo de turbulência no escoamento de fluidos é altamente complexo do ponto de vista matemático. Uma partícula fluida pode transladar de uma posição para outra, e, ao mesmo tempo, sofrer “rotações” no caminho por meio de vórtices e trajetórias irregulares, por exemplo (BRANDÃO, 2015). Para Versteeg e Malalasekera (2007), os modelos de turbulência podem ser divididos em três grupos maiores, cada um com subdivisões que não serão abordadas no trabalho:

- Modelo baseado nas Equações Médias de Reynolds (*RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes*);
- Método de Simulação das Grades Escalas (*LES – Large Eddy Simulation*);
- Simulação Numérica Direta (*DNS – Direct Numerical Simulation*).

Segundo Bayon *et al.* (2018), quando grandes domínios são modelados sem necessidade de atenção especial às pequenas escalas individuais de análise, o que geralmente ocorre em problemas de engenharia, a turbulência média da flutuação total de turbulência é a melhor escolha. Nesse caso, as equações de *Navier-Stokes* já discutidas, recebem um termo corretor apropriado de velocidade média turbulenta ($u'(t)$) baseado no modelo de tensões médias de Reynolds para o escoamento. Portanto, chega-se aos modelos RANS citados que incorporam boas escolhas para solução de problemas práticos.

A Figura 4.14 demonstra a flutuação total da velocidade turbulenta e a localização da velocidade média na função $u'(t)$.

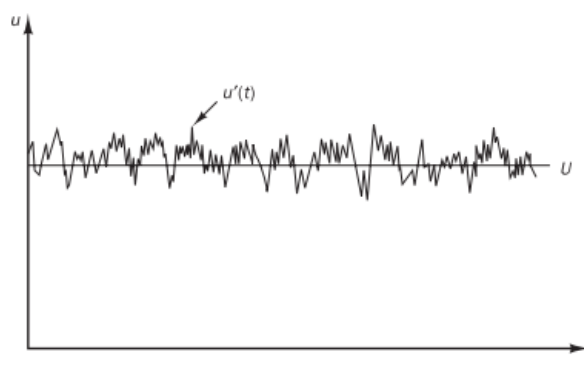


Figura 4.14: Medida da velocidade em fluxo turbulento.

Fonte: Versteeg e Malalasekera (2007)

Os modelos de turbulência ainda são objeto de estudo na atualidade, gerando-se novas equações para situações distintas de fluxo. O modelo padrão ‘k- ϵ ’ baseado em duas equações, uma para energia cinética turbulenta (k) e outra para taxa de dissipação dessa energia (ϵ), foi o primeiro modelo, implementado por Launder e Spalding (1972 *apud* Salmasi e Samadi 2018).

Os *softwares* que trabalham com CFD, disponíveis no mercado, contêm diversos modelos de turbulência acoplados. Cada um adequado ao problema físico necessário de estudo, como pesquisas em aerodinâmica, fluxos de calor, correntes oceânicas, eletromagnetismo e fluidodinâmica monofásica até multifásica (AUTODESK®, 2019). Além do modelo ‘k- ϵ ’, para escoamentos em degraus, foco do presente trabalho, os trabalhos de Bayon *et al.* (2018) e Al-hashimi, Madhkiim e Nahi (2017) compararam os três diferentes modelos de turbulência mais adequados para essas estruturas. Portanto, trata-se dos modelos ‘k- ϵ ’, ‘RNG’ e ‘SST-k- ω ’ como mais consistente para modelagem numérica do escoamento em degraus.

Os resultados de Bayon *et al.* (2018) mostram o modelo ‘RNG’ (*Re-Normalisation Group*), uma combinação do modelo padrão com simplificações nas equações de *Navier-Stokes*, com melhor desempenho e erros menores que 1% entre as previsões de variáveis medidas e simuladas. Assim, reafirmando Autodesk® (2019), o modelo ‘RNG’ é mais adequado para representação de fluxos com presença de ar e pontos de separação no escoamento, apesar de exigir um maior esforço do ponto de vista computacional.

Como terceiro modelo, ‘SST-k- ω ’, apresentou superestimava das profundidades da água em 4%, com subestimação das velocidades (BAYON *et al.*, 2018). Convém ressaltar ainda que para o modelo ‘SST-k- ω ’ há uma combinação do modelo ‘Wilcox-k- ω ’ com o modelo ‘k- ϵ ’.

modelo 'k- ω ' é mais adequado para simular o escoamento junto à sub-camada viscosa, representado boa alternativa aos estudos de camada limite. Na medida em que o modelo 'k- ϵ ' é ideal para representar o escoamento afastado da parede (AUTODESK®, 2019).

Para concluir que os modelos de turbulência 'k- ϵ ', 'RNG' e 'SST-k- ω ' são os mais utilizados para modelagem numérica do escoamento em degraus, além dos trabalhos de Bayon *et al.* (2018) e Al-hashimi, Madhkiim e Nahi (2017) que os compararam explicitamente para estruturas de escoamento em degraus, diversos outros autores utilizaram tais modelos em descidas ou vertedouros em degraus. Portanto pode-se referenciar a afirmação com os trabalhos de Medhi *et al.* (2019), Zhan, Zhang e Gong (2016), Bentalha e Habi (2019), Bennet *et al.* (2018) e Salmasi e Samadi (2018).

Conforme os *softwares* utilizados nesse trabalho foram Autodesk® CFD, FLOW-3D® e OpenFOAM®, todos possuem os três modelos de turbulência discutidos mais utilizados pela literatura para escoamento em degraus. Salienta-se que para o modelo FLOW-3D®, a formulação final de aplicação é alterada, uma vez que o *software* recorre ao método FAVORTM que trata a influência das diferentes frações de área/volume generalizando a produção turbulenta, associando à formulação as forças geradas pela flutuação do processo dinâmico. Esta última generalização inclui, por exemplo, os efeitos de flutuação associados às acelerações não-inerciais (BRANDÃO, 2015) (FLOW-3D® Documentation, 2020).

4.3.3 Métodos para discretização numérica

De acordo com Ferziger e Peric (2002), conforme desenvolvidas as equações governantes do processo em CFD no subitem 4.3.1.3, os métodos para discretização algébrica das equações integro-diferenciais, sem solução analítica, mais utilizados são três:

- Método dos elementos finitos (MEF);
- Método dos volumes finitos (MVF);
- Método das diferenças finitas (MDF).

O Método das Diferenças Finitas é o mais antigo para solução das equações primárias. Acredita-se ter sido introduzido por Euler no século XVIII. Exige pouco recurso computacional para solução de escoamentos. Uma grande limitação é o uso exclusivo em geometrias bem estruturadas (FERZIGER e PERIC, 2002).

4.3.3.1 Diferenças entre Método dos Elementos Finitos e Método dos Volumes Finitos

Segundo trabalho de Shoja, Nikpour e Sadeghi (2013), que trabalharam com simulação numérica do escoamento em vertedouros em degraus, visando avaliar a diferença entre o MEF e o MVF na medição da energia total dissipada, os autores encontraram 1,26% e 2,85% de erro via modelagem com volumes finitos e elementos finitos, respectivamente. Concluíram que os dois métodos são aceitáveis para simulação do escoamento nessas estruturas, com ressalvas às malhas adequadas para crista e melhores testes com estruturas maiores que 9 degraus com espelho $h > 0,1$ metros. Esse foi o único trabalho comparativo dos métodos encontrado na literatura para estruturas em degraus.

No Método dos Volumes Finitos, as equações governantes são integradas sobre um volume ou célula, assumindo uma variação linear em partes das variáveis dependentes (u, v, w, p, T). Usando essas integrações, equilibram-se essencialmente os fluxos através dos limites dos volumes individuais. O fluxo é calculado no ponto médio entre os nós discretos do domínio. Portanto, deve-se calcular um fluxo entre todos os nós vizinhos do domínio. Em uma malha estruturada regular (o mesmo número de divisões em qualquer direção), esse cálculo de fluxo é bastante direto. Em uma malha irregular (como em uma malha tetraédrica gerada automaticamente), esse cálculo levará a uma quantidade altíssima de fluxos e a um grande esforço de contabilidade para garantir que todos os fluxos tenham sido calculados corretamente. Esse fato faz com que o MVF utilize, preferencialmente, malhas cúbicas regulares. Os *softwares* FLOW-3D® e OpenFOAM® utilizam esse método.

No Método dos Elementos Finitos, geralmente é usado o método de *Galerkin* de resíduos ponderados. Neste método, as equações governantes são integradas sobre um elemento ou volume após serem **multiplicadas por uma função de peso**. As variáveis dependentes são representadas no elemento por uma função, que é da mesma forma que a função peso. O *software* Autodesk® CFD usa este método de discretização. As malhas são triangulares para elementos em 2D e tetraédricas para elementos em 3D. A principal vantagem, bem como a principal desvantagem dos elementos finitos, é que é uma abordagem matemática difícil de colocar qualquer significado físico nos termos das equações algébricas. No Método de Volumes finitos, trabalha-se sempre com fluxos, não como nos Elementos finitos (AUTODESK®, 2019).

A Tabela 4.4 apresenta as vantagens e desvantagens teóricas entre os dois métodos de discretização propostos neste trabalho. Salienta-se que a literatura não possui estudos

numerosos comparando o MEF com o MVF para modelagem de escoamentos em degraus, ou seja, altamente aerados (fluxo bifásico). Fato que estimula tal estudo.

Tabela 4.4: Vantagens e Desvantagens do MEF e o MVF.

Método de discretização algébrica	Vantagens	Desvantagens
Elementos finitos	<ul style="list-style-type: none"> • Mais esforço matemático – computacional • Condições de contorno naturais (para fluxos) • Qualquer geometria gerada pode ser modelada com mesmo esforço 	<ul style="list-style-type: none"> • Mais matemática envolvida – menos significado físico
Volumes finitos	<ul style="list-style-type: none"> • Fluxos tem mais significado físico 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de adequação às geometrias irregulares – grande esforço computacional

Fonte: AUTODESK® (2019)

4.3.4 Superfície livre – Método VOF

Bayon *et al.* (2018) afirmam que o método mais utilizado para o cálculo do escoamento à superfície livre, em simulações numéricas de fluidodinâmica computacional, é o método VOF (*Volume of Fluid*). Esse método de abordagem Euleriana do controle de um volume de fluido foi desenvolvido por Hirt e Nichols (1981). Por meio desse recurso é possível simular a interface entre gases e líquidos. Essa capacidade é essencial para modelagem de fenômenos de fluxo recorrentes na engenharia. Cada volume infinitesimal possui um parâmetro de controle que varia de zero até um, significando ausência de líquido quando é nulo e preenchimento completo quando é igual a unidade inteira. De acordo com Autodesk® (2019), a Equação 4.53 explicita à aplicação matemática do método clássico do VOF. Neste *software* os resultados, quando solicitada exibição da fração ar e água, são exibidos pela variável exatamente como se chama o método, ou seja, por visualização do VOF.

$$\frac{\partial F'}{\partial t} + \vec{V} \nabla F' = 0 \quad (4.53)$$

na qual: F' é a fração de preenchimento do elemento por fluido (adimensional), \vec{V} é o campo de velocidade do líquido e é resolvido pelas equações de *Navier-Stokes* (m/s).

Bayon *et al.* (2018) ainda afirmam que nos programas FLOW-3D® e OpenFOAM® o mesmo método é utilizado para o cálculo da superfície livre. Para o primeiro *software* mencionado, pequenas variações no VOF são empregadas visando o melhoramento do recurso, denominado TruVOF. Já para o *software* OpenFOAM® o cálculo clássico sofre partições, mas também se trata do emprego do VOF, nesse último denominado como variável *alpha.water*.

4.3.5 Modelagens do escoamento em degraus

Para realização deste trabalho será discutido mais à frente a necessidade da experimentação e modelagem numérica também em uma estrutura na qual o processo de aeração não é tão evidente. Dessa forma fica clara condição de comparação entre os cenários, uma vez que se tem a condição de controle, conforme denominada por Sanagiotto (2003) e Dai Prá (2016).

Nesse sentido Bennett *et al.* (2018), construíram um modelo físico reduzido de um vertedouro liso na escala 1:20 do reservatório de abastecimento de água *Studben IRE* em Denholme, Inglaterra (Figura 4.15 (a e c)). Os autores fizeram também duas modelagens numéricas tridimensionais, a primeira usando o programa FLOW-3D® e a segunda por meio do OpenFOAM® (Figura 4.15 (b)). Os resultados das modelagens mostraram concordância razoável tanto para elevação do reservatório, dentro de 0,08 metros de diferença entre os cálculos numéricos e medidos, quanto para o local de medição da velocidade no vertedouro liso físico e em modelo reduzido.

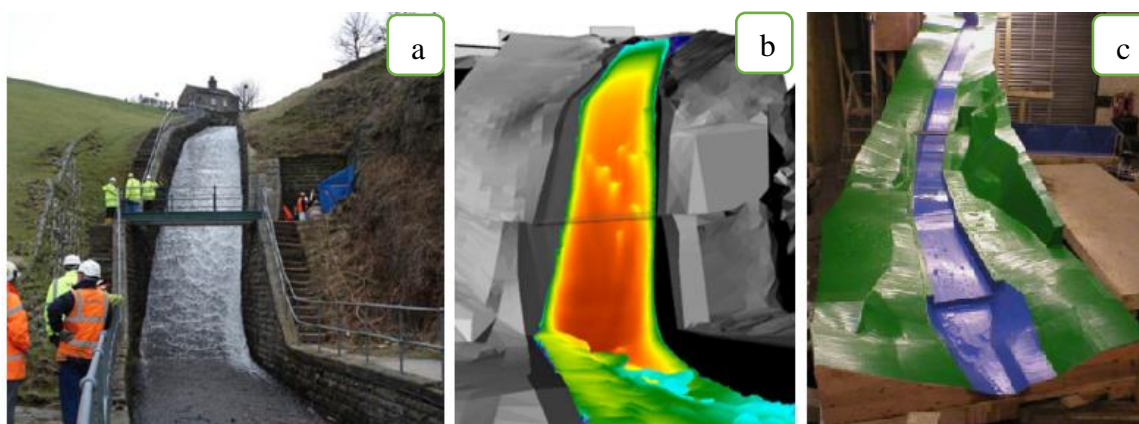


Figura 4.15: (a) Vertedouro liso, (b) Simulação Numérica, (c) Modelo Reduzido.

Fonte: Bennett *et al.* (2018)

Como já verificado, o escoamento em vertedouros ou descida em degraus é altamente complexo. O processo de incorporação de ar na fase líquida é muito intenso, podendo atingir concentrações da ordem de $Ca=90\%$ (CHANSON, 2015). Já no contexto do escoamento em degraus, sem utilização de estruturas lisas como controle de pesquisas que visam comparação de métodos distintos como presente estudo, Medhi *et al.* (2019) analisaram o comportamento do fluxo sobre dez degraus de altura de dois centímetros cada e 45° de inclinação do paramento. Os autores conseguiram encontrar boa representação para o ponto de início da aeração, representativo do fim da primeira zona e início da segunda, já discutidas anteriormente, comparado a um modelo físico reduzido. Além disso, realizaram testes com análise no transporte de partículas a uma mistura de 75% glicerol com 25% água. A Figura 4.16 mostra o campo de velocidades escalar e vetorial (ampliação) encontrados.

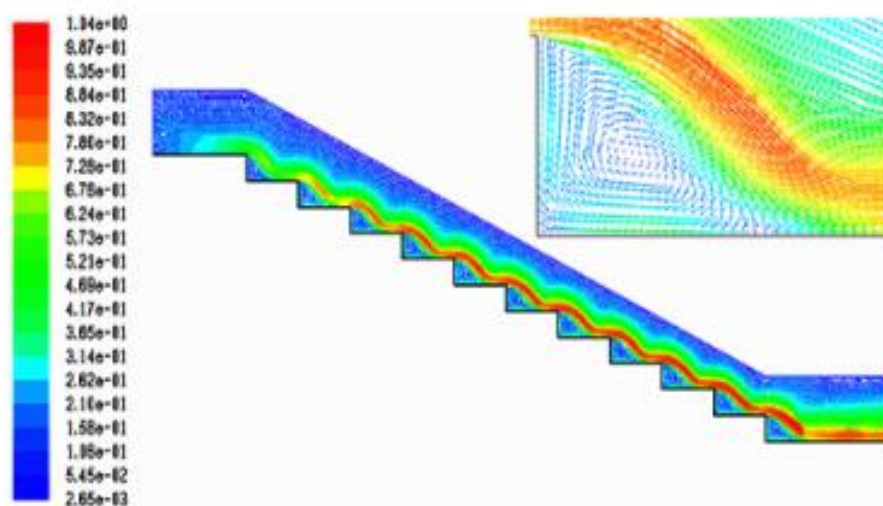


Figura 4.16: Campo escalar e vetorial de velocidades (m/s).

Fonte: Medhi *et al.* (2018)

Zhan, Zhang e Gong (2016) testaram diversos modelos de turbulência no escoamento em degraus durante o regime deslizante sobre turbilhões (*Skimming Flow*). Modelos de turbulência dos tipos RANS e LES foram analisados quanto à adequada tratativa do ponto de início da aeração, formação dos vórtices sobre as macro-rugosidades (degraus), deformação da superfície livre, fração do volume de ar (VOF), pressões e velocidades. Salienta-se que o modelo de turbulência sempre se acoplará as equações primárias de *Navier-Stokes*, não sendo possível um modelo ideal existir, mas um mais adequado à cada problema físico. Dentre os resultados, interessante estabelecer que para cada representação existe uma turbulência modelada mais realística, por exemplo, para o ponto de início da aeração do caso específico, Zhan, Zhang e

Gong (2016) encontraram o modelo do tipo LES, divergente do modelo RANS normalmente mais utilizado (BAYON *et al.*, 2018).

A frequente prática atual de se aliar à modelagem física reduzida a um modelo numérico robusto pode ser também estudada no trabalho de Brandão (2015), realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa, Portugal. O autor trabalhou com modelo numérico FLOW-3D®, representando o vertedouro da usina hidroelétrica de Caniçada, cerca de 32 quilômetros de Braga, Portugal. De forma geral, os resultados foram satisfatórios com desvios menores que 6% entre o modelo numérico e o físico, avaliando-se distribuição de pressões, velocidades e níveis de água.

Faria (2014) trabalhou com escoamento em vertedouros com 26 degraus em duas distintas configurações, uma com revestimento de concreto e outra com presença de rugosidade em cada degrau isolado. O estudo utilizou o modelo OpenFOAM®, turbulência ‘SST-k- ω ’ e três diferentes vazões com correção de malhas respectivas. O desenvolvimento dos dados físicos foi realizado no Laboratório de Hidráulica, Recursos hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia do Porto, Portugal. Pode-se observar maior pressão média nos patamares dos degraus contra menor, até mesmo negativas, nos espelhos com picos próximos aos vértices, reforçando a literatura.

Bentalha e Habi (2019) utilizaram o modelo de turbulência ‘k- ϵ ’ por meio do *software* Ansys Fluent® para estudar o ponto de início da aeração no modelo numérico e comparar aos dados físicos medidos por Zhang e Chanson (2016). O algoritmo para o cálculo do escoamento à superfície livre utilizado pelo programa também foi o método VOF. Os resultados encontrados demonstram relativa aceitação, quando comparado às eficiências encontradas na literatura, entre a visão apresentada pelo modelo numérico e o experimento realizado (Figura 4.17). A variável VOF é utilizada para verificação dos resultados, ou seja, quanto mais próximo de um, mais cheio está o elemento de líquido e quanto mais próximo de zero, significa elemento completamente preenchido por ar, para escala padrão. Vale ressaltar que os autores trabalharam com *solver* padrão do Ansys Fluent® para mistura ar e água. Nesta pesquisa será investigado alternar o *solver* para melhor representar a condição multifásica, característica típica do escoamento em degraus, através do programa OpenFOAM®, e assim verificar o início da aeração mais realístico.

Cabe explicar que cada programa em CFD tem um *solver* padrão estabelecido, o Autodesk® (2019), por exemplo, conta com um único disponível, já o FLOW-3D® também realiza o cálculo à superfície livre com um *solver* pré-estabelecido. Por fim o terceiro modelo, que trabalha com método dos volumes finitos, OpenFOAM®, por ser o único programa livre dentre os escolhidos nesta pesquisa, sem restrição de licença, possui vários *solvers* disponíveis. Esse último *software* não possui uma interface como os outros dois, todos os comandos são realizados via linguagem de programação (C++) e as condições de contorno, assim como geometria (extensão .stl), são introduzidas previamente em dicionários de leitura, com resultados visualizados num *software* externo, denominado ParaView.

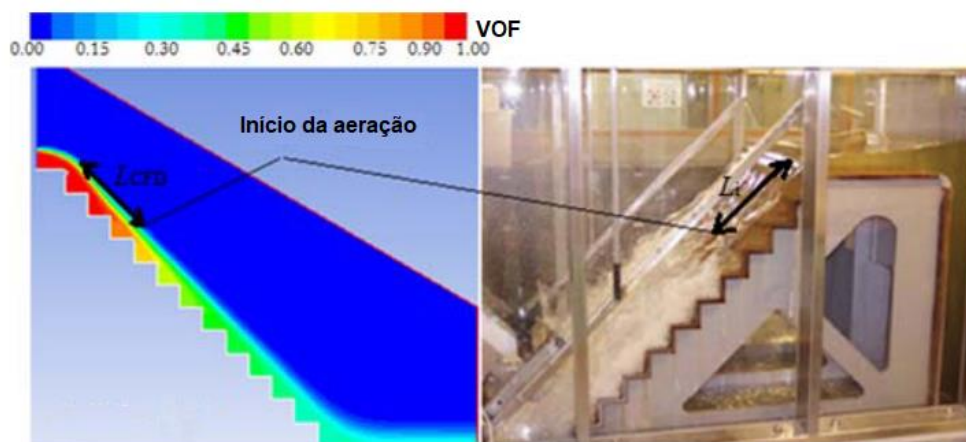


Figura 4.17: Ponto de início da aeração. Modelo Numérico e Físico.

Fonte: Bentalha e Habi (2019)

4.3.6 Síntese das etapas de modelagem

De forma geral, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), os programas de modelagem numérica computacional são operados em três grandes fases principais:

- Pré-processamento;
- Processamento;
- Pós-processamento.

A etapa cerne do modelo via CFD é o pré-processamento. Primeiramente, nessa etapa, a geometria do problema físico é importada para o *software*. Caso o domínio físico seja irregular, técnicas com *scanner* 3D podem ser utilizadas, como no trabalho de Bennett et al. (2018), já citado. Com relação às estruturas de mais fácil representatividade geométrica, um programa de

desenvolvimento pode ser usado, como AutoCad 3D, Inventor e SolidWork. Nesta pesquisa as geometrias foram geradas no AutoCad 3D, exportadas para os softwares CFD nas extensões de leitura de cada um deles. São elas: ‘.stl’ para OpenFOAM® e FLOW-3D® e ‘.igs’ para Autodesk® CFD. As versões utilizadas dos programas são 19.60, 11.0 e 2019 *Ultimate*, respectivamente.

Como segundo passo, ainda na primeira etapa, determinam-se as constituições dos materiais característicos. Os modelos do FLOW-3D® e Autodesk® CFD já possuem diversas bases de materiais, e no modelo OpenFOAM® é possível atribuir rugosidades aos materiais através de dicionários prévios. Lembrando que apenas os modelos com bases prévias de materiais são os que possuem interface de interação com o usuário, o OpenFOAM® opera através de dicionários programados em linguagem C++.

Na terceira subdivisão da primeira etapa está a criação de uma malha de cálculo. Segundo Ferziger e Peric (2002), a malha é a divisão do domínio geral em pequenas unidades (células ou elementos) nas quais o cálculo será realizado e propagado para as demais. Não existe obrigação na execução de um tipo de malha variando-se o método de discretização numérico, ou seja, MEF, MDF ou MVF. Mas a literatura indica melhor desempenho do MVF para células cúbicas regulares e triangulação, tetraedros no espaço, para o MEF (AUTODESK®, 2019). Uma das questões chave para solução do problema numérico é alcançar a dimensão ideal da malha para uma solução aceitável, dentro de uma tolerância dos valores medidos físicos. Trata-se da relação maior refinamento melhor resultado, mas com esforço computacional também diretamente proporcional.

Ferziger e Peric (2002), Versteeg e Malalasekera (2007) e outros autores desenvolveram discussões sobre a atribuição de malha em um domínio. Existem, portanto, classificações variadas, sendo bastante discutido a ortogonalidade dos elementos e estruturação. Deriva-se então dois grandes grupos mais recorrentes, malhas ortogonais e estruturadas. Não será aprofundado tema no presente trabalho, por fugir dos objetivos. A Figura 4.18 evidencia o caso de uma malha tetraédrica (a), não ortogonal e não estruturada, feita no modelo Autodesk® CFD e cúbica (b), estruturada e ortogonal, por meio do OpenFOAM®. Todos os *softwares* geraram suas malhas, não sendo utilizado programa externo para essa etapa.

Salienta-se que os modelos em CFD podem ser bidimensionais ou tridimensionais muito finos ou completos. O recurso de se fatiar o escoamento em uma descida de água, por exemplo, reduz

demasiadamente o esforço computacional durante uma simulação, dando origem aos modelos tridimensionais finos (Tassinari *et al.*, 2020).

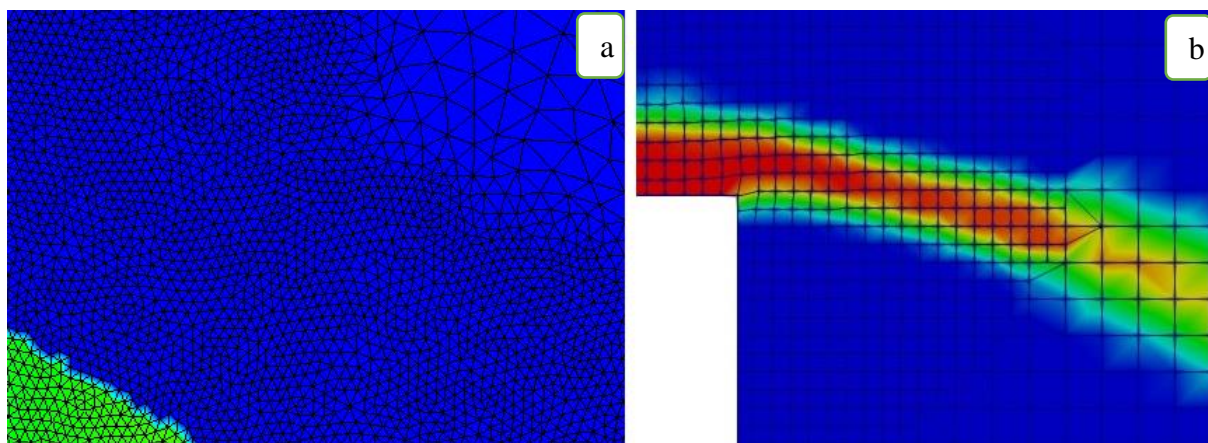


Figura 4.18: (a) Malha tetraédrica - Autodesk® CFD e (b) Malha cúbica - OpenFOAM®.

Como última etapa antes da fase de processamento, está a atribuição das condições de contorno do problema. Definem-se as superfícies de entrada e saída de fluxo de líquido do domínio com seus respectivos valores, indicando qual parcela do domínio é sólido ou possível de haver fluido. Atribuindo-se, em sequência, escoamento à superfície livre e modelo de turbulência, para esse caso. O Autodesk® CFD trabalha com cinco modelos padrões de advecção das células, relacionado ao segundo termo da Equação 4.52, os demais modelos ajustam as condições de acordo com a melhor estabilidade numérica.

Por fim, o passo de tempo de cálculo e tempo previsto de simulação. O passo de cálculo é uma referência, uma vez que os modelos podem reduzi-lo quando a convergência de cada interação é baixa. Para esse caso, o número de *Courant* é um dos balizadores utilizados pelo OpenFOAM®, por exemplo.

A fase de processamento é bastante morosa, cerca de 7 a 10 dias são utilizados em trabalhos bidimensionais de escoamento em degraus, ou seja, altamente aerados. Gerando-se de 1,5 a 25 gigabytes de dados, dependendo do *software* utilizado. A convergência e estabilidade numérica são conferidas em cada interação, todos os modelos utilizados não concluem a simulação sem atingir esse ponto. Ou seja, não atingida convergência os resultados são inconsistentes, do ponto de vista físico, necessitando alteração de malha, passo de tempo, modelo de turbulência e outros. Por isso é muito importante a revisão de simulações executadas na literatura, como abordado anteriormente. O Autodesk® CFD encerra sua simulação com ‘*Analysis completed*

successfully', quando os resultados estão nos intervalos de tolerância, a Figura 4.19 apresenta o gráfico de acompanhamento da solução pelo *software*, com possibilidade de leitura detalhada em tabela. Já o OpenFOAM® utiliza também o número de Courant, entrada prévia nos dicionários, para balizar a solução. Portanto, os softwares atualmente possuem vários critérios de conferência da convergência e estabilidade do resultado, indicando, caso necessário, intervenções na modelagem para aprimoramento e novas simulações.

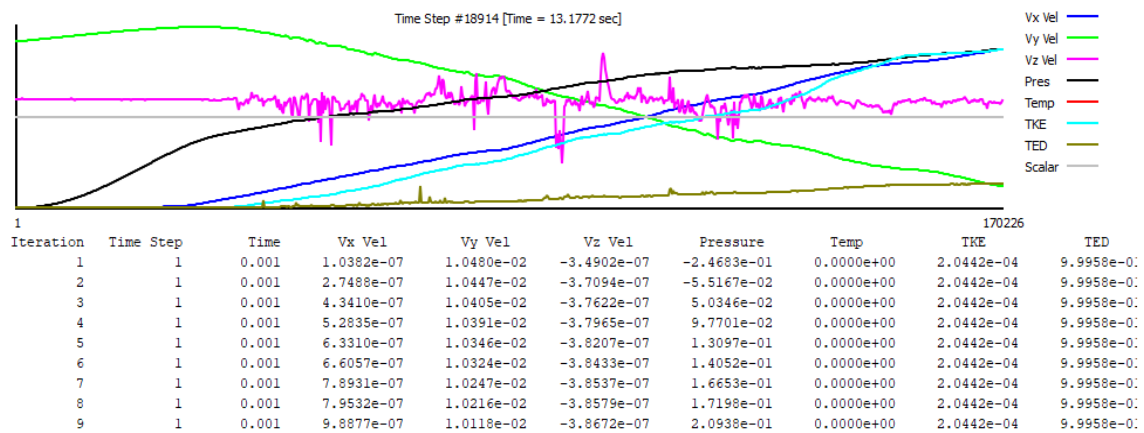


Figura 4.19: Acompanhamento da convergência e estabilidade do resultado no Autodesk®CFD.

Para contextualização, o número de Courant representa a velocidade média de propagação multiplicada pelo passo de tempo computacional, divididos pelo tamanho do elemento. Quanto mais próximo de um, mais criteriosa é a avaliação do erro em cada interação do modelo, ou seja, capta perfeitamente a variação espacial do fluxo no tempo.

Finalmente, o pós-processamento consiste na verificação, através de dados físicos medidos em modelos ou em campo, da representação fidedigna da simulação. Versteeg e Malalasekera (2007) afirmam que cada vez mais os *softwares* são capazes de conferir o realismo da modelagem por meio de um banco de dados extensos. O futuro é promissor, uma vez que a capacidade de processamento e armazenamento dos dados gerados só cresce nas Ciências da Computação.

5 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

5.1 *Instalação experimental*

O modelo físico reduzido de uma descida de água em degraus foi construído no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da Universidade Federal de Minas Gerais. Trata-se de uma estrutura adaptável à faixas de inclinação e geometrias dos degraus para 1V:2H, 1V:1H e 1V:0,75H.

O trabalho foi desenvolvido para inclinação das bermas de um talude padrão de uma pilha de estéril, portanto, 1V:2H (26,5°). Também representativo de projetos de drenagem superficial de estruturas rodoviárias e infraestrutura urbana geral. Como padrão de projeto, a relação de altura dos degraus de cinco centímetros e patamares de dez centímetros foi mantida. Para efeito de transposição das escalas, o modelo é adaptável para representar perfeitamente a configuração de talude e berma de um empilhamento de estéril na escala 1:10. Ou seja, no protótipo dez metros verticais e oito metros máximos da plataforma horizontal, respectivamente. Salienta-se que a escala de 1:10 atende aos critérios recomendados por Chanson (2002) para evitar distorção dos resultados por efeitos de escala, o autor propõe limites até 1:10 para escoamentos em degraus.

O modelo experimental físico reduzido foi todo confeccionado em acrílico e contou com as seguintes partes: peça de entrada com uma estrutura de transição para direcionar o escoamento e reduzir a turbulência, uma peça de seção retangular de 25 centímetros de altura e 15 centímetros de largura com inclinação de 26,5°, sobre a qual são ajustados os degraus adaptáveis e uma plataforma adaptável ao final da descida a qual representa a bacia de transição que antecede a descida em sequência. O sistema de alimentação deste modelo é composto por um conjunto de bombas com vazão controlada por inversor de frequência e medidor eletromagnético. A Figura 5.1 apresenta o esquema da montagem do modelo físico e seu sistema de alimentação.

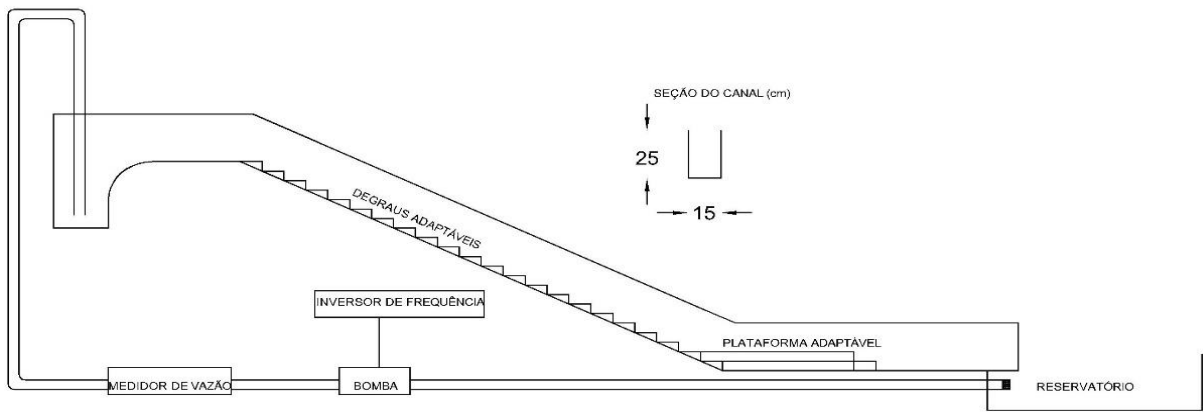


Figura 5.1: Esquema de montagem experimental.

O projeto do modelo foi enviado para corte sem as configurações da bacia, módulo adaptável para o cenário final de aplicação prática, uma vez que o laboratório possuiu acrílico e máquina de corte para ensaio com diversos blocos finais. A Figura 5.2 demonstra todas as dimensões do modelo reduzido construído.

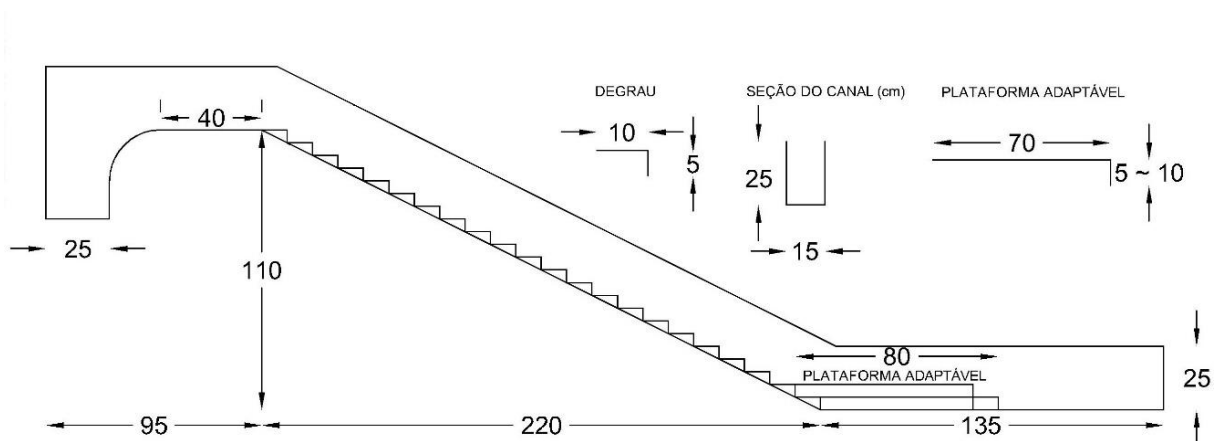


Figura 5.2: Dimensões em centímetros do modelo físico reduzido.

Com relação à faixa de vazões de trabalho, a fim de se representar diversas situações do escoamento em quedas sucessivas (*napped flow*) até o escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), de acordo com Chanson (1994) e Chanson (2001), trabalhou-se com 2,0 l/s até 8,0 l/s. A Figura 5.3 mostra a montagem experimental de um teste com os degraus acoplados e com bacia horizontal com comprimento total de 1,35 metros.



Figura 5.3: Montagem experimental, estrutura com degraus e bacia horizontal.

5.2 Considerações sobre critérios de semelhança

A escala adotada ($\lambda=1:10$) para o modelo físico reduzido deve seguir a lei de modelos com semelhança dinâmica de *Froude*. Ou seja, número de *Froude* entre modelo e protótipo foram iguais. As possíveis distorções ocasionadas em função da escolha do critério de semelhança, como análises de tensão superficial, viscosidade e concentração de ar levariam a outros números como Reynolds e Weber, inviabilizando o experimento. Ainda, com a faixa recomendada por Chanson (2002) atendida de 1:1 até 1:10, espera-se a avaliação satisfatória do escoamento bifásico segundo autor. Desta forma, podem ser estabelecidas as relações entre modelo e protótipo (OLIVEIRA, 1980), de acordo com as Equações 5.1, 5.2 e 5.3:

$$\frac{V_m}{V_p} = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{\frac{5}{2}} \quad (5.2)$$

$$\frac{q_m}{q_p} = \lambda^{\frac{3}{2}} \quad (5.3)$$

onde: λ é a relação entre os comprimentos no modelo e no protótipo, V_m e V_p são as velocidades (m/s), Q_m e Q_p são as vazões (m³/s) e q_m e q_p e são as vazões específicas (m³/sm), sempre do modelo e protótipo, respectivamente.

Importante destacar os critérios de rugosidade equivalente. Quando se trabalha em escala, a rugosidade é também transportada. Portanto, a Equação 5.4 mostra a relação entre as escalas (OLIVEIRA, 1980). Ou seja, o modelo construído em acrílico com número de Manning (n) de 0,009 representa um protótipo construído em concreto liso (0,0132). Portanto, a rugosidade no modelo físico não foi alterada, já que, a favor da segurança, o concreto liso representa melhor condição de velocidade no pé para o cenário aplicado ao campo.

$$\frac{n_m}{n_p} = \lambda^{\frac{1}{6}}; n_m = 0,009; n_p = 0,0132 \quad (5.4)$$

A Tabela 5.1 apresenta as informações das vazões ensaiadas no modelo reduzido, pela curva de rotação da bomba, e transportadas na escala. Os cenários para cada ensaio e comparação numérica serão discutidos no subitem seguinte. A atenção especial ao regime deslizante sobre turbilhões é dada porque, nesse regime, acontece o dimensionamento hidráulico das descidas em degraus.

Tabela 5.1: Faixa de vazões experimentais proposta.

RPM	Regime	Vazão Q_m (l/s)	Vazão q_p (m ³ /s m)	Vazão Q_p (m ³ /s)
425	Queda sucessivas	2	0,42	0,63
485	Queda sucessivas	3	0,63	0,95
560	Transição	4	0,84	1,26
665	Deslizante sobre Turbilhões	5,25	1,09	1,64
726	Deslizante sobre Turbilhões	6	1,26	1,90
812	Deslizante sobre Turbilhões	7	1,46	2,21
905	Deslizante sobre Turbilhões	8	1,68	2,53

5.3 Cenários

Para o cumprimento dos objetivos desta pesquisa, foram escolhidos três cenários, ou configurações de ensaio e modelagens numéricas, que melhor representam as necessidades de cada passo do trabalho. Dessa forma, para a análise dos modelos numéricos frente ao Método dos Elementos Finitos e o Método dos Volumes Finitos foram desenvolvidos os Cenários 1 e 2. Ambos contam com a estrutura sem limitação de comprimento da bacia de dissipação, cerca de 1,35 metros, melhor desenvolvida para conferência de possíveis ressaltos hidráulicos, assim como verificação da velocidade terminal. Apenas o cenário três foi desenvolvido com a plataforma adaptável de 80 centímetros, realidade da berma, e redução de dois degraus para o

total de 20 unidades de 5 centímetros cada. Dessa forma, o terceiro cenário para representar uma aplicação de campo em uma pilha de estéril foi executado perfeitamente na escala 1:10, enquanto os dois anteriores visaram balizar a avaliação do desempenho de modelos numéricos com métodos distintos.

5.3.1 Cenário 1

Para execução do Cenário 1 os degraus não foram colocados. Ou seja, tratou-se de uma descida de água lisa. A finalidade desta montagem e execução dos modelos numéricos correspondentes via Autodesk® CFD e OpenFOAM® é a correta comparação do perfil da linha d'água, diretamente as velocidades, em uma condição sem alta aeração. Dessa forma, os modelos em CFD não estavam em condição elevada do escoamento bifásico, para esta etapa (estrutura de controle como realizada por Sanagiotto (2003) e DaiPrá (2004)).

A vazão escolhida para comparação com as simulações numéricas é de 5,2 l/s, apesar da faixa de vazões ensaiadas cobrir todos os regimes possíveis. Uma vez que se trata do valor de entrada no regime deslizante sobre trilhões (*skimming flow*), referência no dimensionamento hidráulico dessas estruturas. Cabe salientar que modelos numéricos por meio de CFD possuem uma vizinhança de vazões para convergência do resultado razoavelmente limitada. Fato que é divergente dos modelos clássicos no processo de calibração e validação com a extrapolação dos resultados. Esse fato é razoável, as simulações com malhas de elementos ou volumes finitos possuem distribuição espacial adequada para um certo regime de velocidades, consequentes vazões, previamente ajustado em um domínio de cálculo. Ou seja, caso dobre-se a vazão, mudando o regime de regime de velocidades de um domínio, a malha já não possui mais uma eficiência adequada. Necessitando de nova intervenção local e global. Portanto, os resultados numéricos não foram gerados para diversas vazões, tendo em vista o propósito de comparação da modelagem via MEF e MVF. Diversos trabalhos correlatos com vazão fixa ou de pequena vizinha podem ser citados como Shoja, Nikpour e Sadeghi (2013), Lira (2014), Zhan, Zhang e Chanson (2016) e Salmasi e Samado (2018). O esforço computacional para calibração de novas malhas, quando os objetivos são atingidos comparando-se um cenário, não é necessário.

O foco da avaliação neste cenário foi a velocidade terminal na calha lisa, com 1,10 metros de queda em modelo reduzido e numéricos. A discussão da medição experimental será tratada em subitem futuro, mas a avaliação principal do trabalho se deu com medição física de velocidade

e nível d'água contra as simuladas via CFD. Essas etapas lógicas foram empregadas no próximo cenário e também, parcialmente, na última configuração.

Neste cenário foi possível avaliar a velocidade terminal, perfil de entrada e linha d'água global para as vazões propostas, devido a pequena dispersão das medições, foram executadas cinco medições por vazão proposta em três dias diferentes. Totalizando-se quinze medições por vazão para essa configuração.

5.3.2 Cenário 2

Como principal interesse do trabalho, em atenção aos objetivos específicos, quanto à verificação da representatividade do escoamento altamente aerado, em degraus, por meio de modelagem numérica, foi executado o Cenário 2. A segunda configuração do experimento contou com 22 degraus de 5 centímetros de altura cada. Ou seja, trata-se da estrutura completa com 1,10 metros de queda. Dessa forma, foi possível avaliar o escoamento pelo MEF e MVF através de dois programas representantes, Autodesk® CFD e OpenFOAM®, respectivamente.

Neste cenário foi possível avaliar a velocidade terminal, perfil de entrada e linha d'água global para as vazões propostas. Os ensaios foram realizados em três dias diferentes com nove medições de velocidade por vazão em cada dia. Totalizou-se, neste caso, vinte sete medições por vazão. Conforme os resultados apresentaram mais dispersão na condição de escoamento com tal incorporação de ar.

Para os dois cenários foi possível avaliar o coeficiente de atrito (f) da calha e da descida em degraus. Assim, contextualizando-se os resultados as curvas disponíveis na literatura para velocidade adimensional terminal (CHANSON,2015).

5.3.3 Cenário 3

O Cenário 3, com relação à configuração geométrica do modelo físico reduzido, foi construído com auxílio da plataforma adaptável, conforme visto na Figura 5.1. Dessa forma, foi possível atingir a escala perfeita de 1:10 com 20 degraus de 5 centímetros de altura cada no modelo físico reduzido. Além de permitir a geometria de 8 metros máximos da berma em protótipo e criar condições de verificação da saída e entrada do módulo para pilhas de estéril.

Como o escoamento na descida em degraus é altamente aerado, o fenômeno do *Weir Flow*, detectado por Hager (1992) e assim demonstrado por Conterato (2014), foi identificado para alturas de soleiras menores que a altura crítica. É razoável o resultado, uma vez que as equações de hidráulica clássica não podem ser aplicadas nessas condições. Tornando a pesquisa experimental fundamental. A faixa de vazões ensaiada para configuração do módulo se restringiu as vazões de projeto, escoamento deslizante sobre turbilhões, sendo 5,2, 6, 7 e 8l/s. As alturas de soleira testadas começaram com 7,5 e 5 centímetros, mas o *Weir Flow* foi identificado conforme as Equações 4.33 e 4.34 da literatura previam (Hager,1992). Portanto, optou-se por trabalhar com alturas de soleira de 4, 3 e 2 centímetros. As posições na berma em escala (L) também foram testadas, definiu-se a melhor condição como 25, 37,5 e 50 centímetros de distância do pé. Com a distância mínima de 30 centímetros para o próximo sistema de queda e berma, evitando-se o salto dos degraus iniciais. Apresenta-se a Tabela 5.2 com resumo de todos os ensaios realizados por vazão.

Tabela 5.2: Resumo dos Ensaios realizados por Cenário.

Cenários	Vazões Testadas (l/s)	Número de Ensaios - Saída	Número de Ensaios por Vazão - Saída	Número de Ensaios - Entrada	Número de Ensaios por Vazão - Entrada	Total de Ensaios
1	2; 3; 4; 5,2; 6; 7; 8	105	15	35	5	140
2	2; 3; 4; 5,2; 6; 7; 8	189	27	63	9	252
3	5,2; 6; 7; 8	36	9	36	9	72

5.3.3.1 Análise dimensional do módulo proposto

A ideia pelo terceiro cenário foi a medição experimental para diversas configurações de bacia de dissipação com variação das vazões de projeto no regime deslizante sobre turbilhões, conforme descrito acima.

Portanto, seguindo os ritos do relevante trabalho de Altalib, Mohammed e Hayawai (2019) já citado, foi realizada a análise dimensional do módulo proposto para pilhas de estéril. Com os dados experimentais executar-se-á a regressão múltipla da equação final. A Figura 5.4 demonstra as variáveis elencadas. A aplicação do teorema de Buckingham assume, na forma inicial, uma condição como a Equação 5.5:

$$y_3 = \text{função}(y_h, q, y_1, y_2, \Delta z, L, \mu, \rho, g) \quad (5.5)$$

onde: y_h é a profundidade de entrada no módulo (m), q é a vazão específica (m^3/sm), y_1 e y_2 são as profundidades conjugadas do ressalto, y_3 é a profundidade de saída do sistema, Δz é altura da soleira (s) (m), μ é a viscosidade dinâmica da água (kg/sm), ρ é massa específica da água (kg/m^3), g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e L a posição de Δz (m).

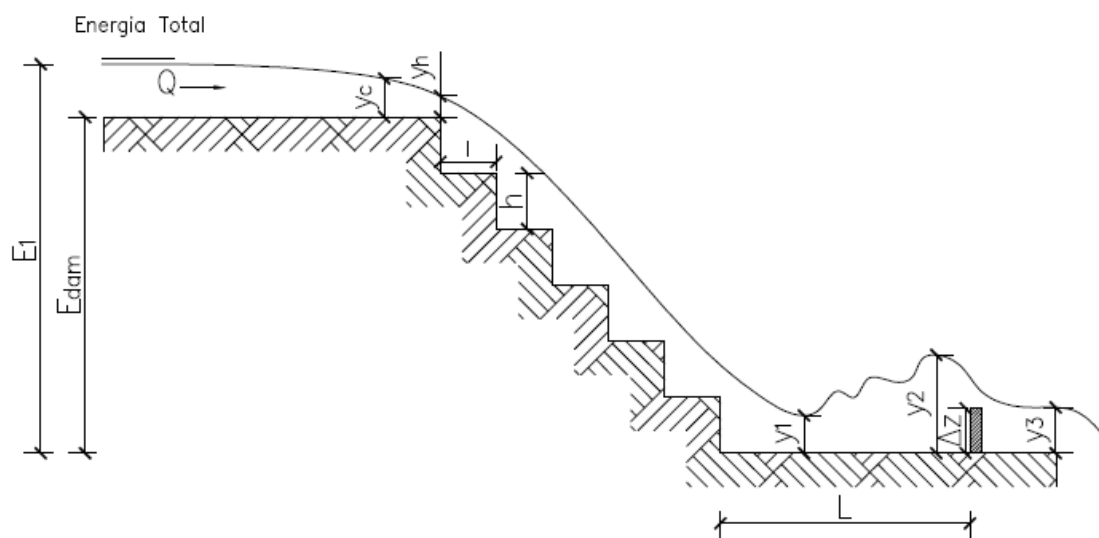


Figura 5.4: Variáveis da análise dimensional proposta.

Em seguida, exige-se que sejam fixadas as variáveis geométricas, cinemáticas e dinâmicas. Portanto, após várias tentativas, tendo em vista que se pode chegar a um resultado não satisfatória de equação dependente final, foram escolhidas y_h , q e μ como representantes das naturezas geométrica, cinemática e dinâmica, respectivamente.

Os π 's adimensionais para o teorema de Buckingham são gerados resolvendo-se cada sistema na forma da Equação 5.6.

$$\pi_1 = y_3(y_h)^a(q)^b(\mu)^c = (M^0L^1T^0)(M^0L^1T^0)^a(M^0L^2T^{-1})^b(M^1L^{-1}T^{-1})^c = M^0L^0T^0 \quad (5.6)$$

Através da resolução desses sistemas, como premissa do equilíbrio das grandezas fundamentais constituintes, são gerados expoentes fictícios que, caso a escolha das variáveis fixas seja pertinente, controlam a dimensão final. A Tabela 5.3 apresenta os resultados encontrados para cada adimensional. Conforme Oliveira (1980), pelo teorema de Buckingham, em se tratando de nove variáveis menos as três fixas mais uma, são, de fato, sete π 's adimensionais.

Tabela 5.3: Relações adimensionais encontradas pelo teorema dos π .

π_i	Adimensional	π_i	Adimensional
π_1	y_3/y_h	π_4	$\Delta z/y_h$
π_2	y_2/y_h	π_5	L/y_h
π_3	y_1/y_h	π_6	$\frac{\rho q}{\mu} = Re = \frac{\rho v y_h}{\mu} = q$
π_7	$\frac{g y_h^3}{q^2} = Fr_h$	Transformação: $\left(\frac{y_3}{y_H}\right)^3 = \frac{\sqrt{g}}{\sqrt{g}} \frac{y_2^3}{y_h^3} \frac{q^2}{q^2} = \frac{Fr_h^2}{Fr_2^2}$	

Seguindo-se a ordem do teorema de Buckingham, procedeu-se com as relações adimensionais entre as variáveis elencadas. Ou seja, pelo teorema, um π é função de todos os outros. Assim chega-se à Equação 5.7.

$$\frac{y_3}{y_h} = \phi \left(\frac{y_2}{y_h}, \frac{y_1}{y_h}, \frac{\Delta z}{y_h}, \frac{L}{y_h}, Re, Fr_H \right) \quad (5.7)$$

Aplicando-se as transformações fracionárias, sem alterar a propriedade adimensional de cada π , foi possível encontrar a Equação 5.8. Dessa forma, realizando-se o experimento com a variação da vazão será possível estabelecer uma tabela de controle com diversos dados de cada variável. Conforme Altalib, Mohammed e Hayawi (2019), o número de Reynolds não exerce função preponderante em escoamento em degraus, altamente aerados.

$$\frac{y_3}{y_h} = \text{função} \left(Fr_1, Fr_2, \frac{\Delta z}{y_h}, \frac{L}{y_h}, Fr_{y_h} \right) \quad (5.8)$$

Portanto, por meio de regressão múltipla pretende-se chegar aos coeficientes na forma da Equação 4.37, que avalia apenas a dissipação de energia no sistema e não as condições de entrada e saída que é um objeto deste trabalho. Caso o coeficiente de correlação não fique alto como no trabalho de Altalib, Mohammed e Hayawi (2019), ($R^2 = 0,998$), poderá se trabalhar com classes de vazões mais reduzidas. Com equações distintas e expoentes independentes também pode-se alcançar correlações maiores.

5.4 Instrumentação de medição

As principais técnicas utilizadas para medição de velocidade e nível d'água no modelo físico reduzido experimental, e, quando o caso para comparação com cenários pertinentes numéricos,

foram baseadas em filmagens com alta frequência de quadros com tratamento por *software* especializado. Será mais bem descrito no subitem seguinte.

Além disso, o controle de vazão por medição eletromagnética e profundidade por meio de ponta limimétrica também foi utilizado nos ensaios físicos.

A definição do correto valor de cada vazão operada para as configurações dos cenários distintos, conforme visto na Figura 5.1, foi realizado através de um medidor eletromagnético da marca *Endress-Hauser* modelo Promag (Figura 5.5). Assim, variando-se a frequência no inversor foi possível atender às faixas de vazões descritas na Tabela 5.1.



Figura 5.5: Medidor de vazão de marca *Endress-Hauser* modelo Promag.

5.4.1 Técnica de análise por filmagem

Para obtenção de valores de velocidade, profundidade e perfil da linha d'água foram utilizadas técnicas de análise por filmagem dos experimentos. A instrumentação básica consta de uma câmera especial que foi configurada para obter 240 fotos por segundo através de filmagem. O valor normal de uma câmera comum é de 30 quadros (fotos) por segundo. A alta frequência foi necessária, tendo em vista as altas velocidades possíveis no final do Cenário 1, por exemplo. Naquele caso trata-se de valores da ordem de 4 m/s. Para que fosse possível reproduzir o perfil de linha d'água sem erros entre pontos e pixels, além de capturar as posições cartesianas do experimento com pequenos deltas de distância e velocidade, a análise em alta frequência é fundamental. Durante todos os ensaios, a câmera permaneceu fixa em um tripé previamente definido e constante de nível bolha.

O *software* utilizado para o tratamento dos vídeos foi o Kinovea. Trata-se de um programa que permite a análise de movimentos e dimensões, muito utilizado no atletismo profissional. A

lógica de operação para captura de velocidades foi o lançamento de flutuadores vermelhos em contraste com a vizinha, uma vez que o modelo precisa diferenciar bem os *pixels* controlados e travados do resto do ambiente. O programa permite a definição de um eixo cartesiano bidimensional referenciando toda imagem (Figura 5.6). As fitas amarelas são comprimentos previamente conhecidos e informados em cada análise para calibração da relação *pixels* e distâncias.

Portanto, através de mudanças de coordenadas para comparação com os modelos numéricos (CFD's), também mais facilmente referenciados em x, y e até z, os mesmos pontos de velocidade podem ser comparados para uma vazão. A vazão de 5,2 l/s foi escolhida, como já prescrito, por se tratar do regime de escoamento sobre turbilhões, que é o valor de dimensionamento da estrutura hidráulica.

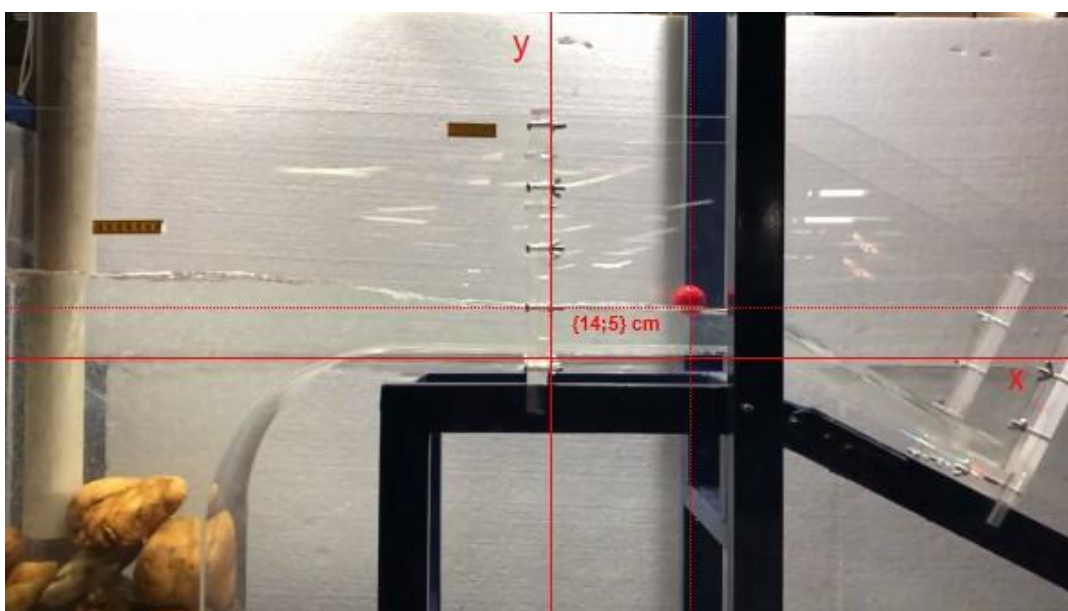


Figura 5.6: Definição de um sistema cartesiano de controle experimental.

Apesar de os valores poderem ser consultados visualmente no vídeo (Figura 5.7) pelo *software* Kinovea, para um análise mais detalhada e comparação precisa dos resultados de profundidade, perfil da linha d'água e velocidade o programa permite exportar os dados referenciados em "x" e "y", previamente definidos, para uma planilha do Excel. Fica mais uma vez evidente a necessidade do trabalho com uma câmera capaz de atingir muitos quadros por segundo, como os 240 quadros que forma utilizados nesta pesquisa. Caso contrário, entre um ponto e outro haveria um erro substancial de conformação da trajetória em segmentos de reta grandes.



Figura 5.7: Trajetória de velocidades na entrada de uma rampa lisa. Cenário 1, $Q_m=5,2$ l/s.

A frequência das lâmpadas do laboratório não atendeu a iluminação necessária ao experimento. Como a filmagem é de 240 quadros por segundo e as lâmpadas comuns são de 60 Hertz, foi necessário adequar dois holofotes de LED para reforçar a iluminação. Sem os dois instrumentos o vídeo apresentava variação de escuro para claro diversas vezes. Por fim, a Tabela 5.4 mostra a saída padrão em planilha eletrônica dos dados de velocidade para cada ponto do experimento, pelo Kinovea, tornando possível diversas conclusões gráficas comparativas com os modelos numéricos desenvolvidos.

Tabela 5.4: Saída de dados padrão para planilha eletrônica pelo *software* Kinovea. Tempo em milésimos de segundo.

Track			
Label :	Label		
Coords (x,y:cm; t:time)			
x	y	t	V(m/s)
-21,53	8,24	0	0,29
-21,36	8,18	4	0,29
-21,24	8,12	8	0,29
-21,07	8,12	12	0,29
-20,9	8,12	16	0,3
-20,79	8,07	20	0,31
-20,62	8,07	25	0,31
-20,45	8,01	29	0,31
-20,22	8,07	33	0,31

5.5 **Desenvolvimento dos modelos numéricos**

O atendimento aos objetivos relacionados à comparação entre o Método dos Elementos Finitos (MEF) e Método dos Volumes Finitos (MVF), por meio de CFD, foi desenvolvido com a construção dos modelos nos *softwares* Autodesk® CFD e OpenFOAM®, respectivamente. O primeiro trabalha com a forma de discretização das equações de *Navier-Stokes*, estudadas no subitem 4.3.1.3, através do MEF. Ou seja, para cada parcela integral com solução não analítica é atribuída uma discretização numérica com funções de peso nos elementos infinitesimais. Já o segundo modelo, OpenFOAM®, operando através do MVF, discretiza o mesmo pacote primário de equações sem funções de peso nos volumes infinitesimais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Os focos das análises foram nas velocidades terminais observadas no modelo físico e numéricos, além de, principalmente, os perfis da linha d'água, velocidades de entrada, níveis e demais caracterizações para descida nas diferentes configurações. Para isso, como recomendação interessante, a priori, foi executada a configuração do Cenário 1 numérico, denominada condição de controle por Sanagiotto (2003) e Dai Prá (2004). Situação que a modelagem numérica não está na pior condição de estresse com relação à turbulência e incorporação de ar, conforme trata-se de um modelo não totalmente bifásico.

No Cenário 2, em sequência, já se foi capaz de avaliar as diferenças na descida em degraus propriamente. Essa etapa foi realizada através do desempenho dos modelos numéricos Autodesk® CFD e OpenFOAM®, por meio de variáveis de velocidade de entrada e finais, níveis, perfil de linha d'água e caracterizações como posição de início da aeração e vórtices. Sempre se levantou as medições nos modelos físicos frente à capacidade de representação dos numéricos equivalentes devidamente calibrados. Ou seja, representou-se os Cenários 1 e 2 do modelo físico reduzido através de modelos numéricos via MEF e MVF para vazão de referência de 5,2 l/s. Somente após os resultados comparados, a extrapolação foi realizada para o modelo com melhores resultados e a fim de se identificar também *solvers* mais adequados a progressividade da aeração.

O Cenário 3 foi exclusivamente experimental físico, com diversas medições e ensaios, totalizou-se 36 combinações. Portanto, não foi estudada representação numérica desta configuração. O estudo do escoamento numérico em degraus, pelos métodos abordados, foi atendido pelos dois primeiros cenários simulados.

As simulações executadas pelo FLOW-3D® não realizaram comparação entre o MEF e MVF, devido à natureza distinta de seus resultados. O modelo tridimensional, via FLOW-3D®, foi desenvolvido com o *software* através licença educacional disponível. Portanto, existe, nesse caso, uma limitação de 200 mil células de cálculo. Como valor é muito baixo, apenas o Cenário 1 exigiu mais de 2 milhões de células de cálculo, a empresa representante deste programa no Brasil, Mettalfoma, em São Paulo, realizou o processamento para o maior número de células dando condições de apresentação dos resultados para este *software*. Salienta-se que uma melhor condição de simulação para o FLOW-3D® poderá ser alcançada com refinamento mais apropriado de malha, por exemplo. Portanto, os resultados apresentados para este *software* são apenas demonstrativos e exploratórios apenas para o Cenário 1, descida de água lisa.

Por fim, os outros dois programas, Autodesk® CFD e OpenFOAM®, um via MEF e ou outro via MVF, trabalharam com espessuras que tornam o modelo “bidimensional”, além de serem mais apropriados à avaliação comparativa do desempenho. Por fim, os dois modelos “bidimensionais” foram desenvolvidos e processados com recursos disponíveis no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG e pessoais do autor, tornando-os de acessibilidade integral a esta pesquisa. O tempo médio de processamento dos casos variou de 5 a 7 dias entre os cenários 1 e 2 para os *softwares* comparáveis via MEF e MVF, para os recursos computacionais utilizados descritos em sequência.

5.5.1 Autodesk® CFD

O *software* Autodesk® CFD, como já enunciado, trabalha com Método dos Elementos Finitos. Miranda (2019) trabalhou com modelagem numérica de reservatórios nesse programa e relatou a maior facilidade operacional frente à outros modelos em CFD.

O computador utilizado para ler o processamento realizado na nuvem da Autodesk teve as seguintes configurações: Processador Intel Xeon E5-2620 2.10 GHz, Memória RAM de 64 GB e 16 núcleos de processamento com 32 processadores lógicos. Trata-se das características principais do servidor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG.

A interface de operação do *software* é bastante direta (Figura 5.8). Todo projeto segue uma ordem entre importação da geometria, atribuição dos materiais constituintes, condições de contorno, condições iniciais, malhas e condições de simulação (esquerda para direita).

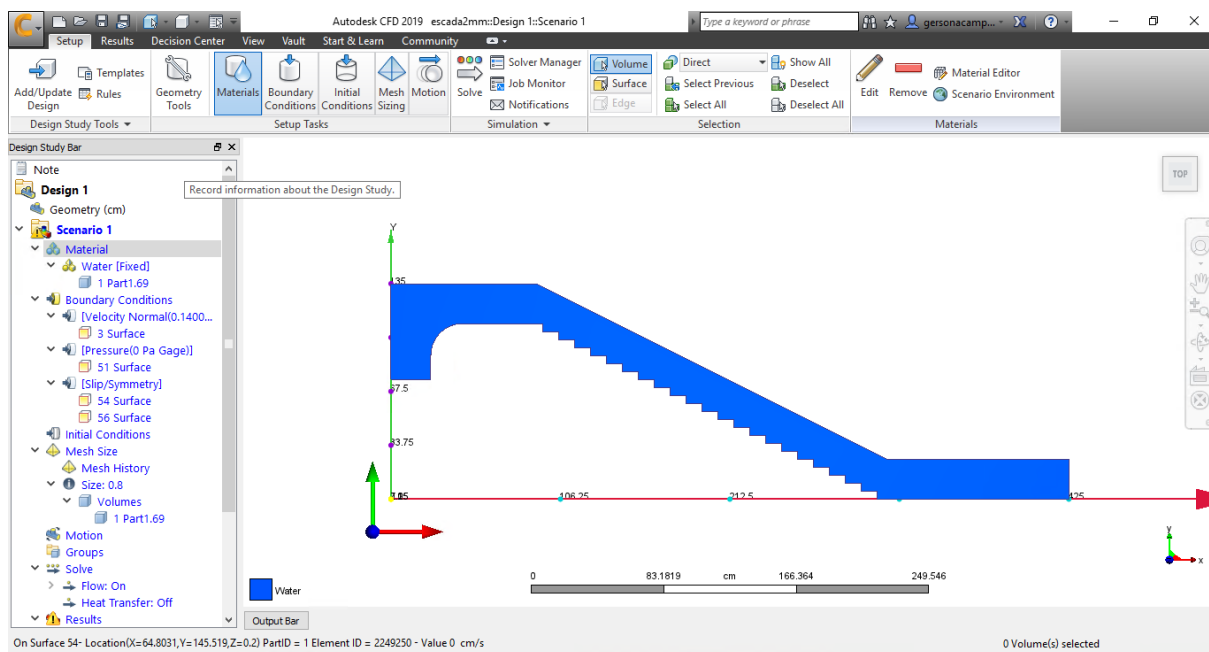


Figura 5.8: Interface gráfica do programa Autodesk® CFD versão Ultimate 2019.

5.5.1.1 Geometria

Para geometrias bem parametrizáveis, como caso dos Cenários 1 e 2 do modelo físico reduzido que se pretendeu representar, não se fez necessário uso de técnicas de escaneamento, por exemplo. Pelo contrário, através da criação das geometrias com auxílio do programa AutoCad 2019 e exportação no formato ‘.igs’ o *software* final, Autodesk® CFD, realizou a leitura. Inicialmente as simulações eram executadas com modelos de 15 cm de espessura, compatível com a realidade do modelo físico. Porém, devido a capacidade de cálculo disponível no servidor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG optou-se por executar a simulação com 1 centímetro de espessura da descida de água lisa e, inicialmente, também para degraus, Cenários 1 e 2 respectivamente. A condição de 15 centímetros gerava arquivos de cerca de 80 gigabytes de dados, volume ilegível para a estrutura computacional disponível. Apesar do processamento ser executado na nuvem da Autodesk e recebido pelo servidor, a espessura reduzida, como de 1 centímetro do escoamento, é realidade em metodologia de diversos trabalhos constantes da literatura (TASSINARI *et al.*, 2020).

Os materiais físicos constituintes do domínio são atribuídos em sequência. Como trabalhou-se com modelo físico todo em acrílico, e o programa já possui uma extensa base de dados de

materiais, incluindo coeficientes de dilatação térmica, volumétricos e até condutividade elétrica, optou-se por apenas indicá-los em suas posições no domínio de cálculo.

5.5.1.2 Condições de Contorno

As condições de contorno do domínio são bastantes diretas para os cenários representados. Para o caso do *software* Autodesk® CFD, como trata-se de uma “fatia” do escoamento, bastou indicar as seções de corte como condição de parede deslizante (*slip simetry*). Segundo Autodesk® (2019), as vizinhanças não afetam o escoamento principal nessa condição de contorno, como tensões de cisalhamento, por exemplo. O comportamento é como de um uma vizinhança de fluido para o programa, ideal para reduzir o peso de cálculo em casos simétricos. O trabalho de Tassinari *et al.* (2020) também utilizou o recurso de fatiamento do escoamento para modelagem numérica do escoamento em uma descida de água em degraus.

As entradas e saídas de fluido do domínio de cálculo são estabelecidas em função da vazão volumétrica, mássica e até velocidade em uma área prescrita. Para vazão de 5,2 l/s, representante do regime deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), foi modelada entrada (*inlet*) do domínio com velocidade de entrada do fluido de 0,14004 m/s (Figura 5.9).

A utilização de rochas como laminadores permite a aproximação da entrada regularizada na modelagem numérica, além do comprimento do canal de aproximação.

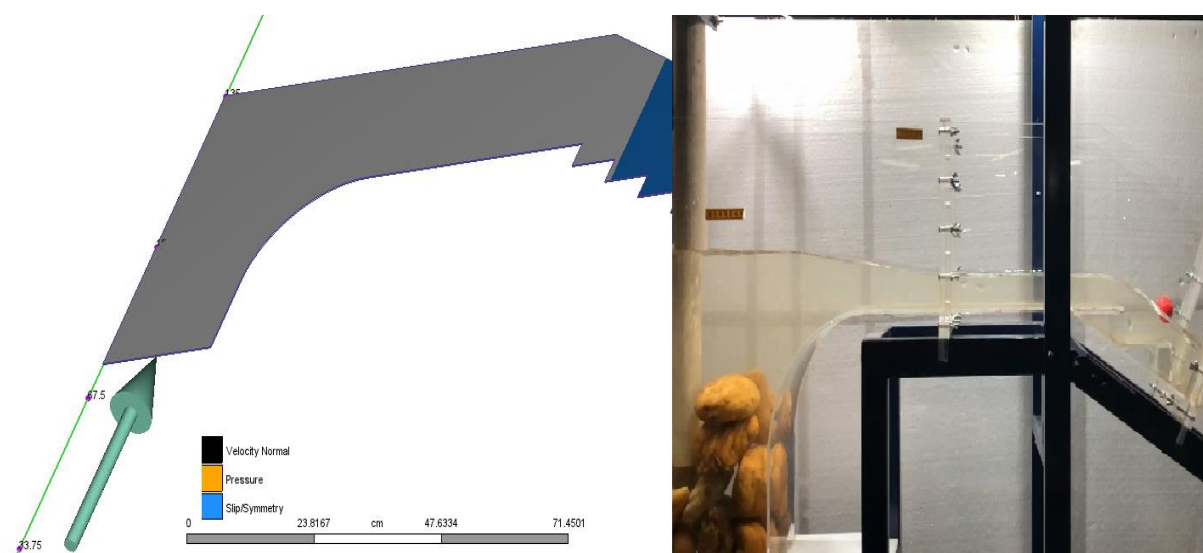


Figura 5.9: Entradas de fluido nos modelos numérico e físico.

Por fim, com relação à saída (*outlet*) de fluido do domínio, foi atribuída condição de pressão nula para face ao final da berma.

5.5.1.3 Malha

Alguns programas de modelagem numérica de fluidodinâmica computacional exigem a construção da malha em um *software* terceiro. Porém, no Autodesk® CFD, assim como nos outros programas trabalhados nesta pesquisa, a malha pôde ser gerada dentro do mesmo modelo. No tocante ao Autodesk® CFD, funções de traçado automático estão disponíveis, denominadas *AutoSize*. Por sua vez, para escoamentos que apresentem diferentes gradientes de velocidade, Autodesk® (2019) não recomenda o traçado automático, mas sim manual. Contudo, como teste, foi executado modelo no Cenário 1 com função *AutoSize*, de fato os resultados não apresentaram convergência gráfica e não são racionais.

Dessa forma, para o refinamento manual da malha, global e local, inúmeros testes foram realizados para os Cenários 1 e 2. Sempre com valores de velocidade na entrada e saída medidos no modelo físico como critérios norteadores para vazão de 5,2 l/s, além de balizadores teóricos. O trabalho de Arantes (2007) desenvolveu uma interessante abordagem para modelagem numérica do escoamento em vertedouros em degraus. Naquele trabalho, o autor alcançou critério final as dimensões de elementos iguais a 5 centímetros globais e 1 centímetro local, próximo a cada degrau. Os valores foram balizadores dos primeiros testes para esta pesquisa, uma vez que a literatura pouco descreve a dimensão da malha otimizada encontrada para os diversos problemas, mesmo sabendo que as dimensões dos degraus, velocidades máximas, incorporação de ar, dimensão total da queda e vazão interferem na malha ideal. Lembrando-se que o paradigma é quanto mais refinada uma malha, maior será o esforço de cálculo, em dias, para executar a simulação.

Portanto, a partir dos valores que Arantes (2007) propôs, refinou-se globalmente e localmente a malha nos Cenários 1 e 2 (Tabela 5.5) . Os valores de 2 milímetros de refinamento local nos degraus e 8 milímetros no domínio global foram alcançados para modelagem numérica do modelo físico reduzido deste estudo. O trabalho recente de Tassinari *et al.* (2020), publicado após a convergência destas malhas, apoia o dimensionamento ideal da malha encontrada. Tassinari *et al.* (2020) propuseram, para um modelo numérico feito no Ansys CFX, com 32 degraus de 6 centímetros cada, malhas grosseiras, médias e finas. Os resultados ideais foram gerados, por Tassinari *et al.* (2020), com malha média de refinamento local de 3 milímetros.

Valor que está muito próximo ao desenvolvido neste estudo. O estudo de Tassinari *et al.* (2020) também utilizou-se de modelo físico na escala 1:10 para controle dos resultados.

Serão apresentados os resultados comparados, físicos e numéricos, de velocidade no item à frente sobre validação. Salienta-se que a malha mais refinada, analisando-se os gradientes de velocidades envolvidas, deveria ser da estrutura com maiores velocidades reinantes, ou seja, descida lisa no Cenário 1. Contudo, a estrutura que determinou o maior refinamento, adotado no trabalho, foi para o Cenário 2. A explicação se deve ao fato de que no escoamento em degraus, altamente aerado, o processo de turbulência e incorporação de ar demanda malha mais fina para captura da mistura. A relação de dimensão de malha e propriedades do escoamento não é linear. Assim sendo, a menor dimensão atende todos os outros casos.

De acordo com subitem 4.3.2, como o estudo de Bayon *et al.* (2018), os modelos mais adequados aos escoamentos em degraus são ‘k- ϵ ’, ‘RNG’ e ‘SST-k- ω ’. Como já enunciado, o melhor modelo para avaliar a mistura de ar e água (VOF) foi o ‘RNG’. Adotado, portanto, nesta pesquisa.

Finalmente a Tabela 5.5 resume as etapas e testes realizados para convergência local e global, como testes para obtenção do refinamento final alcançado nesta pesquisa.

Tabela 5.5: Convergência da malha a partir de Arantes (2007) e apoiado por Tassinari *et al.* (2020).

Malha (mm)		Modelos de Turbulência			Convergência
Local	Global	SST-k- ω	k- ϵ	RNG	
10	10	sim	sim	sim	não ok
8	8	-	-	sim	não ok
6	8	-	-	sim	não ok
4	8	-	-	sim	não ok
2	8	-	-	sim	ok

A Figura 5.10 exhibe os refinamentos locais e globais da malha no *software* Autodesk® CFD. Conforme o menor elemento da malha tem 2 milímetros de tamanho, considerando um centímetro de espessura do modelo, trata-se de cinco elementos na profundidade. O que torna o conceito bidimensional não perfeitamente aplicável. Mas, para efeito de avaliação prática, pode-se considerá-lo bidimensional como uma “fatia” de um centímetro do escoamento. Como era de se esperar, conforme visto no item 4.3.1, por usar o Método dos Elementos Finitos, o

software Autodesk® CFD trabalha com elementos triangulares no plano gerando tetraedros no espaço.

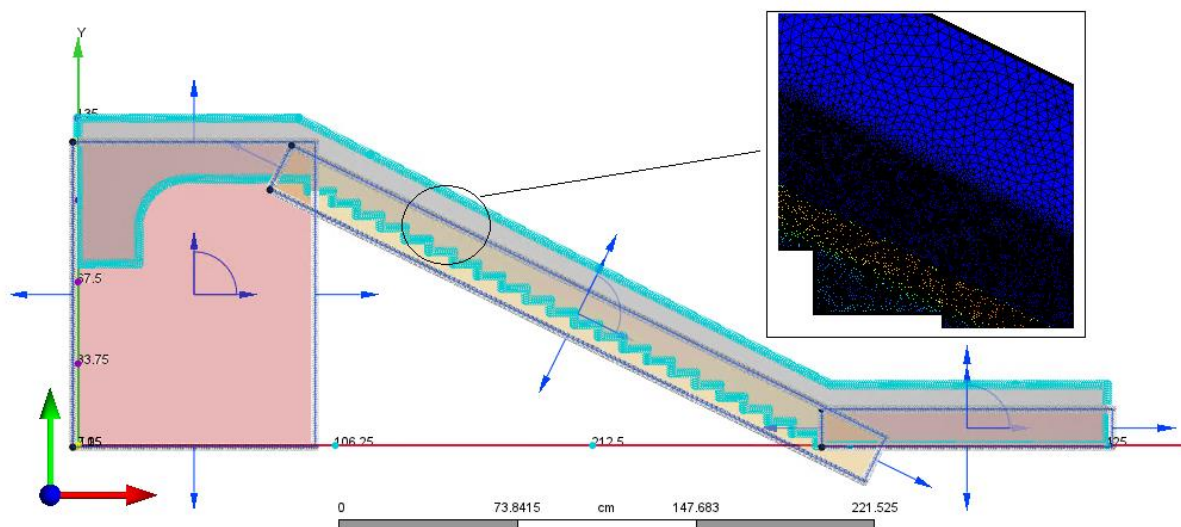


Figura 5.10: Malha tetraédrica global e local no Autodesk® CFD.

5.5.1.4 Condições de simulação

Por fim, após a montagem do projeto no *software* indicado neste tópico, através da importação da geometria, atribuição dos materiais, condições de contorno e malhas definidos anteriormente, seguiu-se para o módulo de execução da simulação (*Solve*). O Autodesk® CFD permite à execução de um *solver* padrão para condição de escoamento à superfície livre. Diferente da abordagem de outro programa que será tratado mais à frente.

Dentro das condições de simulação, seguiu-se, mais uma vez, o norte dado pelo trabalho de Arantes (2007) que preconizou um passo de tempo de cálculo de 10^{-3} segundos para o escoamento numérico de vertedouros em degraus. Importante destacar que o modelo utilizado por Arantes (2007) foi o CFX® Ansys versão 10.0. Os *softwares* CFD's mais recentes contém algoritmos mais robustos para a alteração do passo de cálculo a medida que se processa a simulação. Tanto Autodesk® CFD, FLOW-3D® e OpenFOAM® podem alterar o passo de cálculo previamente definido caso a convergência em cada interação não seja boa, utilizando número de Courant como base, por exemplo. Obviamente não é interessante deixar o encargo de grande alteração (deltas) do valor do passo para o programa, por isso, todas as simulações partiram de 10^{-3} segundos para esse parâmetro nos *solvers*.

Ainda, para o caso do Autodesk® CFD, a condição de advecção do elemento de cálculo, valor relacionado ao segundo termo da Equação 4.52 já discutida, foi adotado esquema de advecção do tipo ADV 5 (Modified Petrov-Galerkin). Essa decisão teve como base o manual do programa e, principalmente, o trabalho de Miranda (2019) que utilizou o mesmo esquema para aplicações hidráulicas do Autodesk® CFD. O programa possui cinco esquemas de advecção recomendados, variando-os para o cálculo de fluxos de calor em uma sala, correntes elétricas até aplicações hidráulicas.

O fluido foi considerado incompressível. O modelo de turbulência, ‘RNG’, já discutido como melhor pela literatura, também foi atribuído no *solver* para as simulações (Figura 5.11). Quando se adicionou a condição de escoamento à superfície livre, foi necessário definir o eixo que a gravidade age no modelo, podendo variar em cada projeto. Por fim, como enunciado, todo processamento foi realizado na nuvem da Autodesk, com os resultados recebidos pelo servidor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG. O servidor foi extremamente necessário, uma vez que a leitura do processamento final é morosa, o projeto de rampa (Cenário 1) gerou cerca de 8,2 gigabytes e degraus (Cenário 2) até 10,5 gigabytes.

O Autodesk® CFD 2019 permite licença educacional à UFMG, portanto utilizada neste trabalho. Ainda, como os créditos de processamento em nuvem, todo estudante tem uma cota inicial de 10.000 créditos.

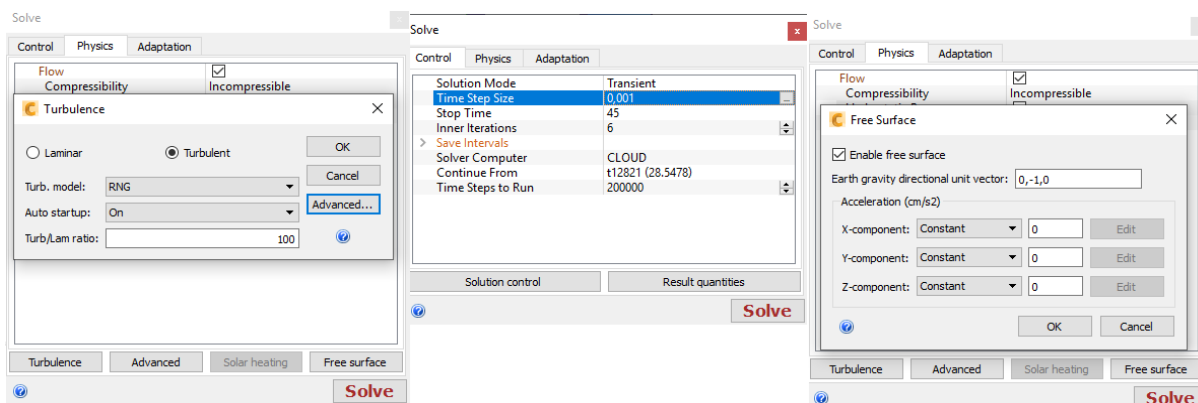


Figura 5.11: Configuração final do *solver* do Autodesk® CFD.

5.5.2 OpenFOAM®

O *software* escolhido para avaliar o desempenho numérico dos Cenários 1 e 2, que trabalha com Métodos dos Volumes Finitos (MVF) foi o OpenFOAM®. Trata-se de um programa livre

especialmente desenvolvido para o sistema operacional Linux. Existem emuladores que permitem a execução do modelo dentro do Windows, como blueCFD®-Core. Assim, os primeiros testes utilizaram esse terceiro programa, mas como existem limitações de *Solvers* e comandos indisponíveis, optou-se por trabalhar com a versão 7 original do OpenFOAM® para Linux, Ubuntu. Dessa forma, através de uma máquina virtual, *Oracle VirtualBox*, foi possível desenvolver os modelos numéricos em ambiente Linux dentro do Sistema Operacional Windows. O computador utilizado foi pessoal do autor com 16 GB de memória RAM, processador i7 de oitava geração com 4 núcleos de processamento e 8 processadores lógicos.

A metodologia de trabalho do OpenFOAM® tem uma curva de aprendizado maior que os demais softwares. O programa não possui interface, qualquer trabalho é inicialmente carregado em três pastas denominadas 0, *constant* e *system*. Essas pastas possuem dicionários, arquivos de textos editáveis em ambiente de programação com linguagem (C++) que são lidos e executados no terminal de comando (Figura 5.12). Portanto, à medida que os comandos são executados via terminal e o processamento é feito, diversas outras pastas com passos de tempo são salvas.

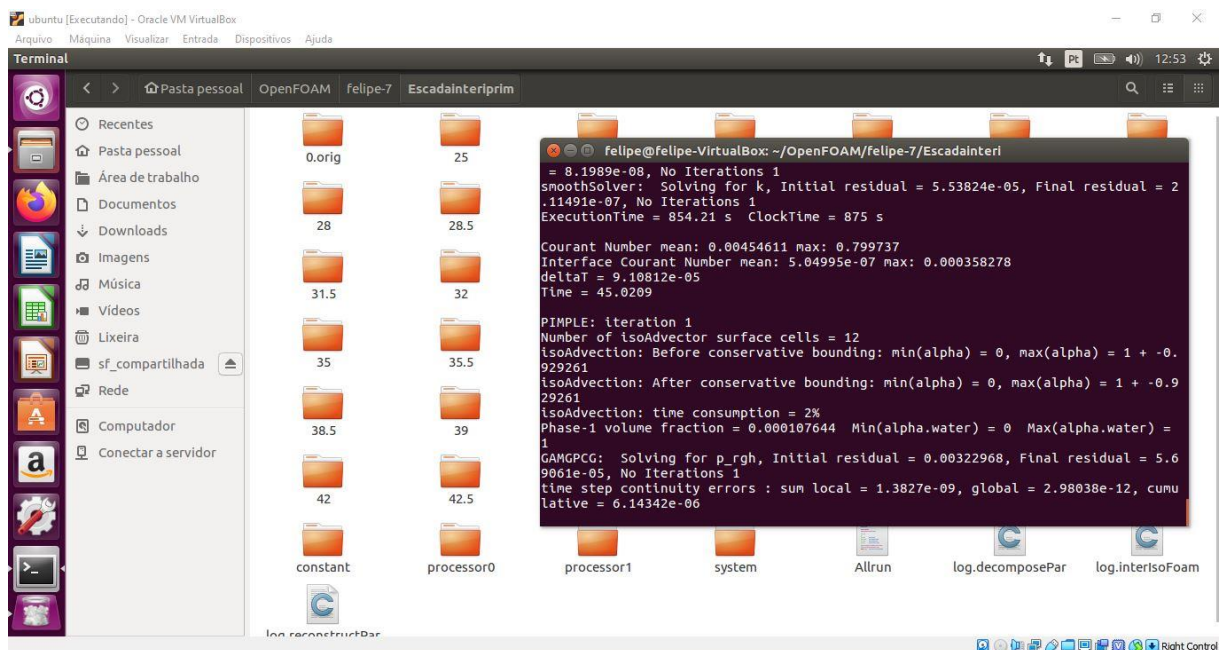


Figura 5.12: Ambiente de execução de um projeto no OpenFOAM®.

5.5.2.1 Geometria

O programa de desenho auxiliado por computador, AutoCad® 2019, foi utilizado para gerar todas as geometrias, Cenários 1 e 2, necessários ao presente trabalho. Porém, o OpenFOAM®,

assim como FLOW-3D®, recebem à extensão ‘.stl’ dos modelos. Diferentemente do Autodesk® CFD que trabalha com ‘.igs’.

A mesma metodologia para trabalhar-se com uma “fatia” do escoamento foi adotada. Uma vez que o processamento tridimensional, completo dos modelos, com os recursos computacionais disponíveis seria impossível. Dessa forma, será tratado no subitem de geração da malha, os comandos de corte da malha nas geometrias criadas para um modelo com uma célula de espessura no OpenFOAM®.

Como domínio físico é constituído de acrílico, apesar dos testes iniciais terem sido realizados com rugosidade de Manning do acrílico ($n=0,009$), os resultados eram inalterados para o nível de precisão necessário. Ou seja, de fato a estrutura é bastante lisa.

5.5.2.2 Condições de contorno

As condições de parede deslizante, sem interferência de atrito com a vizinha, é a melhor para se considerar uma “fatia” do escoamento (AUTODESK®, 2019). Assim, esse mesmo conceito foi adotado nessas faces do modelo. A entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) do modelo também foram adotadas conforme as faces citadas em 5.5.1.2. Uma vez que a utilização de rochas para laminar o fluxo de entrada no modelo físico reduzido é uma boa aproximação para distribuir a vazão na face inferior da caixa de elevação do nível d’água.

5.5.2.3 Malha

O *software* OpenFOAM® versão 7 possui uma melhor condição de criação da malha internamente, forma utilizada nesta pesquisa. Em versões mais antigas, programas terceiros como SALOME eram utilizados para criação de uma malha de cálculo. Portanto, após a edição correta dos dicionários ligados à malha na pasta *System*, foi possível executar os comandos *BlockMesh*, *ExtrudeMesh* e *SnappyHexMesh*. A metodologia lógica desta etapa através destes comandos foi:

- Criou-se um bloco cúbico com uma malha global de elementos de 8 milímetros maior que a geometria inicial;
- Procedeu-se o recorte, através da referência da geometria ‘.stl’, da malha;

- Determinou-se o refinamento local com número de camadas, para cada superfície da geometria '.stl', sempre por meio dos dicionários prévios. Aproximando o valor de 2 milímetros ao tamanho do elemento refinado.

O trabalho de Arantes (2007), norteador dos valores encontrados de 8 e 2 milímetros para o refinamento global e local, respectivamente, foi seguido conforme visto no subitem 5.5.1.3, amparado pelos resultados de Tassinari *et al.* (2020) com malha local de 3 milímetros. Para atendimento aos objetivos desta pesquisa, estipulou-se o mesmo nível refinamento nos diferentes *softwares*, apesar do avanço do estudo das malhas isoladamente poder gerar resultados cada vez mais eficazes. Esse mesmo detalhamento da malha também gerou valores muito próximos dos teóricos e medidos no modelo físico reduzido, conforme será discutido à frente. Portanto, indicativo de uma boa dimensão de elementos e volumes para essa geometria e vazão. Como OpenFOAM® é um *software* que trabalha com Método dos Volumes Finitos, a malha gerada é cúbica, preferencialmente. A Figura 5.13 mostra os refinamentos locais e globais gerados pelos comandos expostos no terminal do programa, em seguida visualizada no ParaView.

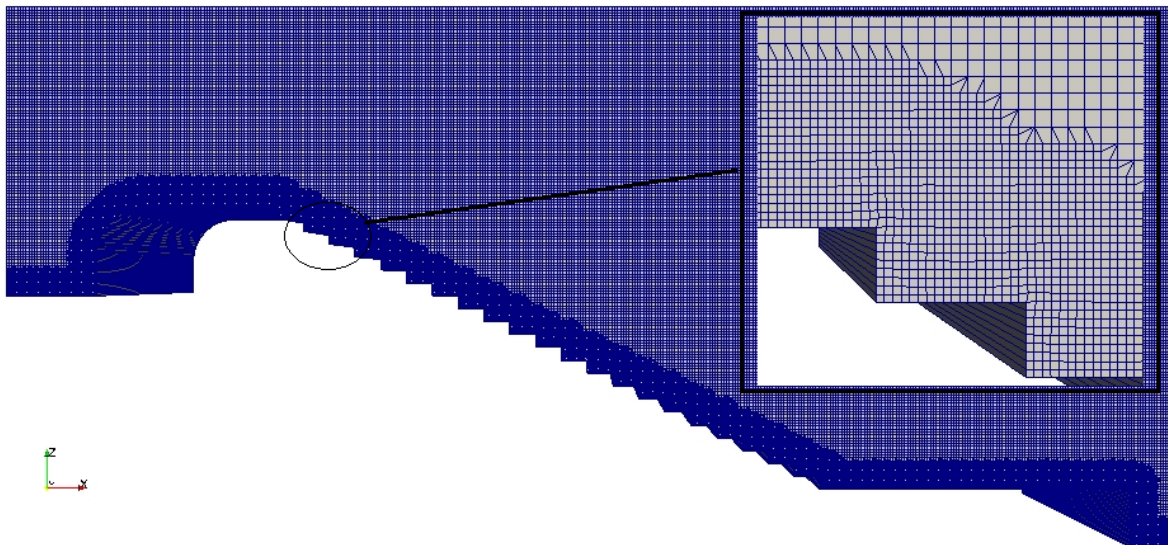


Figura 5.13: Malha global e local no OpenFOAM®.

Como enunciado, o OpenFOAM® não possui interface gráfica de operação. Assim, os resultados são guardados em pastas com passos de tempo e os comandos executados no terminal. Para visualização do projeto final ou acompanhamento do processo o programa permite a leitura através de um *software* terceiro denominado ParaView (Figura 5.14), que foi

adquirido junto com download do programa CFD, enviado pelo próprio desenvolvedor do OpenFOAM®.

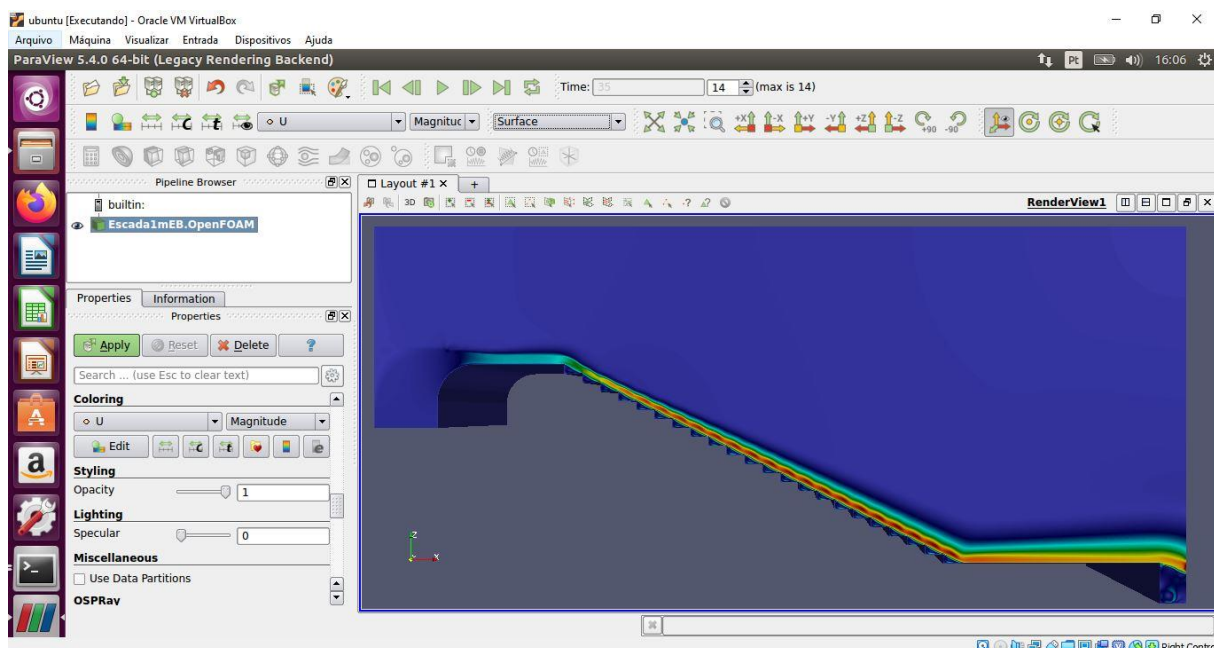


Figura 5.14: Visualização do Processamento no OpenFOAM® via ParaView.

5.5.2.4 Condições de simulação

Conforme discutido no subitem 5.5.1.4, amparado pelo trabalho de Arantes (2007), o passo de tempo para o cálculo foi de 10^{-3} segundos. Lembrando-se de que os *softwares* de CFD atuais possuem algoritmos robustos para variar tal parâmetro de acordo com o processamento dos modelos. Sendo necessária uma vizinha pequena para resultados ideias, daí a necessidade de valores referenciais da literatura.

As diversas condições básicas, como modelo de turbulência, foram conferias nos dicionários prévios. Porém, como o modelo segue a alteração de condições de escoamento multifásico prévias disponibilizados pelo desenvolver, diversas outras variáveis são constantes desses arquivos. O fluido foi tratado também como incompressível, uma vez que as condições primárias devem ser as mesmas para comparação dos resultados entre os *softwares*. Os modelos de turbulência testados foram ‘RNG’ e ‘SST-k- ω ’, conforme subitem 4.3.2.

Uma consideração muito importante com relação ao OpenFOAM® é o grande número de *Solvers* disponíveis. Diferente dos demais programas, este permite variar as condições de resolução das equações de *Navier-Stokes*. O padrão utilizado é o *Solver InterFoam*, mas como

caso é extremamente bifásico, principalmente no Cenário 2, foram utilizados os *Solvers InterIsoFoam* e *multiphaseEulerFoam*. O uso de um *solver* para mais de uma fase permite capturar melhor a aeração, apesar do *solver* padrão não ocasionar em erros de velocidade e pressão grandes (FERZIGER; PERIC, 2002).

5.5.3 FLOW-3D®

O terceiro software CFD, que trabalha também o Método dos Volumes Finitos, escolhido foi o FLOW-3D®. Trata-se de um programa fechado, portanto, foi realizada a modelagem através da licença educacional disponível no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos da UFMG. Como há limitação de 200 mil células de cálculo nessa licença, esta etapa do processamento, para pesquisa, foi efetuada na empresa representante do FLOW-3D® no Brasil, Mettalfoma, em São Paulo.

A melhor condição de simulação do caso concreto de escoamento em uma descida de água lisa ou em degraus seria através da modelagem numérica tridimensional. Porém, devido às limitações de recursos computacionais para essa pesquisa, excetuou-se a comparação entre o MEF e MVF por meio dos *softwares* Autodesk® CFD e OpenFOAM®, que trabalharam o problema de forma simplificada “bidimensional”. Contudo, como demonstração da melhor condição de simulação tridimensional, apenas para o cenário da descida de água lisa, o programa FLOW-3D® foi escolhido para apresentação exploratória.

A intenção de inclusão dos resultados desse programa foi exploratória complementar, uma vez que seus resultados são tridimensionais e de mais difícil interação ao longo do presente trabalho, tendo em vista o processamento externo. Ainda, os resultados, não foram possíveis de comparação aos modelos simplificados “bidimensionais” que realizaram os objetivos deste trabalho frente ao MEF e MVF. O FLOW-3D® é um programa robusto para o cálculo da fluidodinâmica computacional, com diversos algoritmos “revisores” do processo (FLOW-3D®, 2020). A versão 12.0, utilizada, consta de uma interface direta, com a ordem de montagem do projeto de cima para baixo, à esquerda (Figura 5.15).

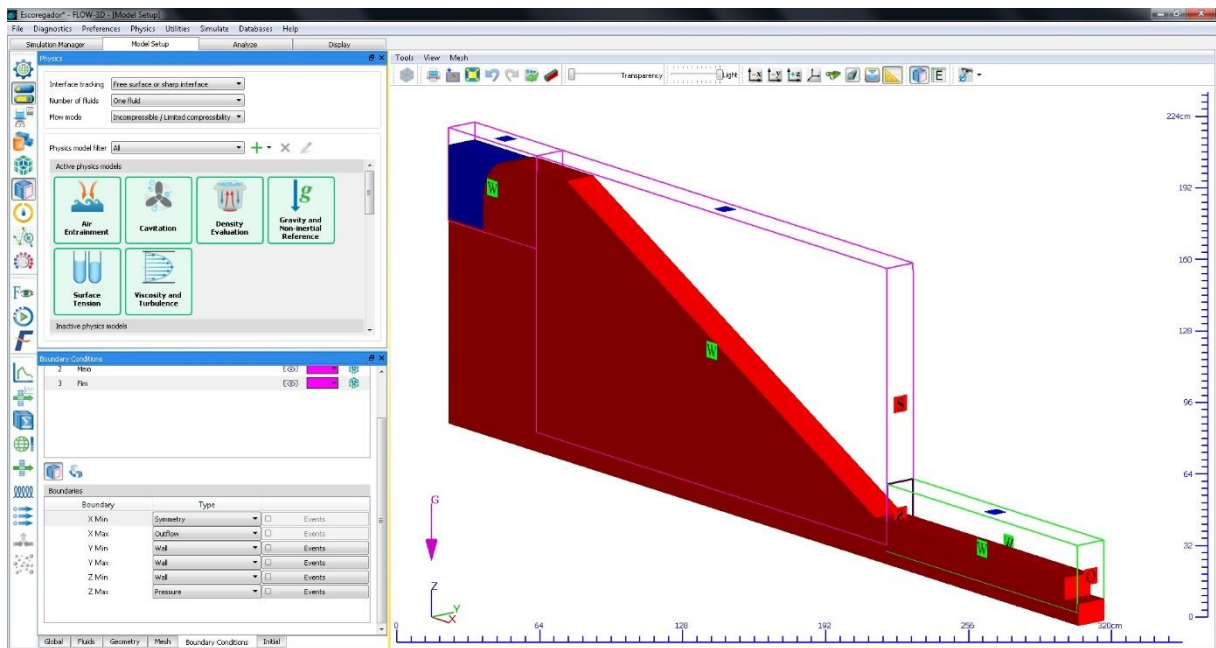


Figura 5.15: Interface gráfica do programa FLOW-3D® versão 12.0.

5.5.3.1 Geometria

A extensão do arquivo geométrico para leitura do FLOW-3D® foi o ‘.stl’. Como trata-se de um modelo tridimensional, foi utilizada seção completa do modelo físico reduzido, ou seja, 15 centímetros de espessura simulados.

Com relação à rugosidade do acrílico constituinte do domínio físico ($n=0,009$), conforme discussão do subitem 5.5.2.1, ao atribuir-se à condição de rugosidade do material às partes respectivas físicas não se notou variação na velocidade terminal significativa ao simular como estrutura, de fato, lisa.

5.5.3.2 Condições de contorno

Dessa vez, por não se tratar de parede deslizando, uma vez que o escoamento não é “fatiado” (TASSINARI *et al.*, 2020), os limites dos blocos de malha são entendidos como fronteiras finais do escoamento sendo simples paredes, *walls*. A entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) do modelo no domínio também foram adotadas conforme as faces citadas em 5.5.1.2. Dado que a utilização de rochas para laminar o fluxo de entrada no modelo físico reduzido foi uma boa aproximação para distribuir, também, a vazão na face inferior da caixa de elevação do nível d’água.

5.5.3.3 Malha

A partir do trabalho de Arantes (2007) de 5 centímetros globais e 1 centímetro local para o refinamento do escoamento em degraus, além do trabalho de Tassinari *et al.* (2020) discutido, o ponto de convergência para o FLOW-3D® foi testado a partir de um algoritmo de preferência da consistência da malha antes da simulação. Dessa forma, para o Cenário 1 foi encontrada relação de 5 milímetros para o tamanho do volume finito cúbico. Salienta-se que este programa fora abordado como exploratório tridimensional, uma vez que os objetivos foram cumpridos com a execução do modelo “fatiado” por meio do OpenFOAM® e Autodesk® CFD, representantes do MVF e MEF, respectivamente. Como neste *software* há possibilidade de redução dos blocos de malha, não há questões de refinamento local e global. Cada bloco foi otimizado para conter menos células mínimas necessárias acima do domínio.

A Figura 5.16 mostra os três blocos de malha desenvolvidos para o domínio de cálculo na configuração do Cenário 1. Ou seja, células desnecessárias ou ociosas no cálculo foram facilmente removidas da simulação.

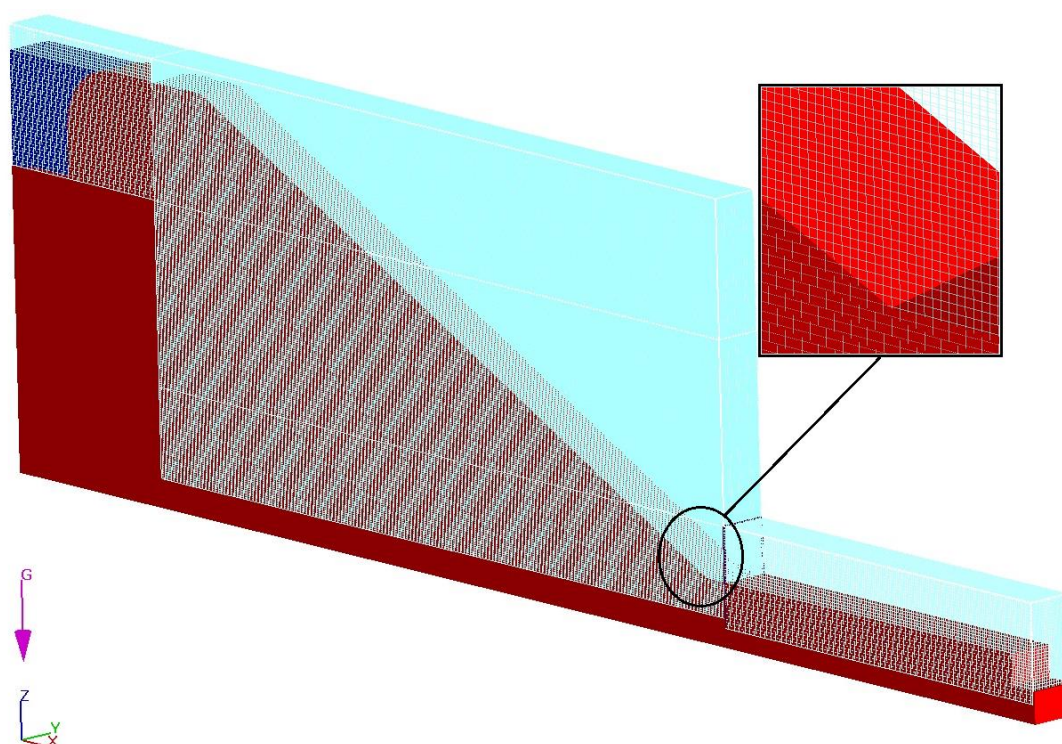


Figura 5.16: Malha cúbica em três blocos principais otimizados no FLOW-3D®.

5.5.3.4 Condições de simulação

Qualquer projeto desenvolvido no FLOW-3D® passa por uma pré-conferência (*pre-check*) antes da simulação efetiva. Esse módulo otimiza o projeto, permitindo a verificação global do caso, como malha, módulos carregados e coerência do processamento.

O modelo de turbulência foi o 'RNG'. O passo de tempo de cálculo foi norteado pelo estudo de Arantes (2007) de 10^{-3} segundos com ressalva da variação pelo algoritmo de cada *software* para melhorar a solução de acordo com a posição que se encontra uma partícula fluida em movimento na malha.

Assim como Autodesk® CFD, o programa FLOW-3D® plota os resultados das principais variáveis em tempo real, sendo possível acompanhar todo processo. Caso os valores não indicassem à convergência e à estabilidade, não foi necessário aguardar todo processamento.

Cabe explicar que modelo numérico tridimensional, para o Cenário 1, consumiu 25 gigabytes de armazenamnto, com cerca de 3,2 milhões de volumes finitos, como será mais bem descrito à frente. Assim, o Cenário 2 necessitou de uma malha próxima a calibração discutida. Mesmo com cerca de 10 milhões de volumes finitos e consumo de 80 gigabytes, processo de muito rigor computacional, os resultados para segunda configuração necessitariam de uma malha mais fina. Portanto, como processamento foi externo e dependente, optou-se por usar esses resultados apenas para o Cenário 1.

5.5.4 Validação das modelagens numéricas

Os modelos numéricos distintos foram divididos em Modelo numérico 1, para o Autodesk® CFD operando com MEF, Modelo numérico 2, para o OpenFOAM® trabalhando com MVF e Modelo numérico 3, em caráter simplesmente exploratório nesta pesquisa, para o FLOW-3D® desenvolvendo, apenas para o Cenário 1, também o MVF.

As simulações e seus critérios de melhores convergências, como variação de *solver*, por exemplo, foram discutidas detalhadamente em itens à frente nos resultados. Para validação dos resultados na configuração da vazão de projeto da descida ($Q=5,2$ l/s), entrada no regime deslizante sobre turbilhões, em seus diferentes Cenários 1, descida lisa e Cenário 2, descida em degraus, a Tabela 5.6 resume os valores explorados no capítulo de resultados.

Tabela 5.6: Medições físicas e numéricas da velocidade e profundidade finais.

Cenário 1	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)	Cenário 2	Velocidade (m/s)	Profundidade (cm)
Modelo Físico	3,76	1,10	Modelo Físico	1,98	1,77
Modelo numérico 1 - MEF	3,48	1,00	Modelo numérico 1 - MEF	2,2	2
Modelo numérico 2 - MVF	3,69	1,10	Modelo numérico 2 - MVF	2,1	1,7
			Teórico (Eq. 4.31)	1,91	1,83

Portanto, para o Cenário 1 a maior divergência entre as simulações numéricas e medições físicas é da ordem de 7,4%, enquanto no Cenário 2, com maior turbulência pelos degraus, a velocidade final experimental teve o maior desvio de 11,1% ambas para o Modelo numérico 1, via MEF. Por sua vez, trabalhando com MVF, por meio do Modelo numérico 2 comparável ao Modelo numérico 1 anterior, os desvios caíram para 1,9% e 6% em relação à descida no Cenário 1 e 2, respectivamente.

Finalmente, para extrapolar os resultados para outras vazões experimentais extremas, item que será discutido também nos resultados seguintes, uma vez que pela modelagem computacional da fluidodinâmica uma malha para certas entradas apresenta uma região própria de atuação, ou seja, é variável com as alteração das entradas, a Tabela 5.7 mostra o resumo das velocidades finais extrapoladas para vazões do regime de quedas sucessivas (*napped flow*) e deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), por meio do método mais eficiente encontrado neste trabalho (Modelo numérico 2 – MVF). Conforme são menores os erros e previsões de literatura correta (FERZIGER; PERIC, 2002; MOUKALLED; MANGANI; DARWISH, 2015; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Tabela 5.7: Medições físicas e numéricas das velocidades finais – Vazões extrapoladas.

Vazão 2,0 l/s	Velocidade (m/s)	Vazão 8,0 l/s	Velocidade (m/s)
Modelo Físico	1,3	Modelo Físico	2,21
Modelo numérico 2 - MVF	1,3	Modelo numérico 2 - MVF	2,55
Teórico (Eq. 4.29)	1,22	Teórico (Eq. 4.31)	2,205

Esse subitem destinou-se à apresentação metodológica no que se pode comparar à validação tradicional dos resultados pelos modelos clássicos. Como o processo de modelagem via CFD não segue tradicionalmente modelos prévios, a discussão de cada resultado é imprescindível e foi realizada em itens seguintes pelo Capítulo de Resultados e Discussão.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para apresentação dos resultados, optou-se por organizá-los pelos seus respectivos cenários, ou seja, Cenário 1 contendo a descida lisa, Cenário 2 com a descida em degraus completa (sem a bacia de dissipação) e Cenário 3 (sistema de descida e bacia). Cada uma dessas divisões apresenta as medições realizadas no modelo físico construído e as discussões numéricas pertinentes.

6.1 Cenário 1

6.1.1 Modelo físico reduzido

Os ensaios para levantamento das velocidades e níveis d'água na descida lisa foram tomados nos dias conforme Tabela 6.1. Como o escoamento, nessa configuração, apresenta um comportamento não abrupto da linha d'água, apenas 15 medidas da velocidade terminal foram selecionadas para determinação da mediana correspondente à vazão de comparação de 5,2 l/s. Vazão que é representativa da entrada no regime de escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), conforme Equação 4.7. Esse valor foi escolhido por representar, no referido regime, o valor de dimensionamento hidráulico dessas estruturas de condução.

Tabela 6.1: Bateria de ensaios – Cenário 1.

	Datas dos Ensaios				
	31/10/2019	29/10/2019	08/11/2019	08/11/2019	20/11/2019
Vazões (l/s)	Nº de medições na Entrada	Nº de medições no Pé	Nº de medições na Entrada	Nº de medições no Pé	Nº de medições no Pé
2	2	5	3	5	5
3	2	5	3	5	5
4	2	5	3	5	5
5,2	2	5	3	5	5
6	2	5	3	5	5
7	2	5	3	5	5
8	2	5	3	5	5
TOTAL DE MEDIÇÕES POR VAZÃO:	5 Entrada e 15 no Pé				

Apesar das medições experimentais exigirem maior número de medidas, no mínimo três, para comparação do resultado com outros da literatura ou processados, o perfil de entrada nas configurações do Cenário 1 é bastante homogêneo, fato que será comparado mais à frente com os perfis numéricos obtidos. A Figura 6.1 exibe a trajetória do flutuador na entrada da descida lisa para vazão de referência de 5,2 l/s, reitera-se que o Kinovea exporta os dados de posição

(x,y) associados à velocidade para uma planilha eletrônica, permitindo avaliação mais avançada dos resultados.



Figura 6.1: Perfil longitudinal de velocidade na entrada do Cenário 1 ($Q=5,2l/s$).

Da mesma forma, os resultados gráficos da análise de velocidades do escoamento com a vazão de referência para descida lisa, Cenário 1, são mostrados na Figura 6.2. A medição de velocidade no pé será referência para checar a capacidade de representação dos modelos numéricos para vazão de referência. Obviamente a necessidade do cenário menos agressivo, levando-se em conta areação do escoamento e perturbação do fluxo, é feita por meio do Cenário 1.

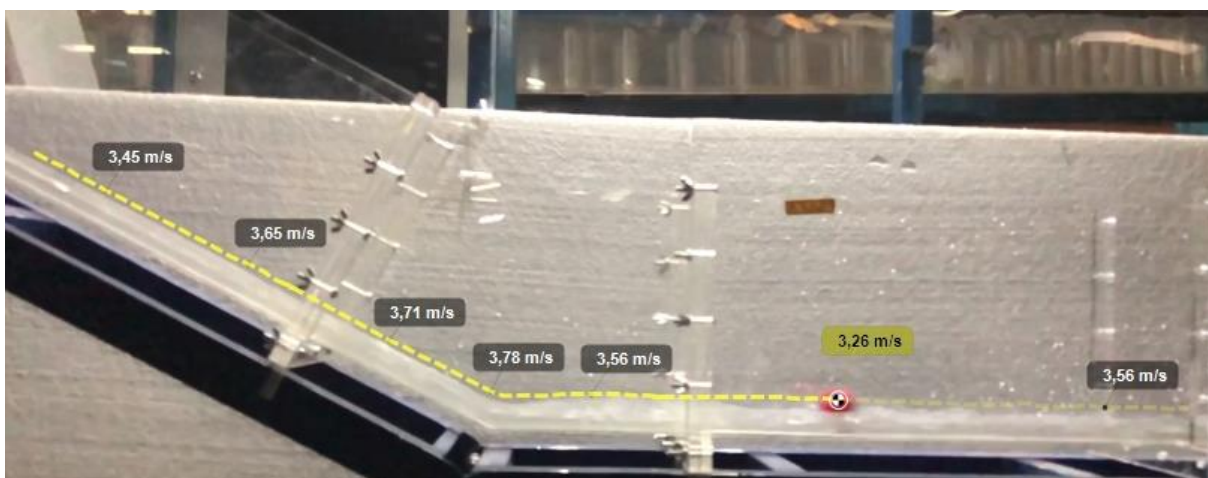


Figura 6.2: Perfil longitudinal de velocidade na saída do Cenário 1 ($Q=5,2l/s$).

Cada vazão ensaiada teve, portanto, 15 medições de velocidade no pé para o Cenário 1. Os resumos das velocidades medianas são apresentados na Tabela 6.2. Os dados completos por vazão, extraídos da análise por filmagem, estão disponíveis no Apêndice I.

Tabela 6.2: Velocidades terminais experimentais – medianas para o Cenário 1.

Vazões (l/s)	2	3	4	5,2	6	7	8
Medianas (m/s)	2,51	2,86	3,19	3,76	3,85	4,02	4,1

De forma prática, a Figura 6.3 exibe os diagramas de *box-plots* que contam com 15 medições cada. A Equação 4.32, considerando desnível da configuração do Cenário 1 de 1,1 metros, gera a velocidade máxima teórica no valor de 4,64 m/s. Curioso observar que aumentando-se a vazão os efeitos de atrito no perímetro hidráulico diminuem em relação a velocidade média da seção molhada, área do escoamento, mas sempre tenderá para valor menor que teórico máximo sem atrito.

Velocidades Terminais Experimentais - Descida Lisa

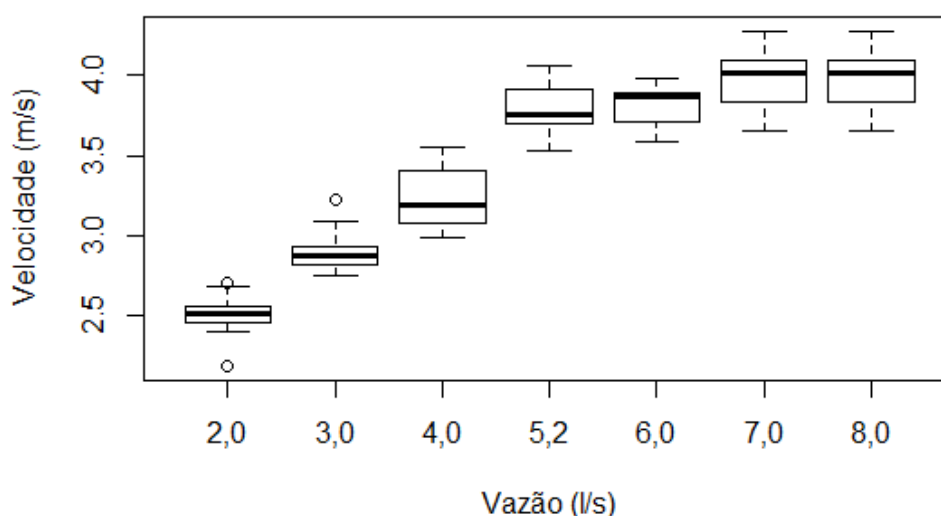


Figura 6.3: Distribuição de velocidades experimentais por vazão – Cenário 1.

Ainda, considerando a medição de maior interesse para vazão de referência ($Q=5,2$ l/s), levando-se em conta a necessidade de conferência nos cenários numéricos à frente, o valor de mediana não perfeitamente centrado foi aceito. Os intervalos de 3,57 m/s (mínimo) e 4,06 m/s (máximo) é pequeno o suficiente para optar-se por uma mediana praticamente centrada, sendo a mediana o valor tomado em pesquisas experimentais (OLIVEIRA, 1980).

Uma forma aproximada de se determinar a velocidade terminal de uma descida lisa nessa configuração é pelo método do passo padrão, através do cálculo das curvas no escoamento gradualmente variado. Trabalha-se com a declividade média da linha de energia (J) entre seções que tendem à mínima aproximação. Porém, existem erros associados a esse processo, como não distribuição hidrostática de pressões, causando correções do cosseno ao quadrado e a limitação geral do coeficiente de Manning para paramentos de até 10°. Assim, curvas adimensionais experimentais têm sido traçadas para cada configuração específica. Esse recurso funciona perfeitamente para inclinações maiores que 30° até 65° e com boa representação na faixa de transição de 10° até 30° (CHANSON, 2004; CHOW, 1985). Nesse sentido, a Figura 6.4 demonstra os dados experimentais associados aos dados complementares de Chanson (2004).

O fator de atrito de Darcy-Weisbach (f), seguindo a Equação 4.26 primária para vazão de referência, trabalhando com valor de profundidade no pé de aproximadamente 1,1 centímetro medida na análise pelo Kinovea, ou verificada pela velocidade mediana, foi de $f = 0,024$. Valor correspondente à realidade dos dados de outros autores, conforme visto na Figura 6.4.

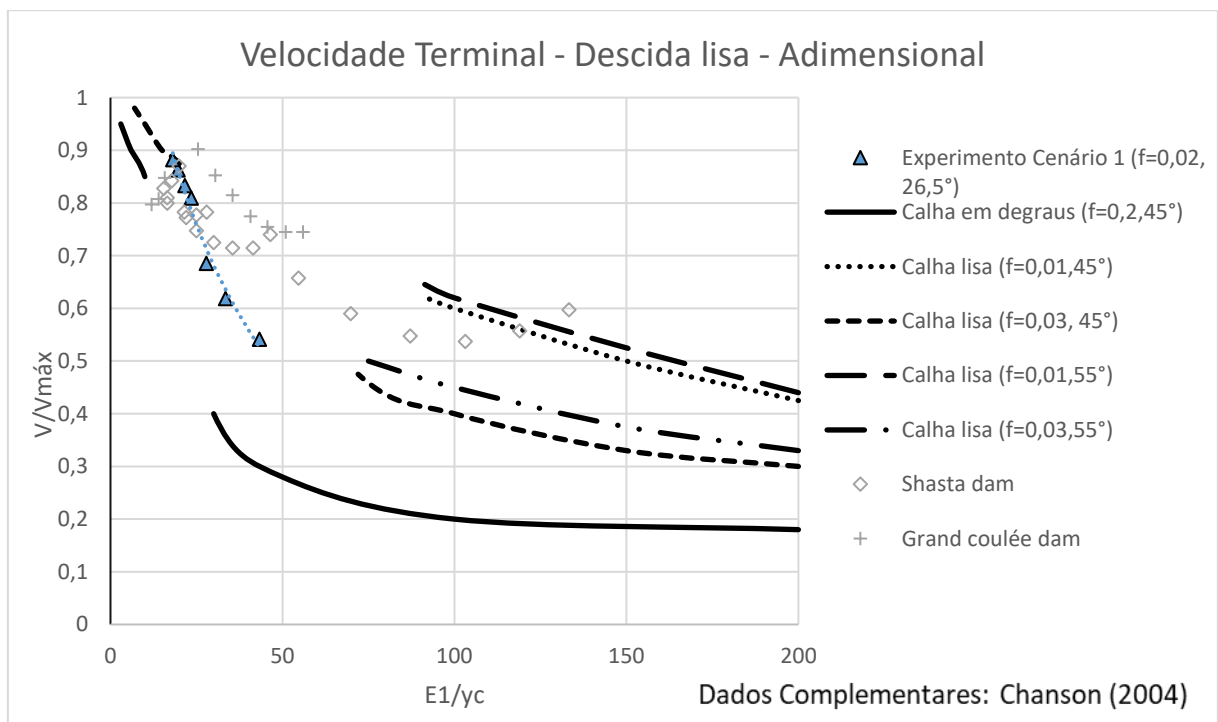


Figura 6.4: Curvas adimensionais da velocidade terminal – Cenário 1 modelo físico.

Apesar do valor da dissipação de energia no modelo ser função da vazão ensaiada, mesmo se considerando uma geometria fixa como demonstrou Dai Prá *et al.* (2016), deve-se buscar parâmetros comparativos dentro do domínio do ensaio. Uma vez que o escoamento nessas

estruturas, principalmente quando envolvendo degraus, é complexo e modelado matematicamente por faixas de aplicação, como mostrado na Figura 6.4. Nesse sentido, apenas para avaliar a dissipação de energia mínima nesta configuração, que será mais bem discutida à frente, para vazão de referência com a velocidade terminal respectiva e espessura de 1,1 centímetro medidos no pé e teórico direto a partir da mediana de velocidades, a Equação 4.27 traduz:

$$\frac{\Delta E}{E_m} = (E_m - E_p)/E_m = \frac{E_{m\acute{a}x} - E_{res}}{E_{m\acute{a}x}} = \frac{(1,1+1,5*0,05)-(0,01+\frac{3,76^2}{2*9,81})}{1,1+1,5*0,05} = 0,378$$

A dissipação frente à energia total disponível a montante, mesmo para uma estrutura lisa de acrílico, para vazão de referência é de 37,8% em relação à uma estrutura totalmente conservativa. O efeito de frenagem se deve ao atrito presente no perímetro hidráulico, aeração da massa líquida, melhor visualizada nos modelos numéricos seguintes e pequenas turbulências internas no escoamento (MEDHI *et al.*, 2019).

6.1.2 Modelo numérico 1 – MEF

O modelo numérico desenvolvido pelo *software* Autodesk® CFD, que trabalha com Método dos Elementos Finitos, para o Cenário 1, retornou para o refinamento de malha de 2 milímetros local e 8 milímetros global, conforme discutido no subitem 5.5.1.3 para metodologia da malha descrita, o resumo de Elementos apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Resumo de Elementos Finitos – Cenário 1.

Resumo de Elementos Finitos	
Total de Nós	Nós Fluidos
478064	478064
Total de Elementos	Elementos Fluidos
1429461	1429461

O volume de dados gerados pelo processamento via MEF foi consideravelmente superior ao modelo via MVF para os casos comparáveis, ou seja, Autodesk® CFD e OpenFOAM®. Para o processamento de 50 segundos, considerando o não enchimento da estrutura completa, apenas a caixa de distribuição de montante, foram suficientes para estabelecer o regime permanente na estrutura. Dessa forma, este modelo numérico 1, para o Cenário 1, gerou cerca de 8,2 gigabytes de dados.

Com relação a visualização dos resultados, antes do objetivo final de conferência das velocidades na entrada e saída, comparáveis às medições físicas, é interessante discutir o algoritmo de cálculo da superfície livre por meio do Método VOF. Como esperado, a incorporação de ar nesse cenário não é preponderante. A Figura 6.5 mostra a distribuição da fração líquido e ar nos elementos do domínio. Ou seja, o valor unitário indica preenchimento completo por água e, o valor nulo, total ocupação do elementos por ar, sendo 0,5 a interface de ar e água ideal da Equação 4.53 (AUTODESK®, 2019).

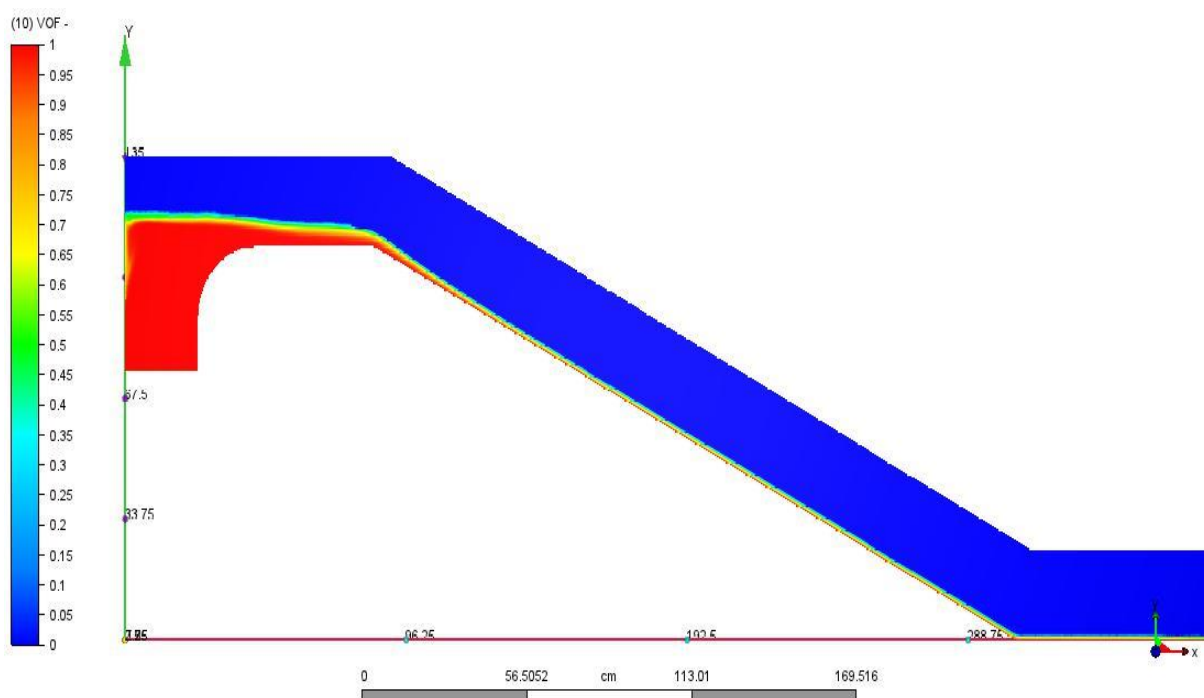


Figura 6.5: Modelo numérico 1 – Cenário 1 (VOF).

Uma vez que optou-se pelo modelo com dimensão reduzida, fino, de espessura de 1 centímetro, mas com elementos de 2 milímetros, ou seja 5 elementos de cálculo na direção da profundidade, a investigação da profundidade no pé foi realizada minuciosamente e ilustrada na Figura 6.6. A profundidade na interface, associada ao valor de VOF igual 0,5 é de aproximadamente 1 centímetro, fato que é compatível com a profundidade de 1,1 centímetros medida para vazão de referência no modelo físico ($Q=5,2$ l/s). Ainda, é possível observar a camada limite em cerca de 1 milímetro junto ao fundo, uma vez que as laterais não são sujeitas ao atrito, devido a condição de *slip symmetry*. A variação da variável, ainda que pequena neste cenário, da aeração é possível ser observada a partir da condição de VOF superior ao valor de 0,5 graficamente e visualmente, também pela Figura 6.6.

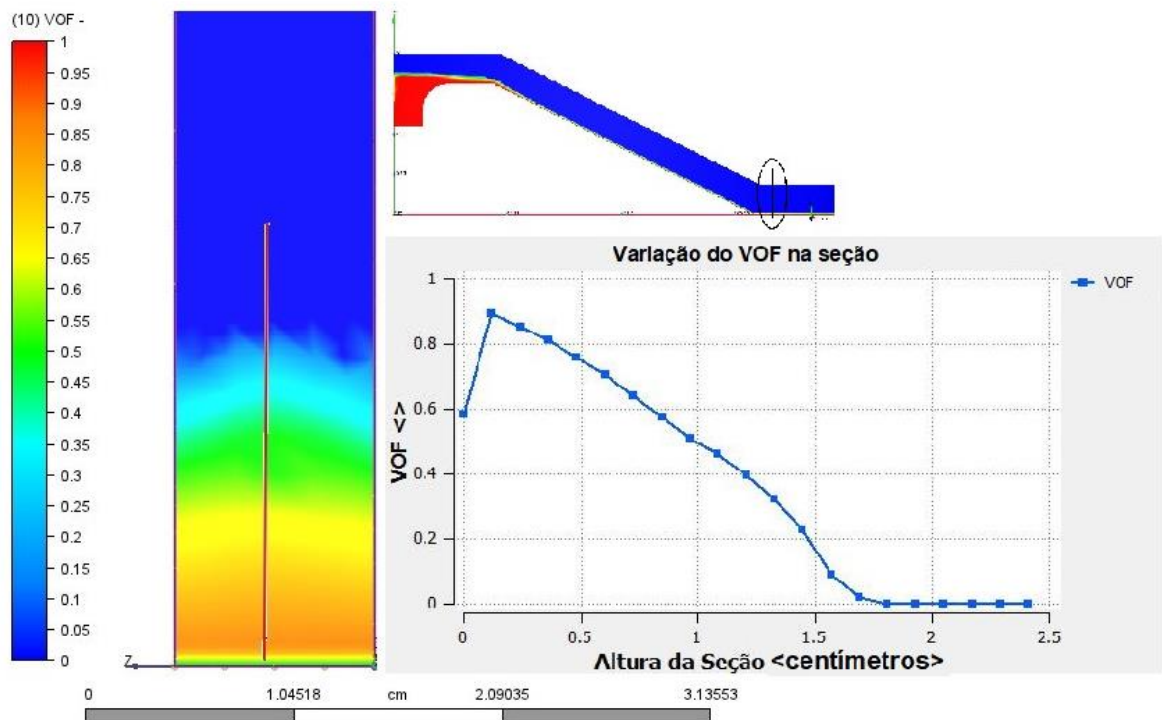


Figura 6.6: Seção no Pé – Modelo numérico 1 (Cenário1).

A extração do perfil de velocidades longitudinal da entrada é bastante compatível com os valores extraídos do modelo físico construído. Será percorrido graficamente ao final, com a reunião de todos os *softwares* pelos métodos propostos. Visualmente é possível uma análise prévia da grande compatibilidade dos valores na entrada neste cenário, por meio da Figura 6.7 comparada à Figura 6.1 de medição física. Ambos para vazão referenciada de projeto de 5,2 l/s.

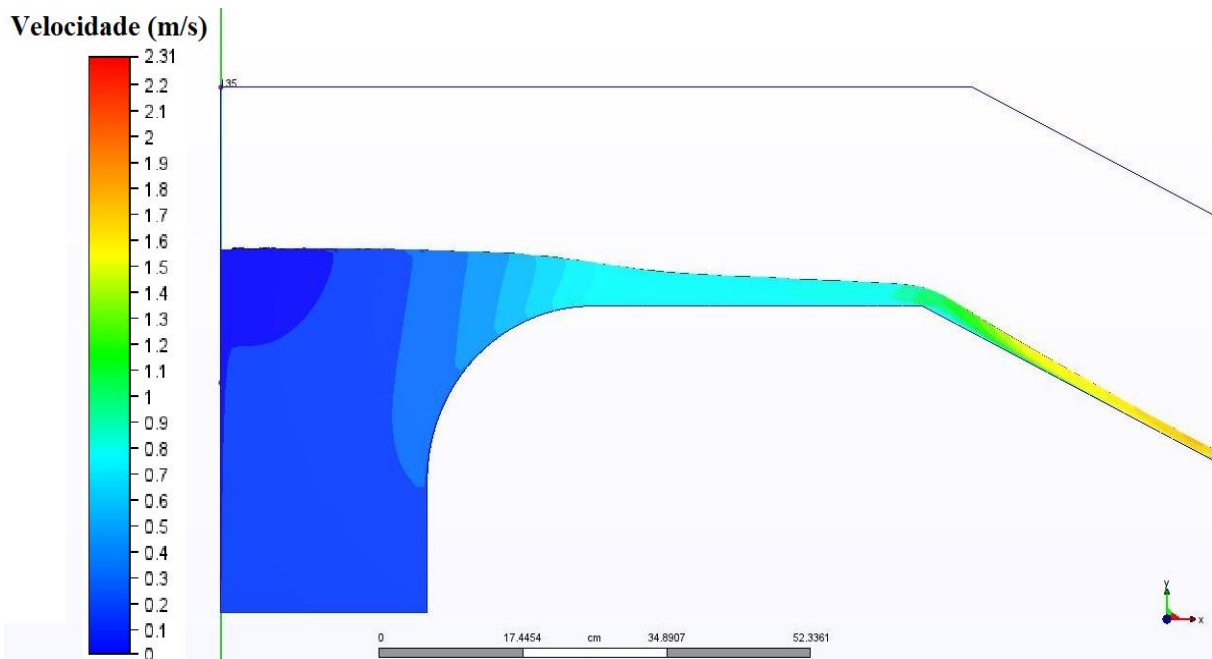


Figura 6.7: Perfil longitudinal de velocidades na entrada - Modelo numérico 1 (Cenário1).

O valor da velocidade constatado nessa simulação numérica, para o pé da descida lisa, foi de 3,48 m/s. Levando-se em conta a mediana das 15 medições físicas para vazão de 5,2 l/s, igual a 3,76 m/s, o parâmetro está com desvio de cerca de 7,4%.

A Figura 6.8 exibe o perfil final da linha d'água no pé, também bem representativo dos valores físicos da Figura 6.2. Claramente, são observáveis maiores deltas em relação ao campo de velocidade longitudinal físico, comparando-se a perfeita entrada regular, anteriormente discutida. Como indício para essas diferenças da saída, após a passagem pelo maior processo físico, está a temperatura da água, que não foi controlada nos dias de ensaio, fator que já diferencia a modelagem numérica com água constante a 20 °C, inserindo pequenos desvios na viscosidade do fluido, por exemplo. O mesmo raciocínio se aplica ao ar atmosférico, presente na atmosfera do domínio.

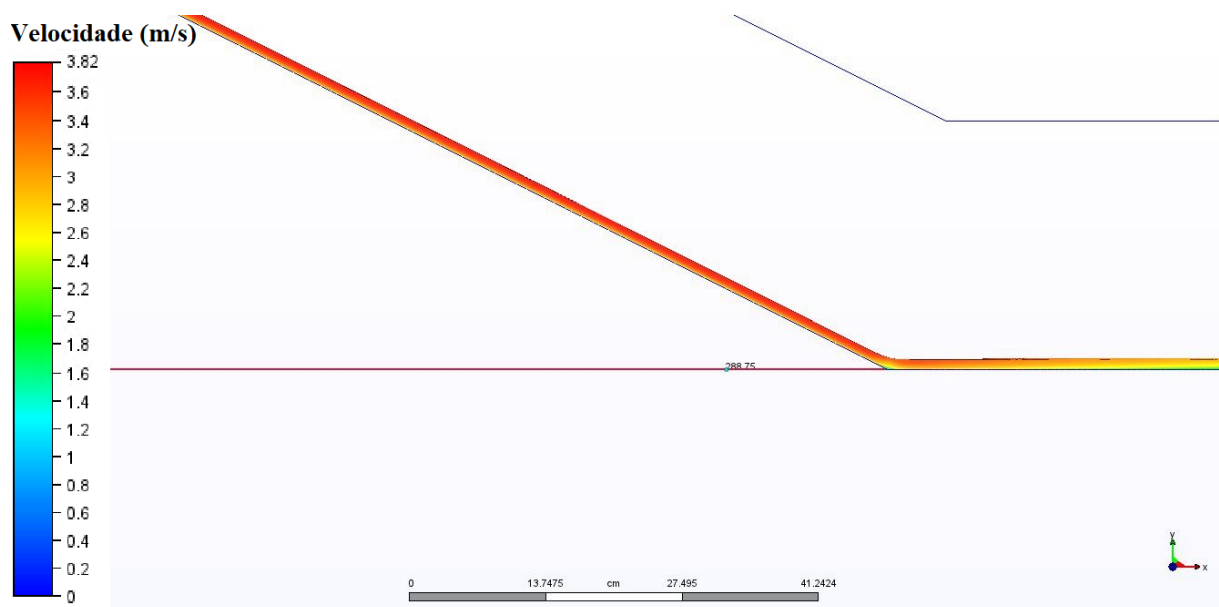


Figura 6.8: Perfil longitudinal de velocidades na saída - Modelo numérico 1 (Cenário1).

6.1.3 Modelo numérico 2 – MVF

Por meio do modelo numérico 2, desenvolvido no *software* OpenFOAM®, através do método de cálculo de discretização do domínio por volumes finitos, foi possível o processamento do Cenário 1. Embora ambos os dois *softwares*, até aqui discutidos, terem trabalhado com a geometria de uma estrutura fina, “fatiada”, como já citado, o presente modelo desenvolveu a direção da profundidade com apenas um volume finito de cálculo. Ou seja, tratou-se com cubos de 2 milímetros locais e 8 milímetros globais também para o refinamento, como no programa anterior, mas com uma única cadeia de volumes na profundidade. Essa “otimização” da malha por meio do MVF é possível graças a estabilidade numérica alcançada pela geometria, uma vez comparada a maior dificuldade dos tetraedros do MEF. Portanto, o valor total de células foi de 213044 volumes finitos “cúbicos”, ao custo de 1,2 gigabytes total do processamento até a condição permanente.

O fato é bastante razoável, principalmente considerando o menor esforço com a diminuição de cinco paredes concatenadas na profundidade, além das questões geométricas primárias. Células cúbicas de 2 milímetros ocupam mais espaço que tetraedros com mesmo tamanho, mais um fator para diminuição dos volumes finitos para um mesmo domínio. Ressalva-se que nem sempre essa “otimização” será benéfica, existem geometrias que precisam do refinamento da triangulação por tetraedros, incapaz de ser alcançado pelos cubos.

Para este programa, o método de cálculo da superfície livre, VOF, é chamado como *alpha.water*. Constitui-se exatamente como explicado no subitem da Equação 4.53. Os perfis longitudinais de entrada são bastante próximos, como será demonstrado graficamente à frente, bem como as profundidades. A Figura 6.9 exhibe a variável VOF para o escoamento neste cenário, nota-se a conformação na entrada visualmente próxima das Figura 6.7 e Figura 6.5 numéricas, além da Figura 6.1 física.

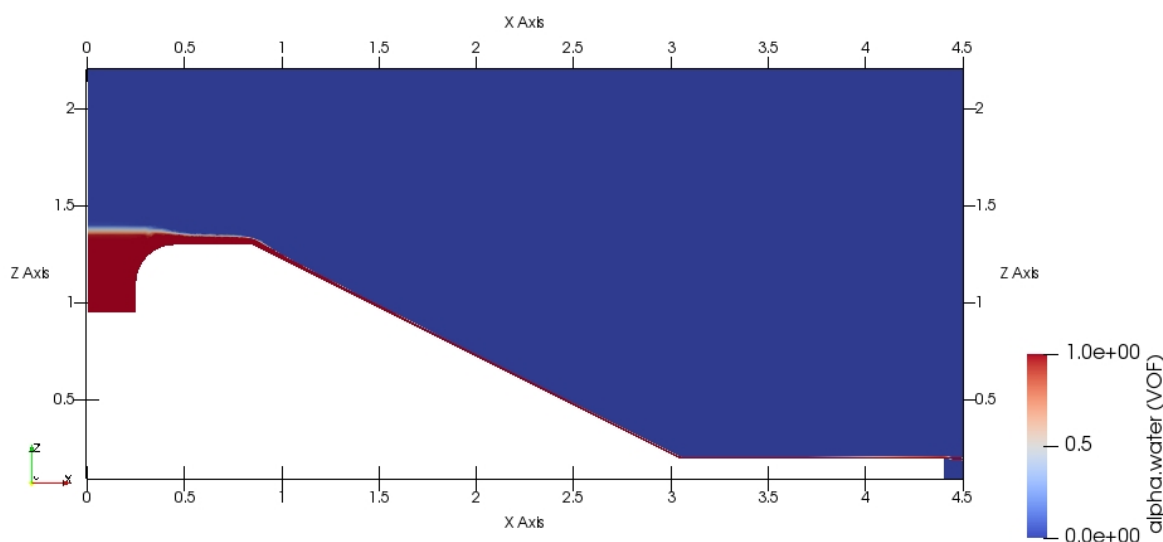


Figura 6.9: Modelo numérico 2 – Cenário 1 (VOF).

De forma inicial, este modelo apresentou melhor condição bifásica do escoamento. Essa discussão será mais bem tratada no Cenário 2, conforme a geometria dos degraus causou maior esforço para incorporação de ar no escoamento. Sendo este Cenário 1 necessário ao criar uma condição de controle menos morosa e desgastante, do ponto de vista numérico. Por meio da Figura 6.10 é possível observar o campo de velocidades longitudinal no escoamento. Nota-se a presença do arrasto do ar causada pelo líquido, cada vez mais progressivo na altura, racionalmente correta pela maior velocidade do fluido.

Importante salientar que, conforme Equação 4.53, o equacionamento de captura da superfície livre por meio do método VOF para maioria dos modelos numéricos, inclusive os desenvolvidos neste estudo, determina a faixa possível dessa variável de 0 até 1. Na medida em que zero representa o volume/elemento de controle completamente preenchido por ar e 1 a total ocupação por fluido (água neste caso). Sendo a metade, 0,5, o valor de referência para a interface de ar e água, superfície do fluido (AUTODESK®, 2019).

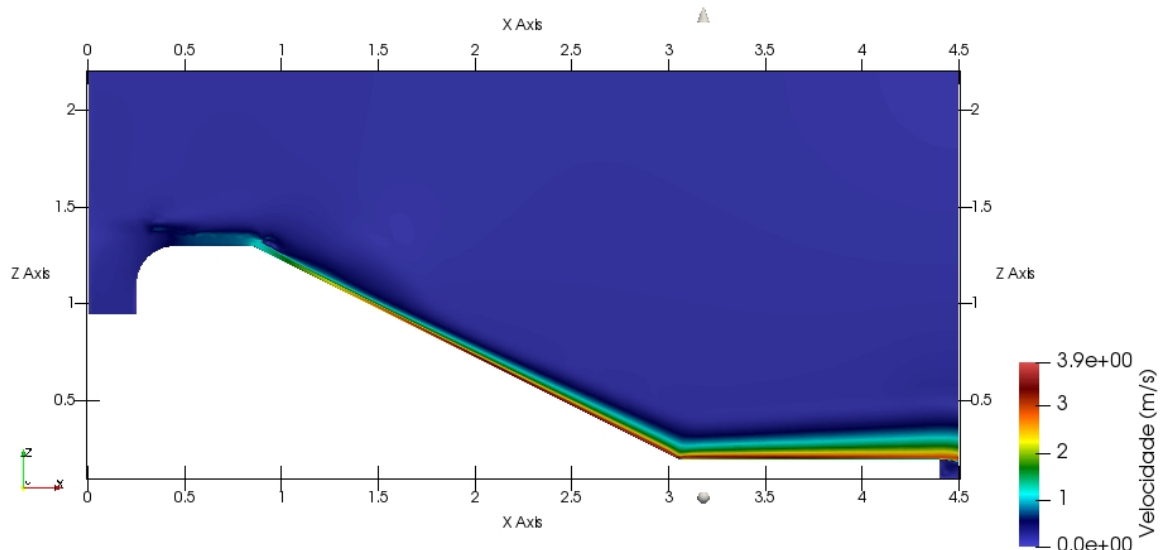


Figura 6.10: Perfil longitudinal de velocidades - Modelo numérico 2 (Cenário1).

Como a avaliação dos resultados em um modelo numérico deve-se pautar por um estudo minucioso das variáveis, ou seja, caso seja possível avaliação gráfica fina, a Figura 6.10 mostrou uma seção no pé da estrutura. Portanto, graficamente a Figura 6.11 demonstra os resultados das variáveis de velocidade e VOF.

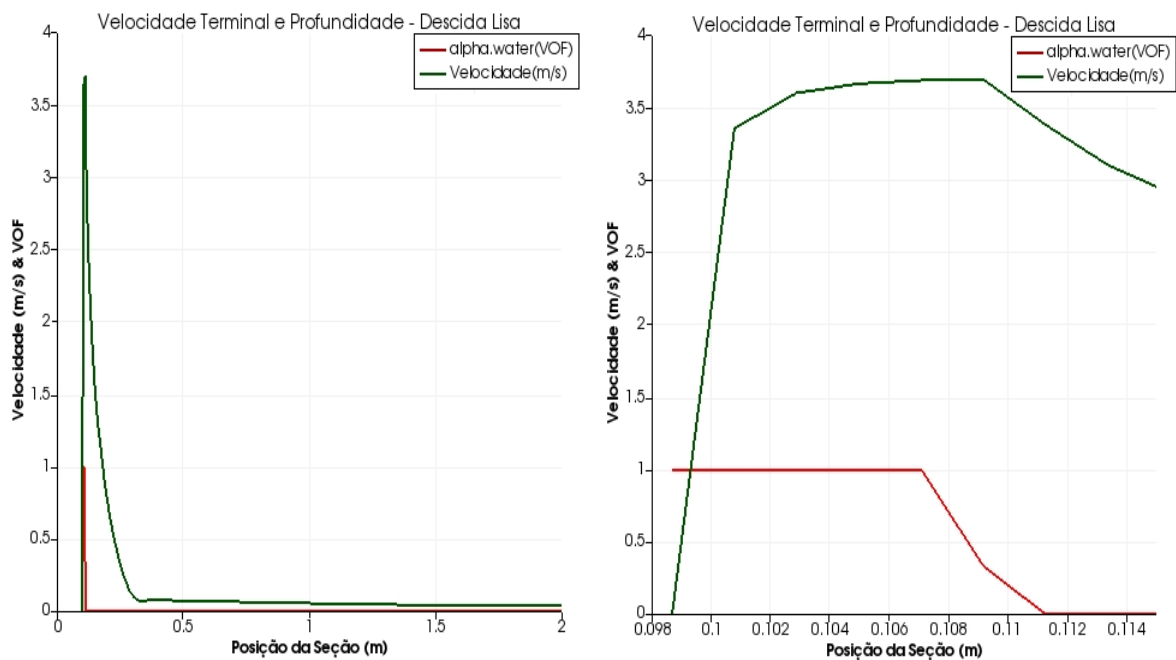


Figura 6.11: Gráfico de velocidade e VOF na seção do pé – Modelo numérico 2 (Cenário1).

Dessa forma, a Figura 6.11 mostra os resultados gráficos que são apresentados para seção toda (esquerda) e focados na dimensão da lâmina (direita). Pela análise de VOF no valor de 0,5, indicador da superfície do fluido (encontro das fases água e ar), é possível estabelecer a

velocidade em 3,69 m/s no pé. Com relação a dimensão da lâmina de escoamento, nota-se a variação de VOF unitário até 0,5, valor da interface ar e água (BENTALHA e HABI, 2019), que retorna a dimensão de 1,1 centímetros de água no pé. Portanto, essa profundidade encontrada de 1,1 centímetro está de acordo com a medição física e numérica anterior, sendo 1,1 e 1 centímetros, respectivamente. Ou seja, para este caso a partir do gráfico ampliado (direito):

$$0,109 - 0,098 = 0,011 \text{ metros ou } 1,1 \text{ centímetro}$$

Como curiosidade, é possível observar no gráfico global (esquerdo), ainda da Figura 6.11, o ramo da curva de velocidade responsável pelo arrasto do ar para a variável VOF nula, ou seja, preenchimento completo dos volumes finitos do domínio por ar.

6.1.4 Modelo numérico 3 –MVF

O modelo numérico 3, calculado por meio do *software* FLOW-3D®, teve a malha cúbica nas dimensões especificadas no subitem 5.5.3.3. Assim, os volumes finitos apresentaram 5 milímetros de dimensões a partir dos testes e da ferramenta de conferência da malha (*pré-check*). Toda espessura de 15 centímetros do modelo físico foi perfeitamente representada na geometria. O processamento alcançou 25 gigabytes de dados para 3,2 milhões de células (volumes finitos).

O presente programa permite a visualização direta das frações de ar dissolvidas na massa líquida de diversas formas. O algoritmo de cálculo do FLOW-3D® utiliza o método VOF, denominado TruVOF, como enunciado no subitem 4.3.4. Trata-se de recursos poderosos para previsão da aeração direta da massa de fluido. Nesse sentido, a Figura 6.12 apresenta a fração em volume de entrada de ar. Notável observar que à medida que o escoamento se processa existe uma razoável incorporação de ar, chegando-se aos valores da ordem de 45% superficial no pé.

Os resultados pelo FLOW-3D®, através da modelagem tridimensional completa, demonstram a condição ideal de representação do escoamento na estrutura. Contudo, devido às limitações de recursos computacionais desta pesquisa, as investigações via MEF e MVF foram realizadas pelos dois *softwares*, apresentados anteriormente, de forma simplificada bidimensional e tridimensional fina. Portanto, os resultados do modelo tridimensional completo são apenas exploratórios neste estudo, não sendo comparado em nenhum cenário.

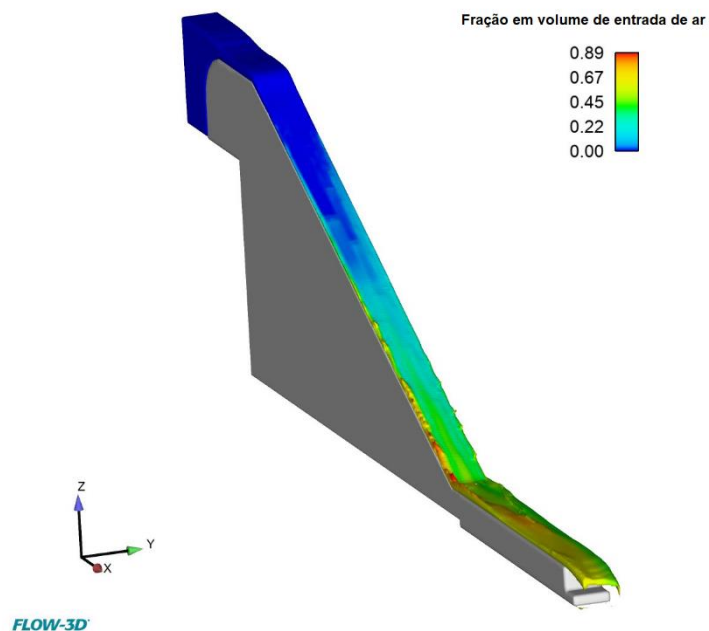


Figura 6.12: Modelo numérico 3 – Cenário 1 (Entrada de ar em percentual de volume).

Na sequência, a Figura 6.13 mostra o campo de velocidades tridimensional deste modelo para o Cenário 1. Através de um ponto de controle no pé da estrutura (*Probe*) é possível acompanhar as velocidades instantâneas no local, portanto, é razoável o resultado das flutuações próximas a mediana experimental. Os valores próximos de zero indicam um possível melhor refinamento para malha.

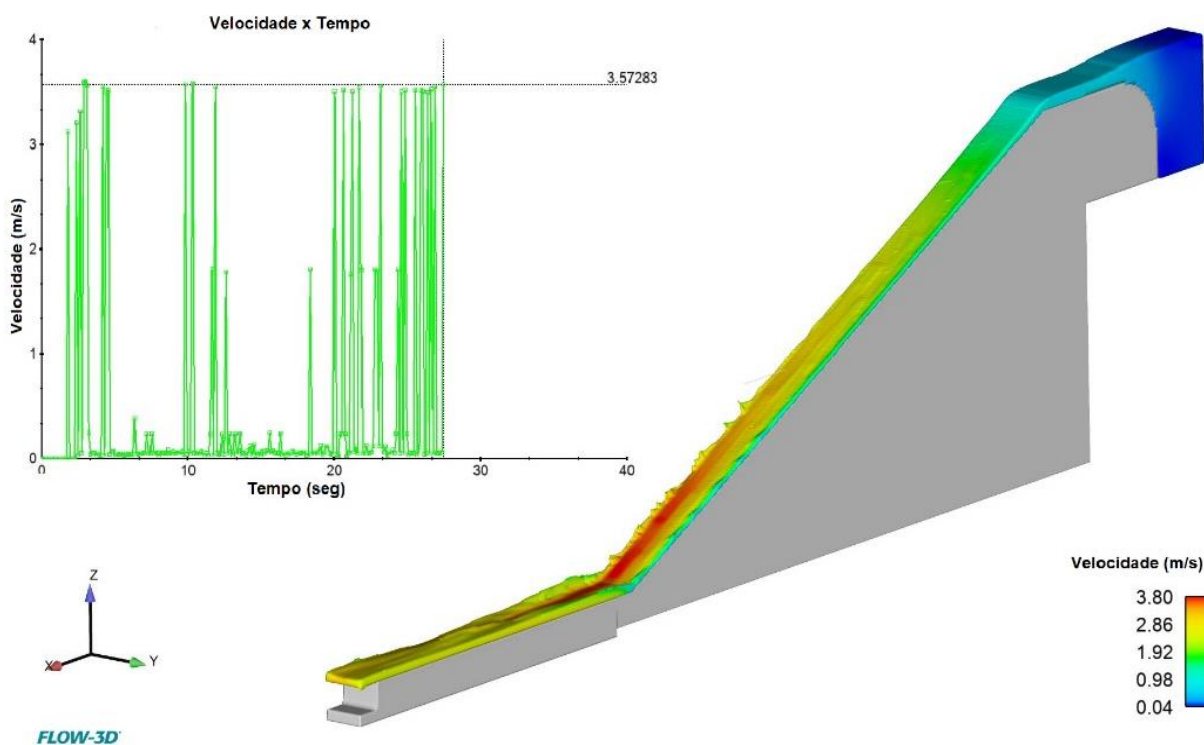


Figura 6.13: Campo velocidades tridimensionais - Modelo numérico 3 (Cenário1).

Salienta-se que o primeiro teste com 10 milhões de células alcançou mais de 80 gigabytes de cálculo, torando o resultado da Figura 6.13 o melhor alcançado neste estudo para este referido *software*.

De forma adicional, como um detalhe curioso também observado na modelagem numérica tridimensional, é possível verificar o mesmo levantamento juntos às paredes do canal na região do pé da descida lisa, como ilustra a Figura 6.14.

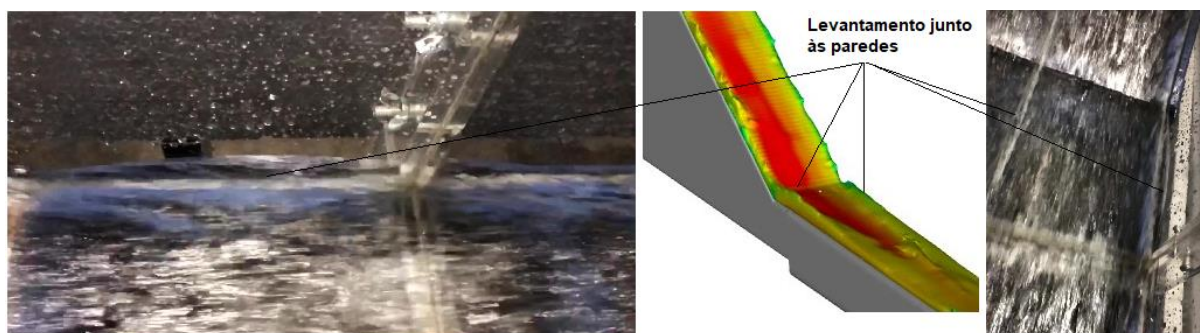


Figura 6.14: Detalhe físico e numérico do levantamento do escoamento juntos às paredes no pé - Modelo numérico 3 (Cenário1).

Salienta-se que a melhor condição de simulação para o escoamento seria na forma tridimensional completa. Porém, devido às limitações de recursos computacionais para essa pesquisa, executou-se a comparação entre o MEF e MVF por meio dos *softwares* Autodesk® CFD e OpenFOAM®, que trabalharam o problema de forma simplificada “bidimensional”. Contudo, como demonstração da melhor condição de simulação tridimensional, apenas para esse cenário da descida de água lisa, o programa FLOW-3D® foi escolhido para apresentação exploratória de resultados.

6.1.5 Perfis longitudinais da entrada

Conforme a extração de dados do modelo físico segue um eixo cartesiano previamente referenciado, e, ainda, todos os modelos numéricos tiveram seus projetos em um sistema também cartesiano, foi possível adquirir posições (x,y) associadas às suas respectivas velocidades. Apenas o cuidado de transformação de coordenadas foi necessário para se comparar pontos iguais no espaço. Como esperado, a regularidade de velocidades na entrada é bastante grande (Figura 6.15).

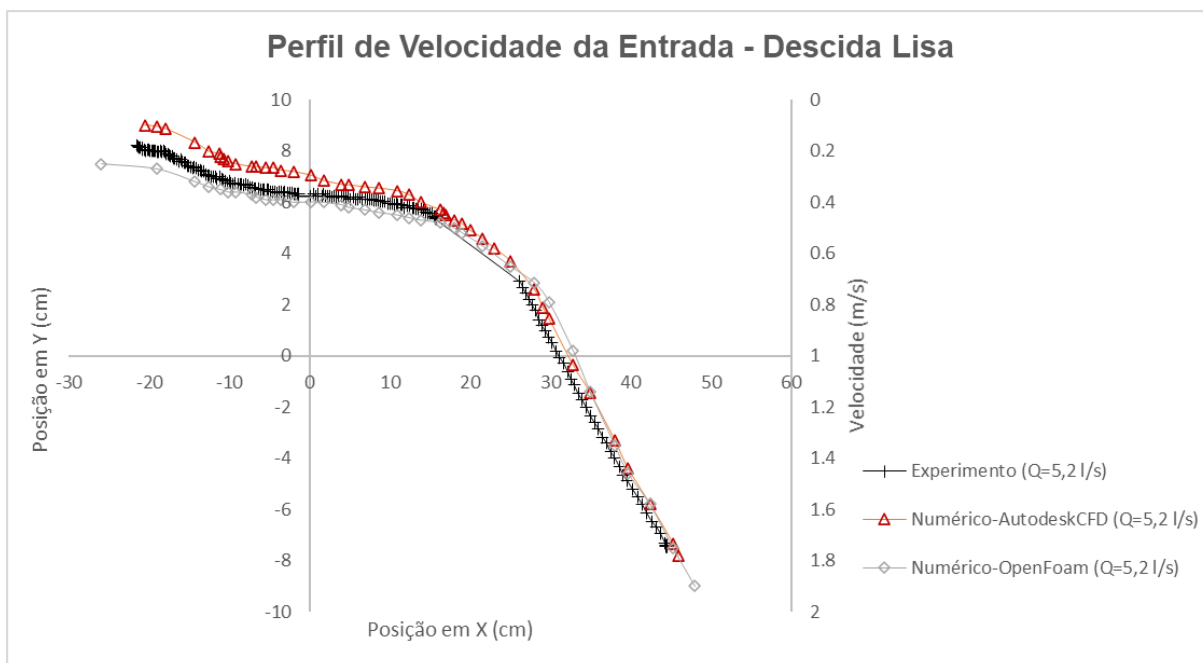


Figura 6.15: Perfis gráficos longitudinais das velocidades na entrada - Cenário1.

6.2 Cenário 2

6.2.1 Modelo físico reduzido

Os ensaios para extração das velocidades e níveis d'água para configuração do Cenário 2, descida hidráulica em degraus com bacia sem a plataforma adaptativa, constando de 22 degraus, foram realizados conforme Tabela 6.4. Como existe maior variabilidade, devido às características próprias do escoamento em degraus, o número de medições foi elevado para 27 no pé da estrutura por vazão, e, também, 9 para entrada da estrutura.

Tabela 6.4: Bateria de ensaios – Cenário 2.

Vazões (l/s)	Ensaio			
	06/02/2020	19/12/2019	26/12/2019	07/01/2020
	Nº de medições na Entrada	Nº de medições no Pé	Nº de medições no Pé	Nº de medições no Pé
2	9	9	9	9
3	9	9	9	9
4	9	9	9	9
5,2	9	9	9	9
6	9	9	9	9
7	9	9	9	9
8	9	9	9	9
TOTAL POR VAZÃO:		9 Entrada e 27 no Pé		

De forma equivalente ao cenário anterior, o perfil de velocidades na entrada não é muito variável entre medições, como será também mostrado à frente. A vazão de referência, já discutida, determinante dos valores de dimensionamento dessas estruturas, também foi fixada em 5,2 l/s. A Figura 6.16 exhibe a trajetória do flutuador na entrada da descida em degraus para vazão de referência de 5,2 l/s, a ilustração traz uma forma mais qualitativa de enxergar o campo de velocidades nessa parte da estrutura. Portanto, através dessa visualização do modelo físico reduzido é possível compará-lo aos campos numéricos respectivos que serão discutidos à frente.



Figura 6.16: Perfil longitudinal de velocidade na entrada do Cenário 2 ($Q=5,2\text{l/s}$).

No mesmo sentido da estrutura de comparação física e numérica, a velocidade final após a passagem por todos os degraus, será verificada na seção de pé da descida hidráulica. Como a variabilidade das medições é maior, devido aos complexos processos de aeração, optou-se pelo maior número de medidas. Ou seja, para cada vazão ensaiada, 27 medições em 3 dias diferentes foram realizadas na configuração do Cenário 2. A Figura 6.17 exhibe o referido perfil e condições.

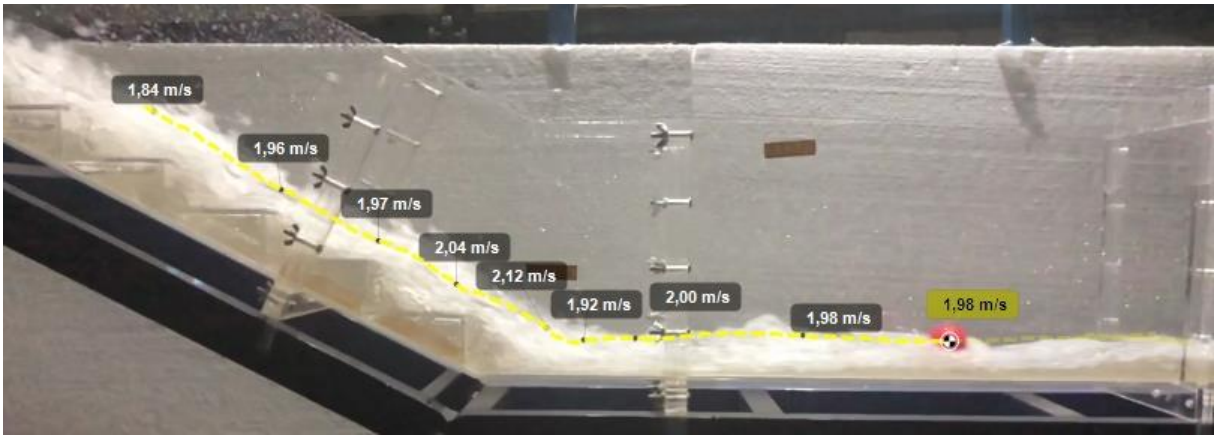


Figura 6.17: Perfil longitudinal de velocidade na seção de saída do Cenário 2 ($Q=5,2\text{l/s}$).

O *software* de tratamento, Kinovea, permite a extração de cada ponto associado à velocidade ao longo de toda saída, porém, só foram analisadas as velocidades na seção de pé da saída. Para visualização das distribuições das medições experimentais de velocidade, a Figura 6.18 exibe os diagramas de *box-plots* que contam com 27 medições cada. Nota-se a maior centralidade das medianas em relação ao cenário anterior, uma vez que se aumentou quase ao dobro o número de medidas. Mesmo se considerada maior variabilidade deste cenário em degraus.

Os valores mínimos e máximos são 1,84 m/s e 2,2 m/s, respectivamente, para velocidade final da vazão de referência ($Q= 5,2 \text{ l/s}$). O valor da mediana encontrado foi de 1,98 m/s, em contrapartida o valor teórico de referência é de 1,91 m/s, ou seja, o intervalo de análise é pequeno suficiente para aceitar o resultado para comparações numéricas à frente.

Velocidades Terminais Experimentais - Descida em Degraus

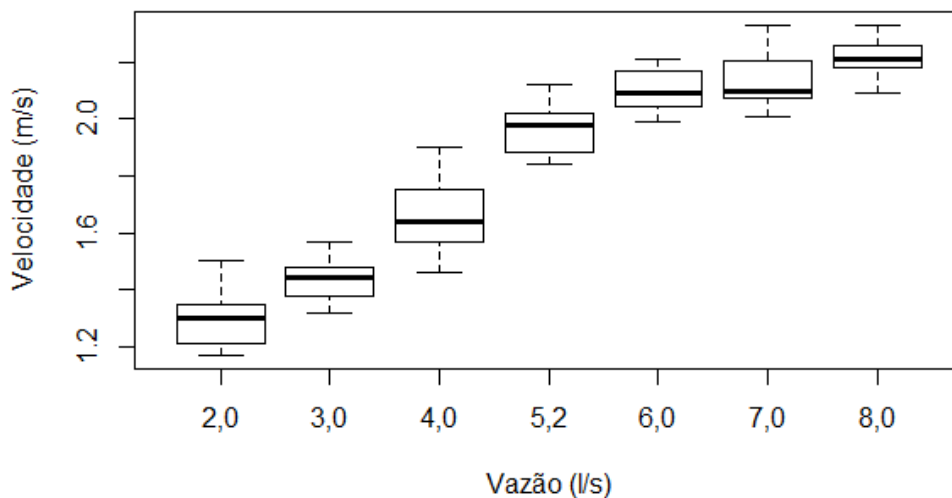


Figura 6.18: Distribuição das velocidades experimentais por vazão – Cenário 2.

Com a finalidade de comparar os resultados com outros autores, a Tabela 6.5 apresenta de forma resumida os valores das velocidades experimentais medianas e previsões de velocidades calculadas por outras equações da literatura. Os dados completos por vazão, gerados pela análise de filmagem, estão disponíveis no Apêndice II.

Tabela 6.5: Velocidades terminais experimentais e Velocidades terminais calculadas – Cenário 2.

Vazão (l/s)	Velocidade experimental valor Mediano (m/s)	Velocidade Calculada por equação (m/s)	Diferença (%)	Autor(es) / Equação
2	1,3	1,22	6,6	Chanson (2002) Eq. 4.29
3	1,44	1,41	2,1	
4	1,64	1,57	4,5	
5,2	1,98	1,91	3,7	Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004) Eq 4.24 e 4.31 - SisCCooH
6	2,09	2	4,5	
7	2,1	2,11	0,47	
8	2,21	2,205	0,23	

As previsões teóricas da tabela anterior foram realizadas por trabalhos relevantes, dada grande variabilidade das metodologias disponíveis para determinação da velocidade de pé nessas estruturas.

O trabalho de Chanson (2002) permitiu a determinação de velocidades para os regimes não deslizantes sobre turbilhões, ou seja, quedas sucessivas e transição. Portanto, a Equação 4.29, extraída de Chanson (2002), estima a energia residual, fato que possibilitou a previsão teórica dessa faixa de velocidades. Para o regime de transição, aplicando-se o método de cálculo do regime deslizante, é possível chegar a valores muito próximos das previsões teóricas.

O trabalho de Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004), referência do algoritmo de cálculo para o escoamento em degraus do programa SisCCoh, foi desenvolvido em um fluxograma de condições. Assim, como não é possível transcrevê-lo na literalidade, as Equações principais são 4.24 e 4.31, respectivamente. A primeira consiste na determinação do fator de atrito de Darcy-Weisbach (f) da estrutura, determinado como 0,1744 para o presente trabalho. Já a segunda equação permite determinar a velocidade final a partir da profundidade representativa de água no pé (d_w).

Por fim, com intuito de contextualizar os valores encontradas no modelo físico reduzido para esta configuração, Cenário 2, a Figura 6.19 apresenta a curva adimensional de velocidade final experimental associada aos dados de Chanson (2015).

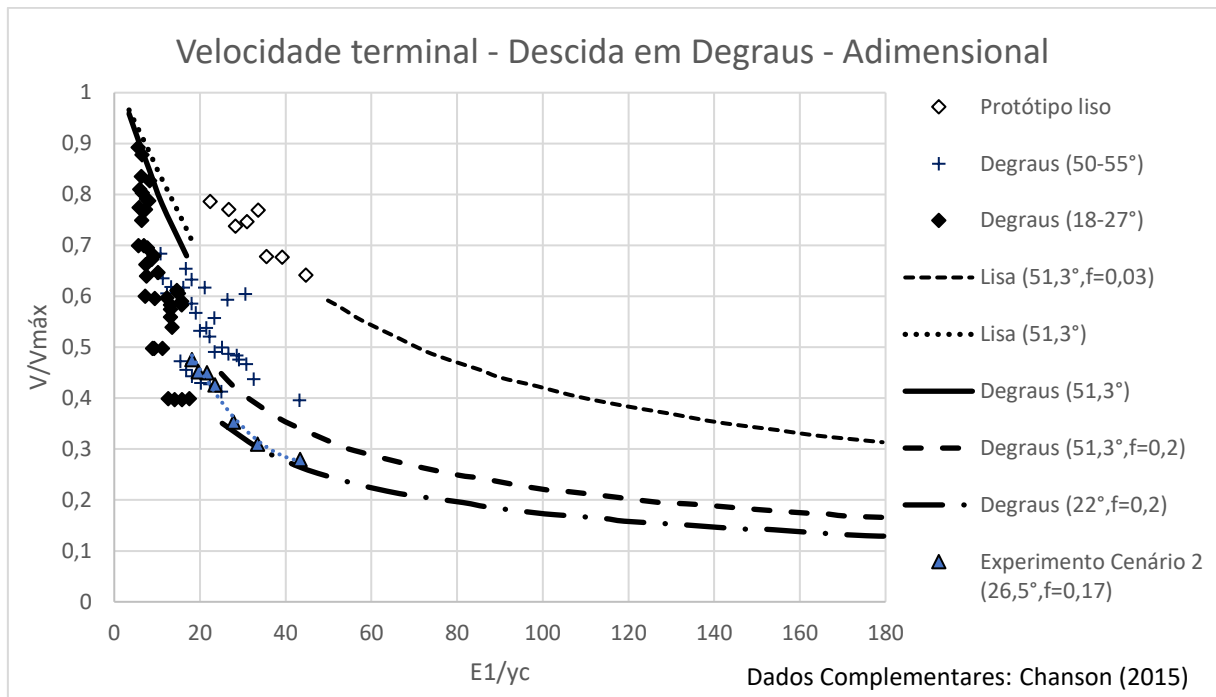


Figura 6.19: Curvas adimensionais da velocidade terminal – Cenário 2 (Modelo Físico).

Como efeito prático de projeto, é pertinente avaliar a capacidade de dissipação de energia dessa descida em degraus. A vazão escolhida será a de referência, como essa é utilizada no dimensionamento hidráulico, regime deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*). De acordo com Dai Prá *et al.* (2016), a Equação 4.27, que avalia a variação de energia dissipada frente à energia total disponível a montante gera:

$$\frac{\Delta E}{E_m} = (E_m - E_p)/E_m = \frac{E_{m\acute{a}x} - E_{res}}{E_{m\acute{a}x}} = \frac{(1,1+1,5*0,05)-(0,018227+\frac{1,98^2}{2*9,81})}{1,1+1,5*0,05} = 0,8821$$

A dissipação frente à energia total disponível a montante, para estrutura na configuração do Cenário 2, é de 88,2%. O valor está na faixa de variação do trabalho de Dai Prá *et al.* (2016), que situa-se entre 27% e 90%, dependendo da vazão ensaiada. Já pelo trabalho de Sanagiotto (2003) a relação $\frac{\Delta E}{E_m}$ é de aproximadamente 0,82. Também compatível com valor encontrado.

Um outro balizador da eficiência da descida como dissipador, é proposto por Dai Prá *et al.* (2016). Trata-se da dissipação de energia na estrutura em degraus frente à estrutura lisa, ou seja,

a Equação 4.27 terá $E_{m\acute{a}x}$ alterado para um valor representativo da energia na calha lisa, denominado E' pelos autores. Assim,

$$\frac{\Delta E}{E'} = (E' - E_p)/E' = \frac{E' - E_{res}}{E'} = \frac{(0,01 + \frac{3,76^2}{2 \cdot 9,81}) - (0,018227 + \frac{1,98^2}{2 \cdot 9,81})}{(0,01 + \frac{3,76^2}{2 \cdot 9,81})} = 0,7015$$

Portanto, a estrutura em degraus de fato é altamente eficiente como dissipador. Comparando a vazão de projeto, referência da estrutura lisa e em degraus nos Cenários 1 e 2, respectivamente, a estrutura com os degraus de 5 centímetros na escala 1:10 do modelo reduzido, dissipou 70,1% mais energia do que a descida de água lisa. O valor está de acordo com a previsão do trabalho de Sanagiotto (2003), para relação da carga geométrica disponível igual a 1,1 metros pela profundidade crítica de 5 centímetros, nestas condições, a relação de $\frac{\Delta E}{E'}$ é de aproximadamente 0,72 para degraus de 5 centímetros de altura.

6.2.2 Modelo numérico 1 – MEF

Para este cenário, o modelo numérico desenvolvido no *software* Autodesk® CFD, foi inicialmente processado com a malha discutida no subitem 5.5.1.3. Trata-se da mesma dimensão global de 8 milímetros e 2 milímetros locais. Porém, devido à complexidade do escoamento altamente aerado e maior superfície de região localmente refinada, comparando-se ao caso liso, característico do caso em degraus, o volume gerado ultrapassava 25 gigabytes de dados. Assim, tornou-se insuficiente a capacidade de processamento disponível para esta pesquisa. Não era possível tratar ou trabalhar com modelos acima de 20 gigabytes. Para resolver tal questão, e manter o refinamento já discutido, adotou-se a solução do trabalho de Tassinari *et al.* (2020), ou seja, diminuir a espessura ainda mais do modelo. Como tratava-se de 1 centímetro de espessura geométrica anteriormente, mas com menor elemento finito de 2 milímetros, para adequar-se ao caso totalmente bidimensional, trabalhou-se com uma geometria de 2 milímetros de espessura. Com essa adaptação racional explicada, foi possível processar o caso com um volume de dados de 10,5 gigabytes final. A Tabela 6.6 demonstra a saída do programa para os elementos finitos do domínio.

Tabela 6.6: Resumo de Elementos Finitos – Cenário 2

Resumo de Elementos Finitos	
Total de Nós	Nós Fluidos
1018497	1018497
Total de Elementos	Elementos Fluidos
2915468	2915468

O nível de representatividade deste *software*, trabalhando com método dos elementos finitos, foi bastante fragmentada para variável principal para esse escoamento, VOF. A Figura 6.20 exhibe a configuração da mistura de ar e água. Autodesk® (2019) introduz alguma dificuldade da representatividade de dispersão alta de ar no fluido, como efeitos de pulverização (*spray*).

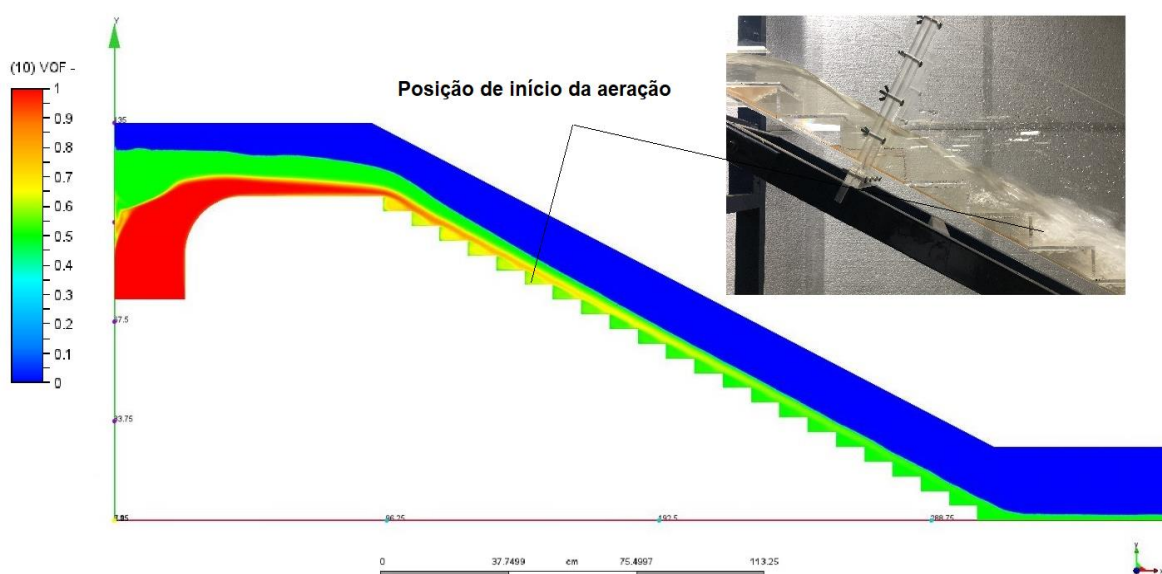


Figura 6.20: Modelo numérico 1 – Cenário 2 (VOF).

Ainda, a partir da análise da linha d'água da Figura 6.20, é possível depreender que a posição de início da aeração coincide com o modelo físico reduzido no sexto degrau para vazão de referência ($Q=5,2$ l/s). Notou-se também, que deixando a simulação atingir os 50 segundos, ou seja, acima de 30 segundos suficientes para o regime permanente, o perfil de entrada para interface de ar e água, $VOF = 0,5$, começa apresentar discordância. Por fim, o Método dos Elementos Finitos, por meio deste programa não alcançou boa representatividade da mistura bifásica, com processamento e malha disponíveis, principalmente quando comparada ao Método dos Volumes Finitos, como será demonstrado no subitem seguinte.

Para subsidiar as informações do VOF discutidas e manter-se a sequência de comparação com subitem 6.1.2, referente ao caso liso, a Figura 6.21 demonstra a má representatividade da

mistura de ar e água no pé. Percebe-se que toda fração da mistura ocupa o valor de VOF igual a 0,5, interface de ar e água. Porém, como a profundidade teórica de pé neste caso é de cerca de 1,83 centímetros (Equação 4.31), o valor próximo a 2 centímetros para o VOF de 0,5 é razoável.

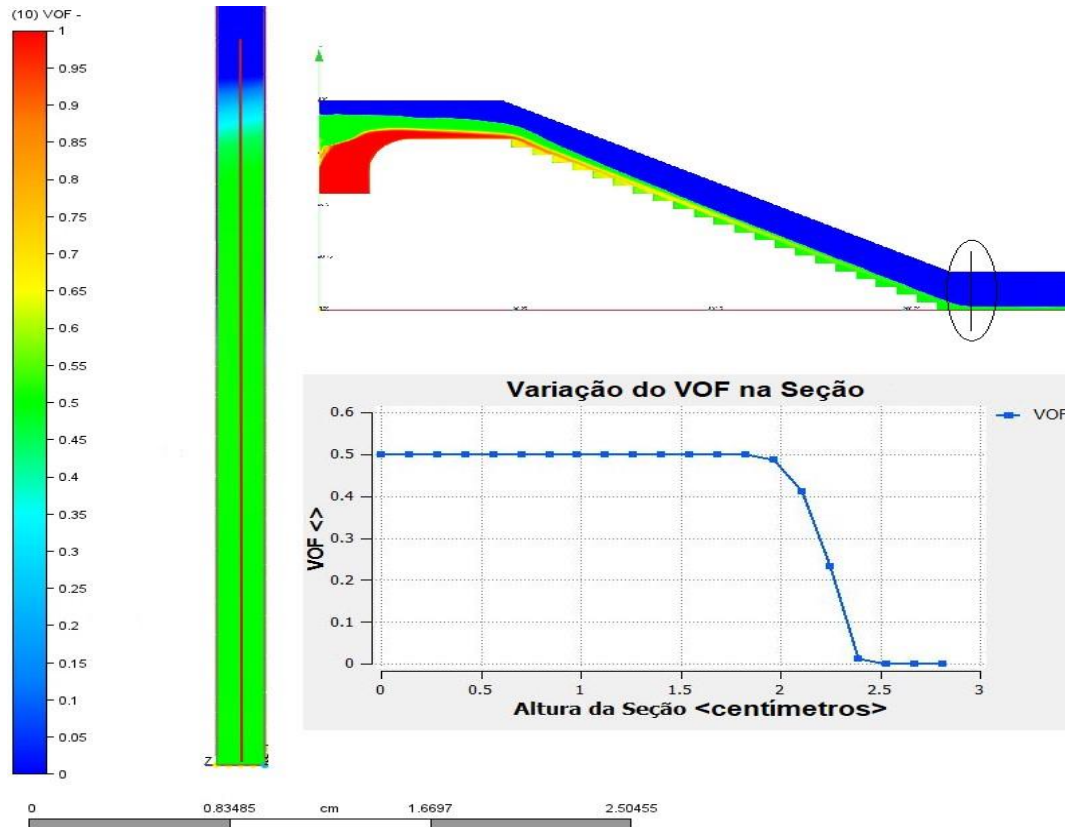


Figura 6.21: Seção no Pé – Modelo numérico 1 (Cenário 2).

Casos de interferências pontuais propagarem erros para toda malha de cálculo são discutidos por Versteeg e Malalasekera (2007), Ferziger e Peric (2002) e Moukalled, Mangani e Darwish (2015). Dessa forma, a simulação deste cenário com este programa começou a propagar os problemas na condição altamente bifásica do escoamento para o restante do domínio, por meio do VOF. O perfil de entrada para os 50 segundos não é o mesmo para os 30 segundos de simulação, nos quais o regime permanente já foi notado por não variação da profundidade final e velocidade. A Figura 6.22 mostra o perfil de entrada com o campo de velocidades mais alinhado à realidade física da Figura 6.16. Através do campo de isolinhas de velocidade é possível visualizar a formação dos vórtices de recirculação no sexto degrau, também indo ao encontro da posição de início da aeração com formação do regime deslizante sobre turbilhões para vazão de referência ensaiada. Ainda, a Figura 6.22 está bem apoiada aos valores do perfil físico encontrado na Figura 6.16.

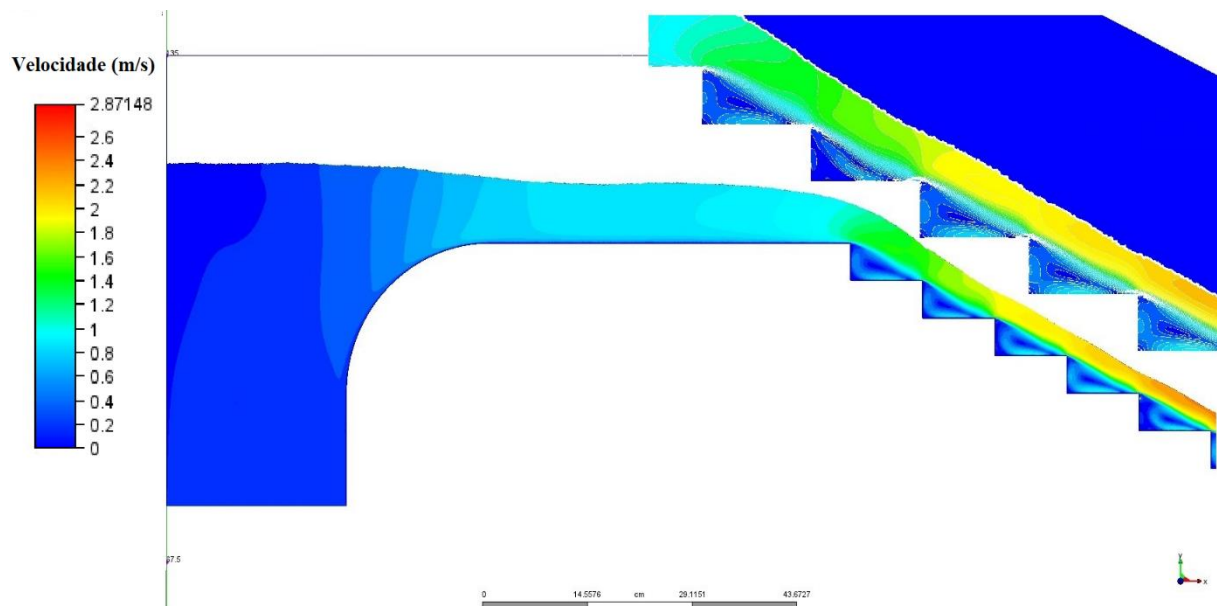


Figura 6.22: Perfil longitudinal de velocidades na entrada – Modelo numérico (Cenário 2).

Finalmente, o valor da velocidade final encontrada nessa simulação numérica, para o pé da descida em degraus, foi de cerca de 2,2 m/s, conforme pode ser notado na Figura 6.23 através da análise gráfica e visual qualitativa do campo de velocidades. As três zonas caracterizadas no subitem 4.1.3 podem ser observadas. O número está 11,1% divergente da mediana das velocidades físicas finais experimentais, para vazão de referência. O presente modelo numérico, operando com método dos volumes finitos, parece não representar bem a aeração do escoamento. Portanto, a condição bifásica não foi corretamente visualizada e considerada, fato que pode explicar os desvios. A própria distribuição global do perfil não foi bem observada.

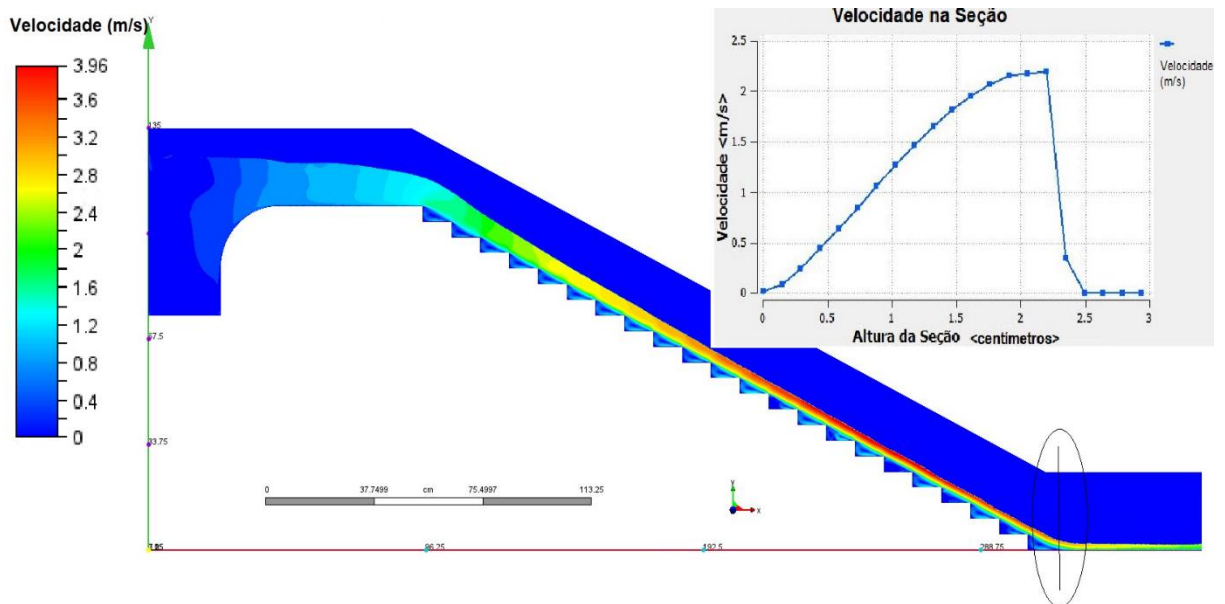


Figura 6.23: Perfil longitudinal de velocidades– Modelo numérico 1 (Cenário 2).

6.2.3 Modelo numérico 2 – MVF

Com relação ao modelo numérico a partir do *software* OpenFOAM®, via MVF, a discussão dos resultados será mais bem explorada, uma vez que a representação do escoamento foi melhor para essa condição. Não se apresentou, portanto, discordância ao uso do MVF para fluidodinâmica computacional como melhor ferramenta e mais utilizada pelos programas de CFD. O número de células no refinamento local e global já discutidos foi de 101 148, a um custo de 2,1 gigabytes.

Seguindo-se a ordem de apresentação e comparação dos resultados, o perfil da linha d'água é melhor observado pela variável VOF, *alpha.water* neste software CFD. Verificou-se uma boa representatividade para o perfil de entrada, principalmente comparando-se ao obtido pelo modelo físico reduzido, Figura 6.16. Nesse sentido a Figura 6.24 mostra a configuração geral do VOF. Interessante ressaltar a formação de uma piscina a jusante da última queda, possível de ser observada também no modelo físico para configuração com plataforma adaptativa.

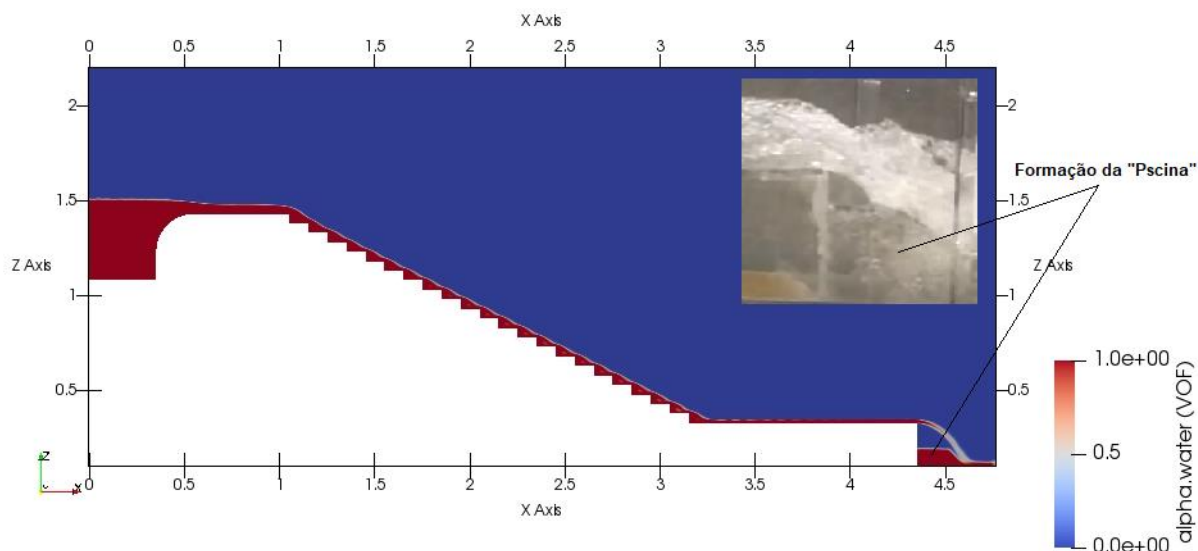


Figura 6.24: Modelo numérico 2 – Cenário 2 (VOF).

O campo de velocidades deste modelo (Figura 6.25) apresenta pequenos pontos nos quais a velocidade atinge valores mais altos que a própria velocidade de pé, característica do grande processo de turbulência. Visualmente é possível notar uma significativa maior contribuição do arrasto de ar à medida que a incorporação dos fluidos se processa. Também, como no modelo por MEF, foi possível notar a formação das três regiões discutidas no subitem 4.1.3.

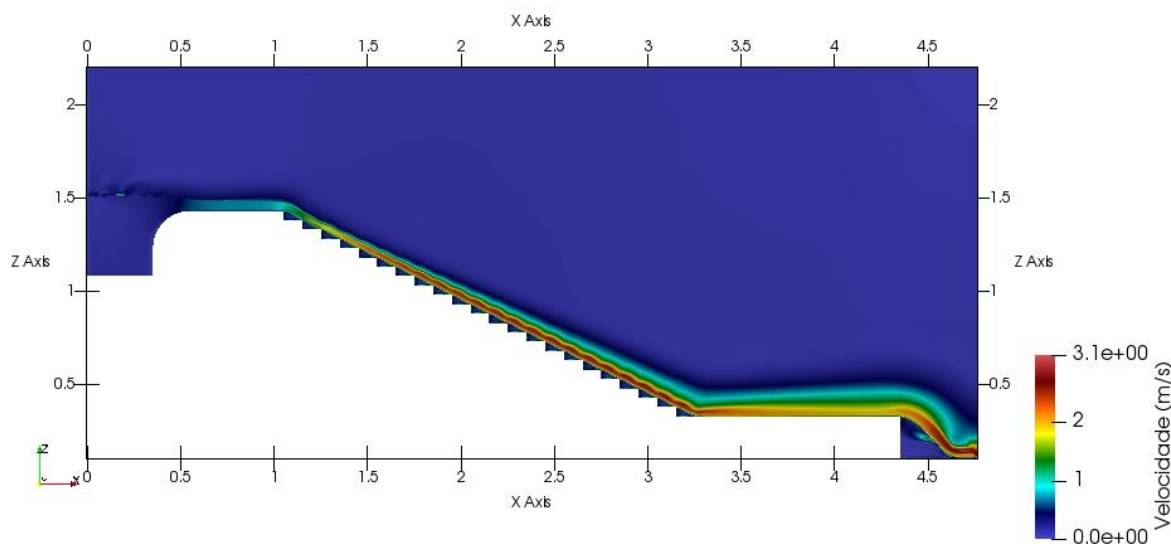


Figura 6.25: Perfil longitudinal de velocidades – Modelo numérico 2 (Cenário 2).

Conforme toda boa análise dos resultados numéricos, as mesmas seções posicionadas no pé da estrutura para configuração do Cenário 1 foram repetidas para este Cenário 2. Portanto, a Figura 6.26 demonstra os resultados gráficos. O valor da velocidade final, para $VOF = 0,5$, foi de 2,1 m/s. Um número com apenas 6,0% de erro em relação à mediana experimental para vazão de

referência ($Q=5,2$ l/s). Por sua vez, a profundidade no pé, considerando a variação também de VOF de 1 até 0,5, local ocupado por água ou mistura preponderante, foi de:

$$0,15 - 0,0133 = 0,017 \text{ metros ou } 1,7 \text{ centímetro}$$

Uma vez que a profundidade teórica é de 1,83 centímetros (Equação 4.31), o valor gerado pela análise do VOF (Figura 6.26) em 1,7 centímetros foi muito bom.

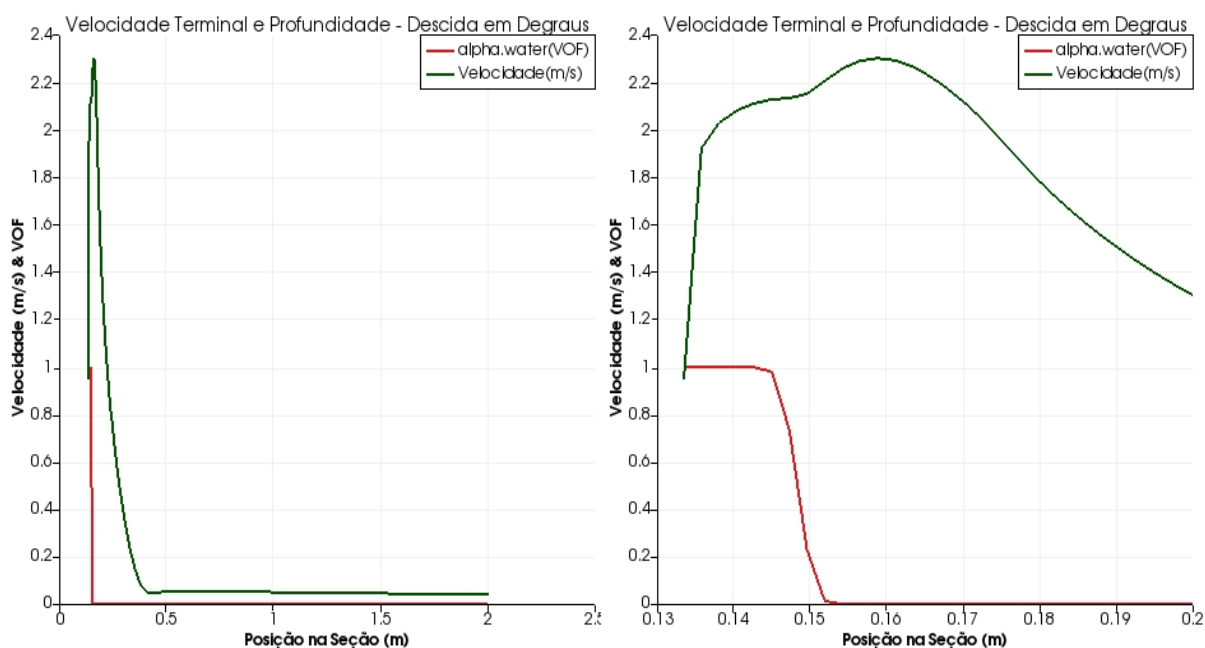


Figura 6.26: Gráficos de velocidade e VOF da seção no pé – Modelo numérico 2 (Cenário 2).

6.2.3.1 Discussão dos solvers adequados

A discussão de literatura, extensamente tratada, é unânime para alta concentração de ar do escoamento nesse tipo de estrutura, descidas e vertedouros em degraus. Nessa direção, é imprescindível o domínio dos solvers em cada modelagem numérica por CFD. O OpenFOAM® possui uma extensa literatura e possibilidade de troca dos solvers em cada simulação, tornando o caso o mais realístico possível. Dentro do módulo para mais de uma fase de escoamento, o programa possui um solver padrão mais utilizado pelos simuladores, chamado de *interFoam*. Trata-se da resolução das equações de *Navier-Stokes* com considerações “especiais” em cada volume de controle infinitesimal (OPENFOAM®, 2020).

O presente trabalho iniciou-se com a execução da simulação no solver *interIsoFoam*, um caso aprimorado do solver padrão para escoamentos com maior aeração (OPENFOAM®, 2020).

Porém os resultados não foram totalmente satisfatórios, ou seja, a alta aeração ainda não era bem considerada no processo. A Figura 6.27 retrata o perfil de velocidade gerado com *interIsoFoam*. A capacidade de aeração da massa líquida é limitada, como mostra a regularidade excessiva da saída do escoamento (berma).

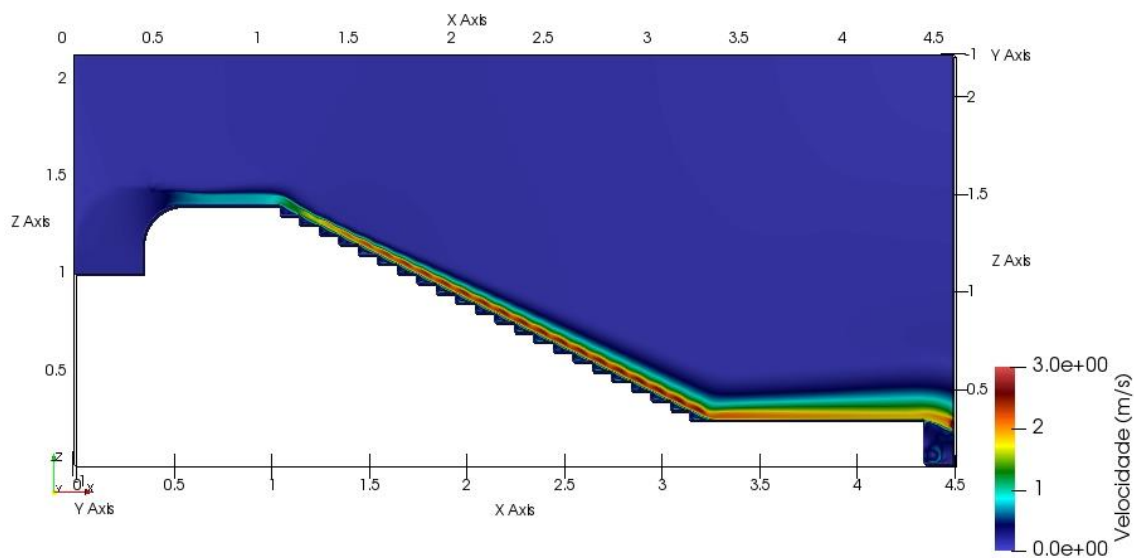


Figura 6.27: Perfil longitudinal de velocidades – Solver *interIsoFoam*.

De forma quantitativa final, a Figura 6.28 demonstra a limitação do *solver* padrão encontrada para a simulação, nesta pesquisa, para tratar o escoamento em degraus. Notou-se que a variável VOF apresenta valor nulo na região de existência do fluxo, comparada a medição física e simulação com *solver* adequado (Figura 6.26). Além disso, os valores de velocidade não representam adequadamente à realidade, considerando-se, ainda, o valor inexistente de VOF.

Portanto, o *solver* estudado no manual do programa e utilizado nos resultados apresentados no subitem progresso 6.2.3 foi o *multiphaseEulerFoam*. Trata-se de uma condição computacional mais agressiva do ponto de vista de cálculo, assim a simulação aumentou sua duração em 2 dias, totalizando 7 dias de processamento. São utilizadas equações eulerianas nas combinações de fases do escoamento. Esse *solver* ainda apresenta-se com os recursos menos intenso para apenas duas fases, porém, optou-se pelo uso completo, bastante utilizado também em simulações envolvendo transporte de sedimentos (OPENFOAM®, 2020).

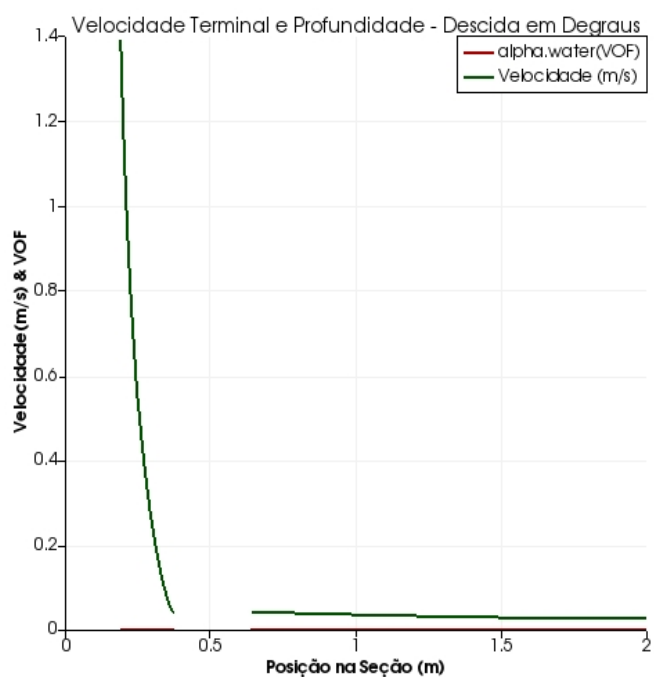


Figura 6.28: Gráfico de velocidade e VOF da seção no pé – *Solver interIsoFoam*.

De forma complementar aos excelentes resultados encontrados com *solver multiphaseEulerFoam* e já apresentados no subitem 6.2.3, a partir da Figura 6.29 verifica-se a boa representação da posição de início da aeração no sexto degrau. A variável exibida é a *alpha.air*, trata-se da mesma lógica de *alpha.water* (VOF), contudo, a escala de 1 até 0 é inversa. Assim, fica nítida presença de ar nas cavidades dos vórtices de recirculação a partir do sexto degrau, tanto na simulação numérica para vazão de referência quanto no modelo físico reduzido com mesmo fluxo.



Figura 6.29: Posição de início da aeração – *Solver multiphaseEulerFoam*.

6.2.3.2 Extrapolação para outras vazões

Conforme já discutido, a natureza de um modelo numérico por meio de CFD é distinta, tratando-se um pouco diferente das fases de calibração, validação e simulação dos modelos clássicos. À medida que uma vazão aumenta as velocidades reinantes no domínio crescem, tornando obsoleta a malha previamente calibrada. Diversos trabalhos desenvolveram a modelagem para uma configuração única de vazão ou com vizinhas pequenas de variação, por exemplo. Podem ser citados os trabalhos de Lira (2014), Bennett *et al.* (2018) e Bentalha e Habi (2019).

A partir dos resultados obtidos, optou-se por extrapolar a capacidade de previsão de velocidade final para vazões além do valor de referência de entrada no regime deslizante sobre turbilhões ($Q=5,2$ l/s). Definiu-se então os extremos, sendo 2,0 l/s característicos da vazão representante do regime de quedas sucessivas (*napped flow*) e 8,0 l/s representante para o máximo ensaiado no modelo físico para o regime deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*). O modelo utilizado foi o OpenFOAM® que apresentou melhor desempenho, MVF com refinamento e *solver* já discutidos.

Para o regime em quedas sucessiva, com vazão de 2,0 l/s, a Figura 6.30 exhibe o perfil da variável VOF com a respectiva configuração do escoamento nos degraus. Não há formação dos vórtices e o fluxo choca-se degrau por degrau até a saída. A comparação com a análise do escoamento nos degraus para o modelo físico reduzido indica uma boa aproximação de comportamento.

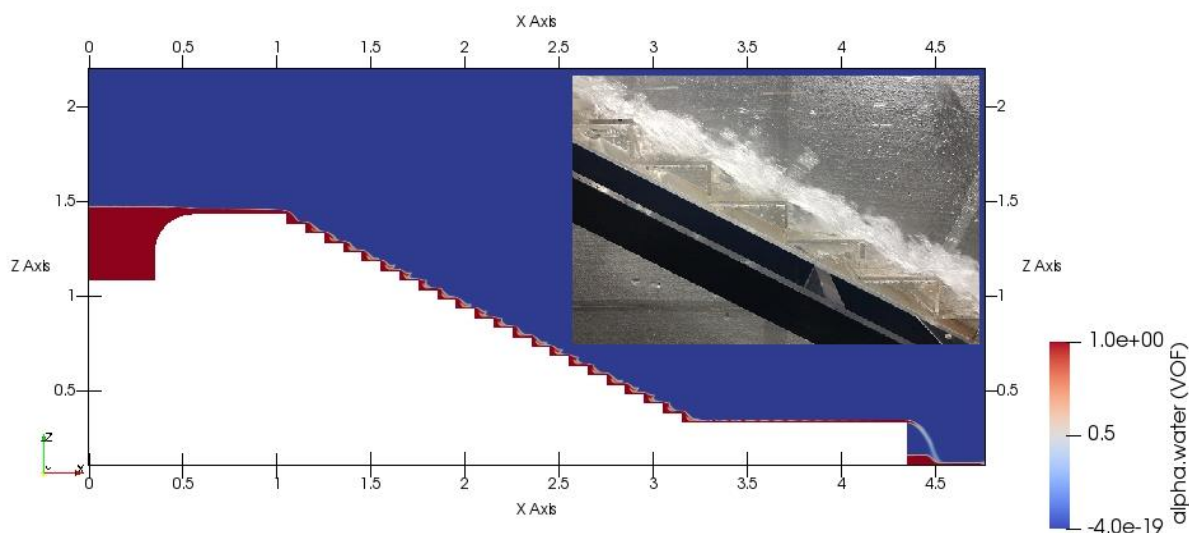


Figura 6.30: Regime quedas sucessivas – $Q=2,0$ l/s (VOF).

Na sequência de verificação, a Figura 6.31 demonstra o perfil de velocidades longitudinal para vazão deste regime. É notável a grande perda de energia em cada degrau, ocasionada pelo choque do escoamento em cada queda.

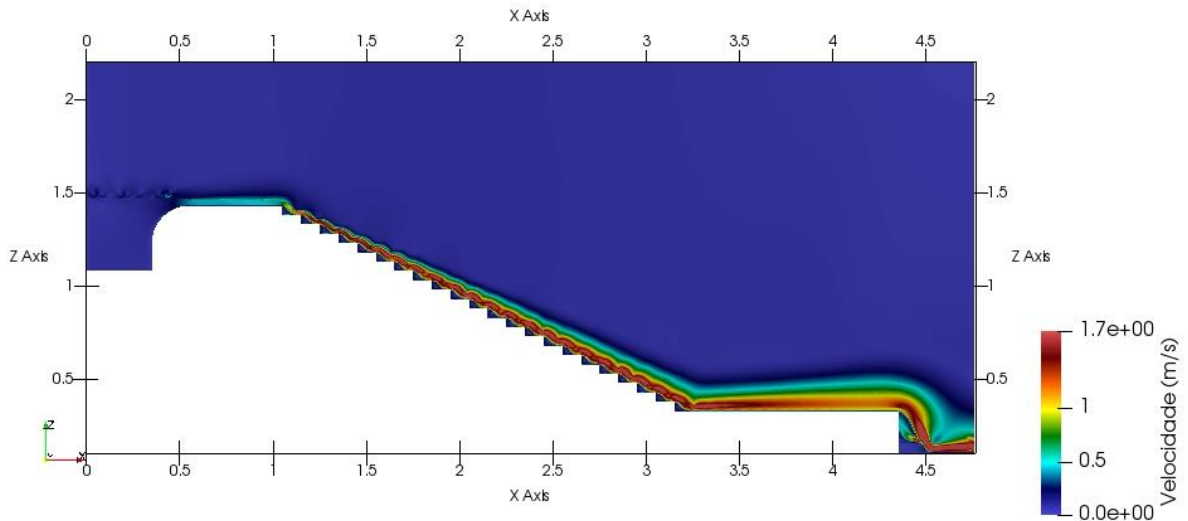


Figura 6.31: Regime quedas sucessivas – $Q=2,0$ l/s (Velocidade).

Finalmente, a análise do gráfico para velocidade final quantitativa representante da seção no pé da estrutura retorna o valor de 1,3 m/s, claramente associado ao valor de $VOF = 0,5$. Portanto, idêntico ao valor da mediana experimental de 1,3 m/s, sendo, pela Equação 4.29, de 1,22 m/s, conforme Tabela 6.5.

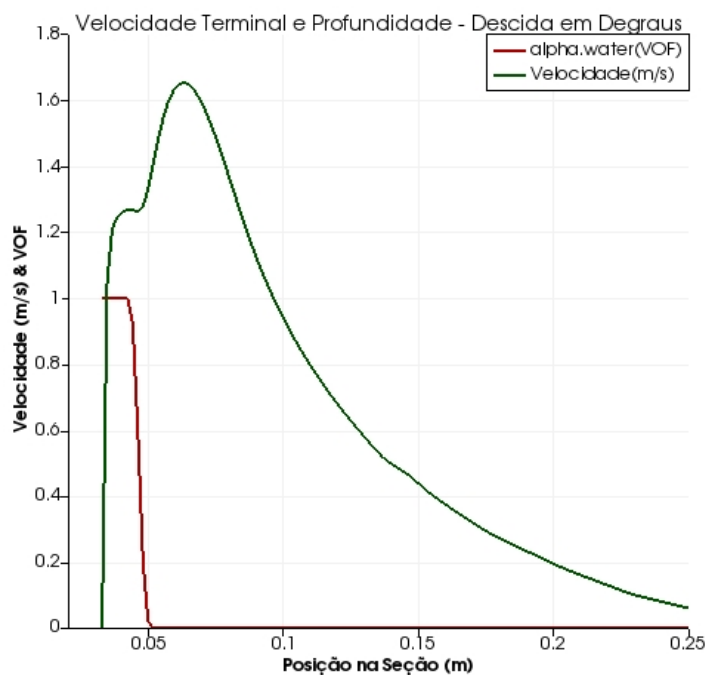


Figura 6.32: Regime quedas sucessivas – $Q=2,0$ l/s (Gráfico Velocidade & VOF).

No que se refere a vazão máxima do regime deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), $Q=8,0$ l/s, a Figura 6.33 apresenta a configuração da linha d'água pela variável VOF. Logicamente uma maior profundidade na piscina a jusante do escoamento era esperada, como visto na simulação.

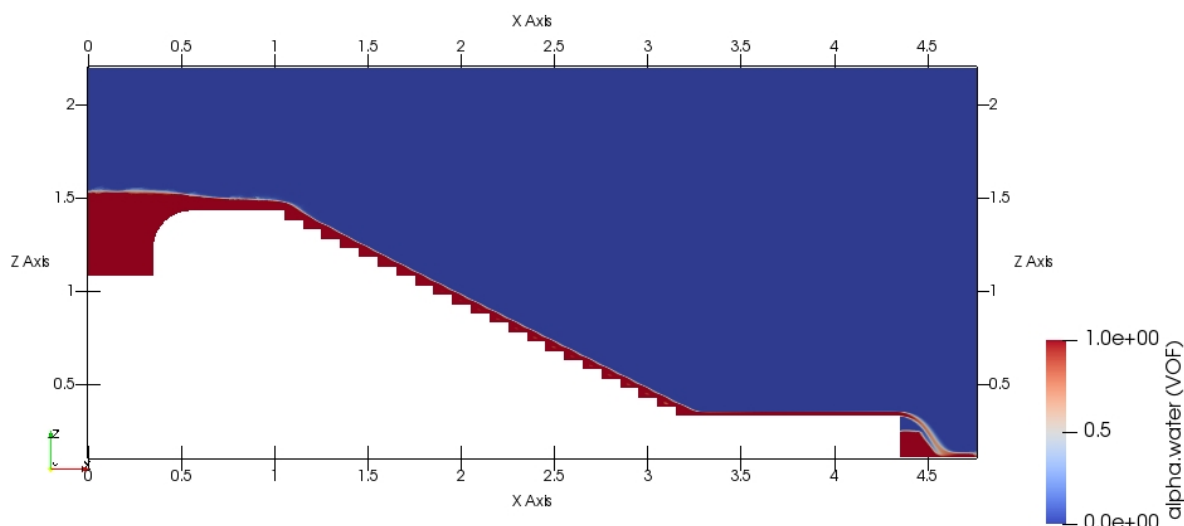


Figura 6.33: Regime deslizante sobre turbilhões – $Q=8,0$ l/s (VOF).

Na ordem, a Figura 6.34 caracteriza o campo de velocidades para vazão de $8,0$ l/s. É possível notar maior arraste de ar devido ao maior fluxo. Além disso, a camada deslizante sobre turbilhões (vórtices) é nítida com maior velocidade relativa aos “rolamentos” abaixo. Tanto o observado no modelo físico reduzido como no modelo numérico são próximos na previsão de comportamento para referida camada.

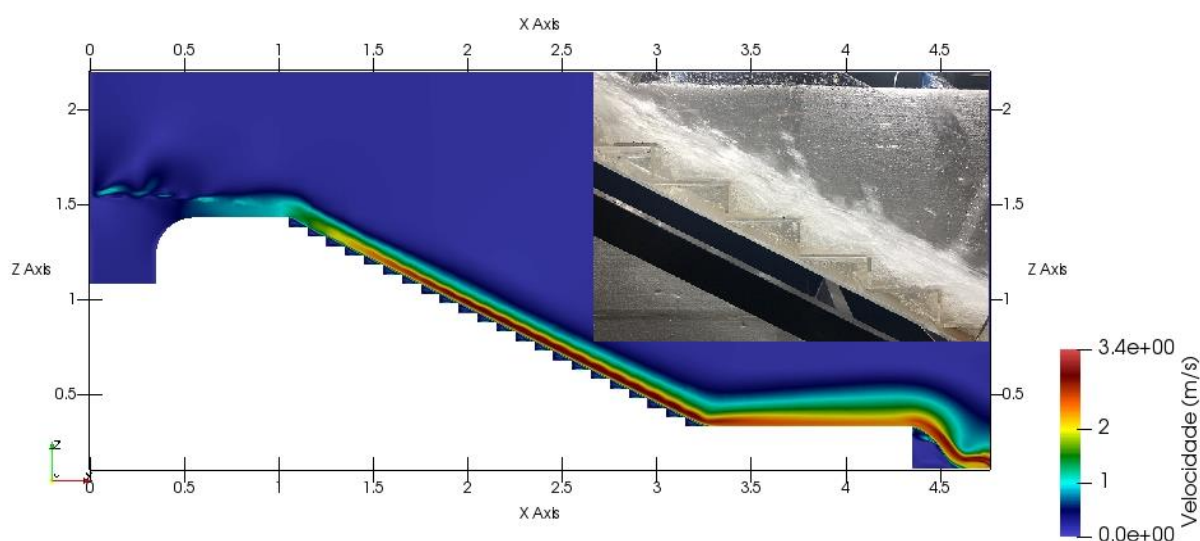


Figura 6.34: Regime deslizante sobre turbilhões – $Q=8,0$ l/s (Velocidade).

Por fim, a análise absoluta, gráfica, dos valores de velocidade na seção de pé são apresentados na Figura 6.35. Como esperado, devido às maiores velocidades reinantes no modelo, a divergência da malha ideal encontrada para vazão de referência começa apresentar-se subdimensionada. A velocidade final para VOF=0,5 é de 2,55 m/s. Conforme Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2004), o valor calculado é de 2,205 m/s, de acordo com a Tabela 6.5, e a mediana experimental é de 2,21 m/s, a diferença (erro) subiu para 15,3%, em relação ao modelo físico.

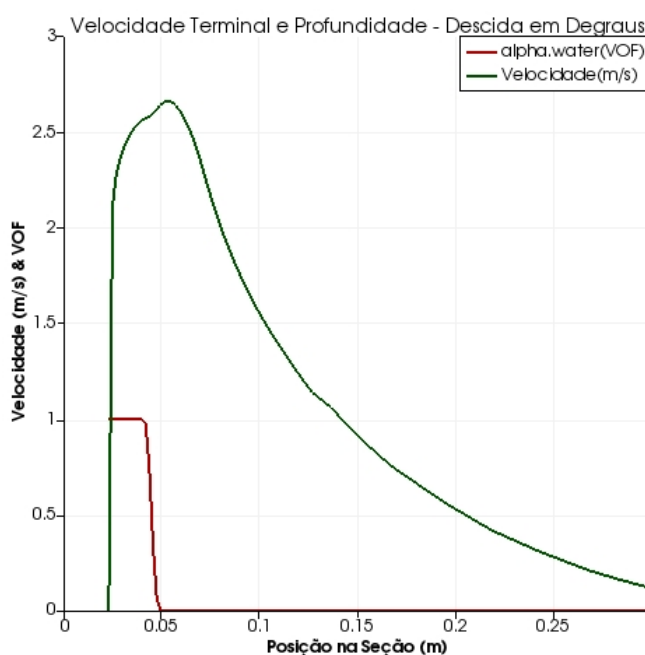


Figura 6.35: Regime deslizante sobre turbilhões – $Q=8,0$ l/s (Gráfico Velocidade & VOF).

6.3 Cenário 3

O tratamento dos resultados para o Cenário 3 três foi obtido a partir da avaliação experimental das posições máximas e mínimas das variáveis de interesse da análise dimensional discutida na metodologia em 5.3.3.1. Os dados completos são apresentados no Apêndice III. A análise por filmagem em alta frequência trabalhou com uma grade de 1,25 centímetros de refinamento na altura, portanto a regressão múltipla com os cuidados estatísticos será discutida à frente. A Figura 6.36 demonstra a formação de um pseudo-ressalto com a elevação da cota da mistura-nuvem de ar e água acima da profundidade crítica. De fato, o escoamento altamente aerado não está sujeito a aplicação da hidráulica clássica, ou seja, o valor de Δz crítico é maior que o valor de soleira ensaiada nessa configuração (HAGER, 1992). Mesmo assim, ocorreu um levantamento do escoamento com uma profundidade de pé (y_1) e uma “conjugada” (y_2) que ocasionaram um acréscimo de perda de energia na região. Esse fato permite o funcionamento do sistema, descida e bacia, para atingir um dos objetivos do trabalho.

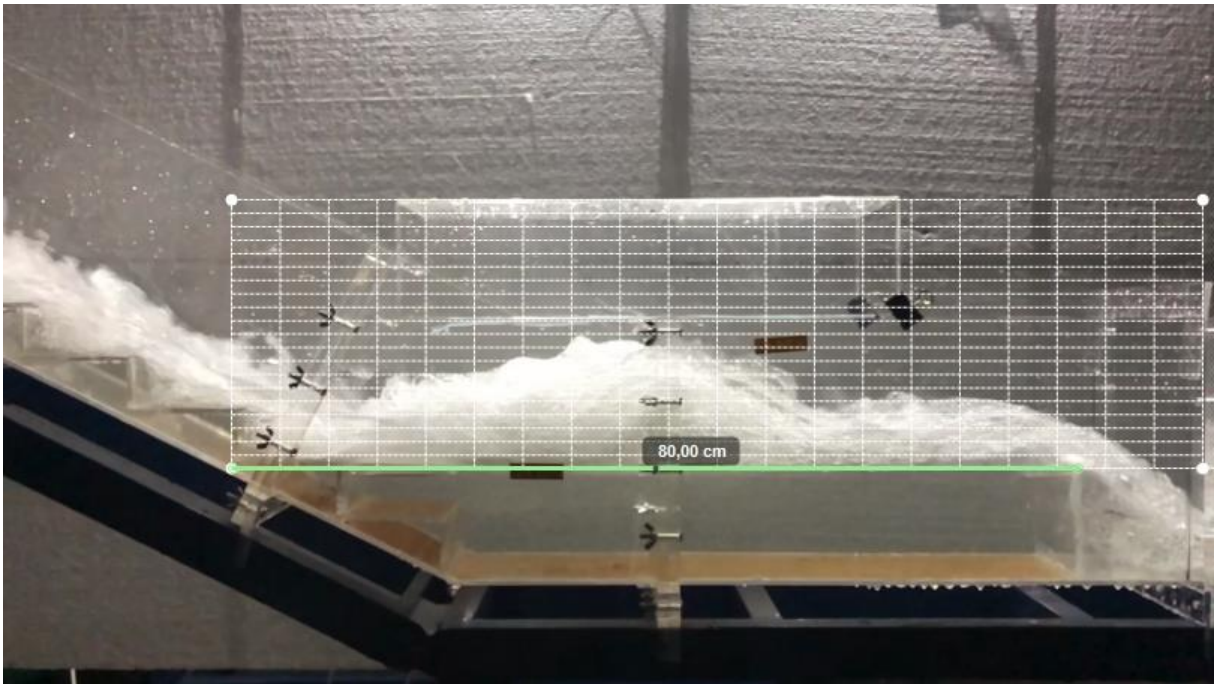


Figura 6.36: Formação de um pseudo-ressalto para $\Delta z= 3\text{cm}$, $L=37,5\text{cm}$ e $Q=6,0\text{l/s}$.

6.3.1 Determinação da faixa de trabalho e verificação do *Weir Flow*

Conforme já discutido, o fenômeno do *Weir Flow* pode ocorrer abaixo das condições de Δz crítico previsto pela hidráulica clássica. Trata-se de uma condição na qual o escoamento é altamente aerado no pé da estrutura, prejudicando a aplicação das equações tradicionais de energia (HAGER, 1992). Assim, os primeiros testes foram realizados com Δz de 7,5 e 5 centímetros, respectivamente. Porém, de acordo com as Equações 4.33 e 4.34, foi possível estabelecer quantitativamente os valores de soleiras máxima ($s_{m\acute{a}x}$) e ótima ($s_{\acute{o}t\text{im}o}$) para cada vazão do regime deslizante sobre turbilhões, como visto na Tabela 6.7. Dessa forma, os valores propostos para esta pesquisa situaram-se em 4, 3 e 2 centímetros, respectivamente, a fim de evitar-se o regime completo do *Weir Flow*. A pequena e parcial existência não é um problema, visto que o módulo será aplicado em estruturas de pequeno e médio portes, nas quais as flutuações de pressão previstas por Conterato (2014) não causarão problemas. Como a literatura prevê, todas as vazões para os valores de Δz de 7,5 e 5 centímetros apresentaram *Weir Flow*.

Tabela 6.7: Limites da soleira, *Weir Flow*.

Vazão(l/s)	5,2	2	3	4	6	7	8
s máx (m)	0,038	0,017	0,022	0,027	0,042	0,044	0,048
s ótimo (m)	0,022	0,012	0,016	0,019	0,025	0,027	0,029

A Figura 6.37 evidencia a existência do fenômeno, verificado no modelo reduzido, também constatado por Conterato (2014), para configuração de $\Delta z= 7,5\text{cm}$, $L=50,0\text{cm}$ e $Q=8,0\text{l/s}$.

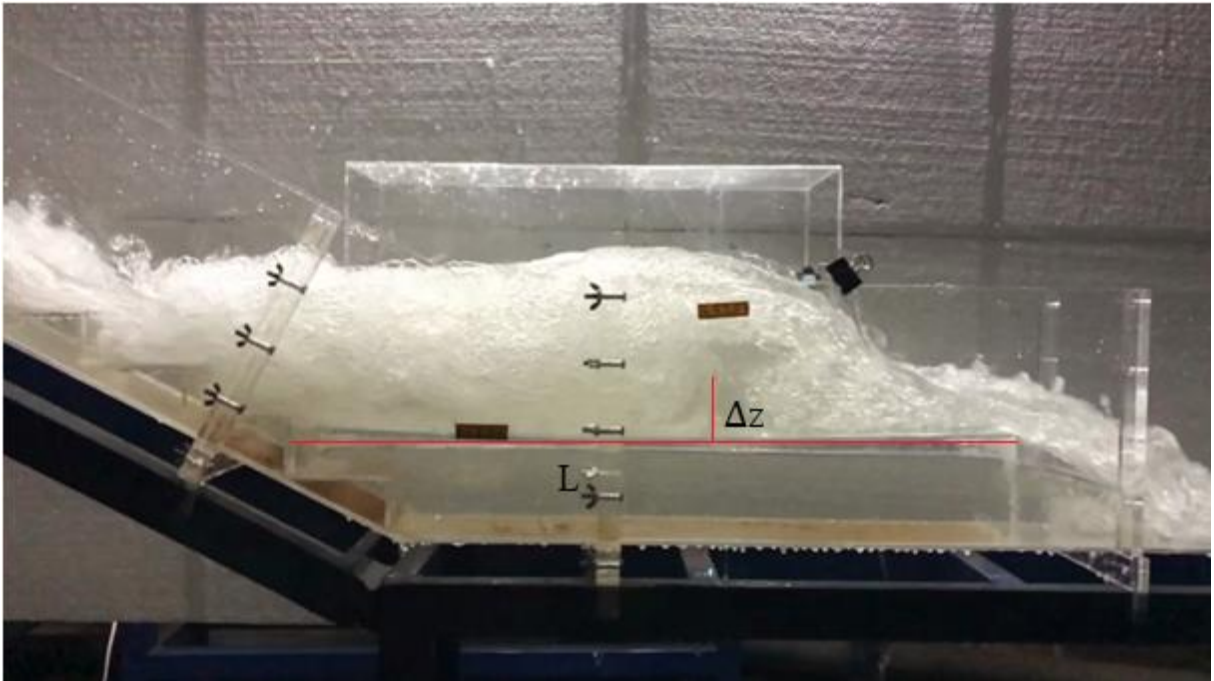


Figura 6.37: Fenômeno de Weir Flow, $\Delta z= 7,5\text{cm}$, $L=50,0\text{cm}$ e $Q=8,0\text{l/s}$.

Apenas como discussão quantitativa complementar, a Figura 6.38 demonstra a curva de energia específica associada à vazão de $8,0\text{ l/s}$, também para configuração da Figura 6.37.

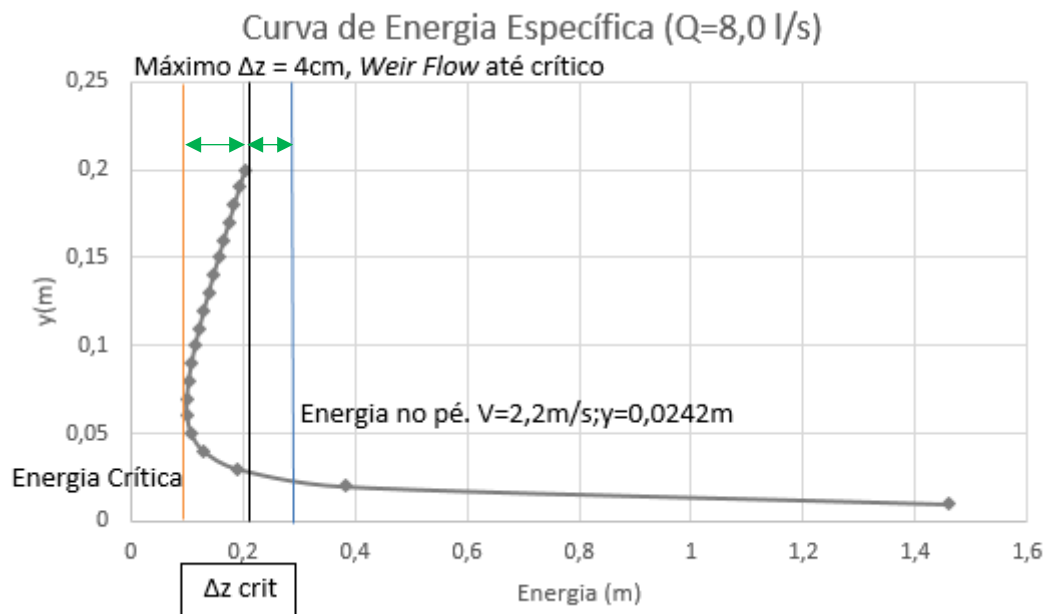


Figura 6.38: Curva de Energia Específica. ($Q=8,0\text{ l/s}$).

Portanto, a partir da Figura 6.38, é possível entender que o valor da energia no pé (linha azul) é de 0,27 metros. Sendo valor crítico de 0,09 metros (linha vermelha), o ressalto para condição de escoamento clássico formar-se-ia com Δz maior que 0,18 metros. Porém, pelas Equações 4.33 e 4.34 de Hager (1992), e discutido por Conterato (2014), o maior Δz possível para não ocorrência do *Weir Flow* está em 0,04 metros, tornando a região de trabalho até a energia de 0,23 metros (linha preta). Ou seja, existe elevação da profundidade “conjugada” máxima (y_2), determinante do dimensionamento da cota de escavação da vala nas bermas, como visto na Figura 6.36, sem formação de um ressalto hidráulico propriamente. Afinal o escoamento altamente aerado no pé não pode ser modelado pelas equações de hidráulica clássica, necessitando-se de experimentação.

6.3.2 Regressão múltipla dos dados à análise dimensional proposta do sistema em estudo

Visando-se à adequação dos dados medidos no modelo físico reduzido a partir do resultado da análise dimensional realizada neste trabalho, com final na Equação 5.8, foi realizada a mesma adaptação como da Equação 4.37 do trabalho de Altalib, Mohammed e Hayawi (2019). Os dados brutos encontram-se no Apêndice III. Como a condição de interseção zero gerou problemas na correlação, trabalhou-se com Excel e R para melhor controle dos resultados, permitindo esse parâmetro diferente de zero. Obviamente, para regressão linear múltipla, transformou-se com a linearização por logaritmos neperianos na forma da Equação 6.1 com resultados na Tabela 6.8.

$$\ln \frac{y_3}{y_h} = \text{interseção} \times \left(\ln Fr_1^{a1} \ln Fr_2^{a2} \ln \left(\frac{\Delta z}{y_h}\right)^{a3} \ln \left(\frac{L}{y_h}\right)^{a4} \ln Fr_{yh}^{a5} \right) \quad (6.1)$$

Tabela 6.8: Resumo da estatística de regressão (y_3/y_h).

	Estimado	Erro	Padrão	Valor t Pr(> t)
Interseção	-0,18902	0,267488	-0,707	0,4852
a1	0,059906	0,099112	0,604	0,5501
a2	-0,02732	0,070638	-0,387	0,7017
a3	-0,00967	0,026625	-0,363	0,7191
a4	0,077552	0,041077	1,888	0,0687
a5	-0,19377	0,590631	-0,328	0,7451
Significância: 0 "****" 0,001 "***" 0,01 "**" 0,05 "." 0,1 " " 1				
Erro residual padrão 0,03424 em 30 graus de liberdade				
R quadrao múltiplo: 0,4287, R quadrado ajustado 0,3334				
Estatística-F: 4,502 em 5 e 30 GL, p-valor 0,003525				

Para conferência dos resultados do ajuste, o trabalho de Naghettini e Pinto (2007) será balizador das decisões seguintes. De acordo com os autores, o teste da significância da Equação de Regressão Linear Múltipla deve ser verificado “globalmente” pelo “teste do F total”. O valor gerado foi de 4,502. Sendo $F(0,05;5;30) = 2,53$, ou seja, ao nível de significância de 5% com 5 variáveis independentes e 30 graus de liberdade, a distribuição F de *Snedecor* retorna o valor 2,53. Conforme o valor de 4,502 é maior que 2,53, rejeita-se a hipótese nula (a relação entre as variáveis não é linear). Portanto, existe regressão.

Já verificando individualmente a participação de cada variável isoladamente, Naghettini e Pinto (2007) propuseram o “teste do F parcial”. Ao nível de significância de 5% (0,05) é possível ver que o valor-p é superior em todos os casos, assim, não se rejeita a hipótese nula (a variável isolada não melhora significativamente o modelo). Contudo, esse teste não é determinístico como “teste do F total”, que traduz que existe a regressão. Porém, será tentado novo arranjo das variáveis mais à frente para enquadramento em todos os critérios. A Equação 6.2 conclui o ajuste para essa configuração.

$$\frac{y_3}{y_h} = 0,8278 \left(Fr_1^{0,059} Fr_2^{-0,027} \frac{\Delta z^{-0,009}}{y_h} \frac{L^{0,077}}{y_h} Fr_{y_h}^{-0,193} \right) \quad (6.2)$$

A Figura 6.39 exibe a configuração das medidas experimentais e estimadas pela Equação 6.2. O coeficiente de correlação, R^2 , foi de 0,43.

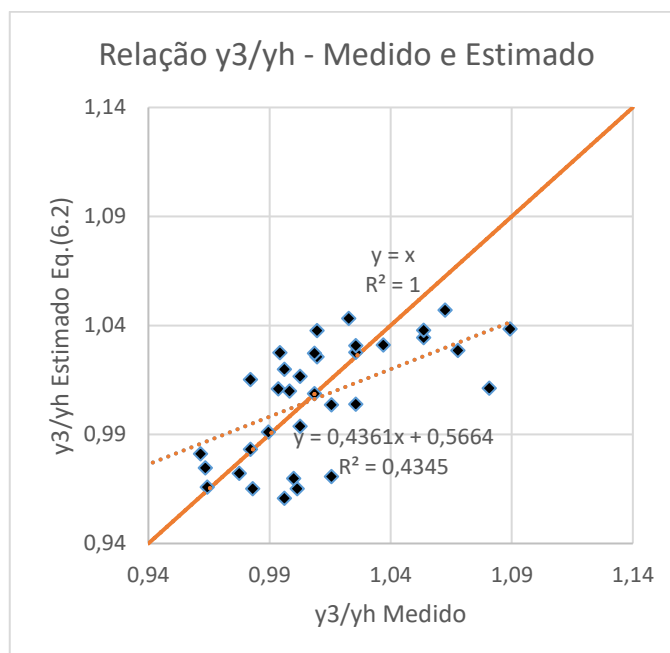


Figura 6.39: Relação entre Medido e Estimado (y_3/y_h).

6.3.2.1 Análise dos resíduos

A partir das discussões de Naghettini *et al.* (2017) sobre os enquadramentos corretos dos resíduos da regressão linear múltipla, traçou-se os caminhos da análise deste subitem. Os autores narram a necessidade de três condições fundamentais aos resíduos: normalidade, independência e homogeneidade das variâncias.

A condição de independência é garantida pela forma de extração dos resultados em cada ensaio isolado por mais de 36 vezes, como narra Naghettini *et al.* (2017). Foram executadas 3 posições do paramento (L), para 3 alturas diferentes (Δz) e 4 vazões de dimensionamento do regime deslizante, em dias alternados. Todos os dados foram analisados isoladamente.

Para verificação da normalidade dos resíduos, executou-se o teste de *Shapiro-wilk* no programa R. A estatística de teste foi de $W=0,95954$ e o valor- $p=0,2081$. Como nível de significância adotado foi de 5% (0,05), menor que o valor- p gerado, a hipótese nula não é rejeitada. Ou seja, os resíduos têm distribuição normal.

Por fim, para homogeneidade das variâncias (homocedasticidade), tentou-se encontrar alguma tendência no gráfico recomendado por Naghettini *et al.* (2017). Por isso, como os pontos estão aleatoriamente distribuídos em torno do zero, sem nenhum comportamento ou tendência, temos indícios de que a variância dos resíduos é homoscedástica (Figura 6.40). Uma vez que a presença de "funil" seria um indicativo da presença de heteroscedasticidade.

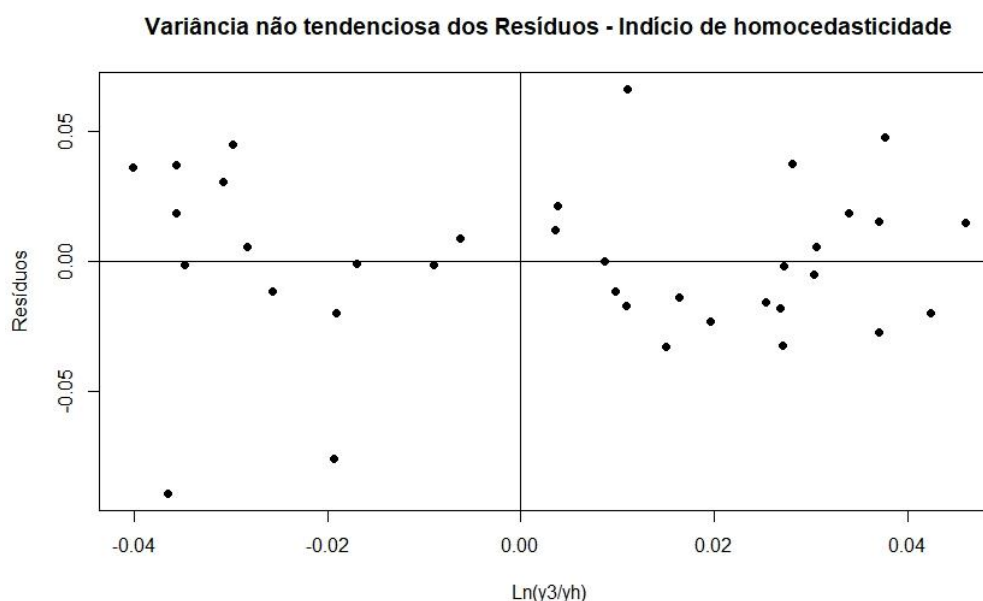


Figura 6.40: Variância dos resíduos $\ln(y_3/y_H)$.

6.3.3 2º Regressão múltipla para análise dimensional

A energia total perdida no escoamento em degraus foi de 88,2% em relação ao total disponível a montante e 70,1% em relação a uma calha lisa (Cenário 1). Dessa forma, mesmo sem bacia com bloco, dever-se-ia perder pouca energia na berma em escala. Esse fato gerou uma regressão múltipla com a escolha de y_3/y_h sempre próximo a unidade. Obviamente, o pequeno bloco, independente de altura e posição, já garantia uma eficácia suficiente do sistema para se alcançar o objetivo procurado, garantir a condição hidráulica de entrada próxima a de saída.

No sentido de melhorar o ajuste estatístico, principalmente no tocante aos valores do “teste do F parcial”, foi desenvolvida nova análise, agora, com y_2/y_h como variável de interesse dependente. A razão de escolha se deve à variabilidade da profundidade (y_2), apesar das pequenas variações de vazão, posição e altura do bloco. Salienta-se que y_2 determina a cota de escavação da “plataforma” na berma. Representando um fator de custo ao projeto. A Equação 6.3 evidencia a relação encontrada para os mesmos passos do processo feito no subitem 5.3.3.1.

$$\frac{y_2}{y_h} = \text{função} \left(Fr_1, Fr_3, \frac{\Delta z}{y_h}, \frac{L}{y_h}, Fr_{yh} \right) \quad (6.3)$$

A Tabela 6.9 mostra o resumo, nos moldes do subitem anterior, da saída do programa R, controlado pelos resultados compatíveis comparados no Excel. A regressão linear múltipla foi também executada com a linearização por logaritmos previamente discutida.

Tabela 6.9: Resumo da estatística de regressão (y_2/y_h).

	Estimado	Erro	Padrão	Valor t Pr(> t)
Interseção	-1,0034	0,42339	-2,442	0,02071 *
a1	0,22818	0,16625	1,373	0,18007
a2	-0,08071	0,20869	-0,387	0,70168
a3	-0,04984	0,04495	-1,109	0,2763
a4	-0,22079	0,06287	-3,512	0,00143 **
a5	4,76696	0,73695	6,469	3,79e(-7) ***
Significância: 0 "****" 0,001 "***" 0,01 "**" 0,05 "." 0,1 " " 1				
Erro residual padrão 0,05885 em 30 graus de liberdade				
R quadrado múltiplo: 0,6453, R quadrado ajustado 0,5861				
Estatística-F: 10,91 em 5 e 30 GL, p-valor 4,764e(-6)				

Em sequência, de acordo Naghettini e Pinto (2007), o teste da significância da Equação de Regressão Linear Múltipla, verificado “globalmente” pelo “teste do F total”, retornou valor de 10,91. Sendo $F(0,05;5;30) = 2,53$, ou seja, ao nível de significância de 5% com 5 variáveis

independentes e 30 graus de liberdade, a distribuição F de *Snedecor* retorna o valor 2,53. Conforme o valor de 10,91 é maior que 2,53, rejeita-se a hipótese nula (a relação entre as variáveis não é linear). Portanto, também existe regressão.

Para conferência individual da participação de cada variável isoladamente, conforme Naghettini e Pinto (2007), o “teste do F parcial” mostrou que $\frac{L}{y_H}$ e Fr_{y_h} tem participação preponderante no valor de y_2/y_h . Portanto, com nível de significância de 5% (0,05) é possível ver que o valor-p é superior em todos os casos, menos para a4 e a5, assim, não se rejeita a hipótese nula (a variável isolada não melhora significativamente o modelo) nesses casos. Esse teste não é determinístico como “teste do F total”, que traduz que existe a regressão. Porém, será tentado novo arranjo das variáveis mais à frente para enquadramento em todos os critérios. A Equação 6.4 conclui o ajuste para essa outra configuração.

$$\frac{y_2}{y_h} = 0,3556 \left(Fr_1^{0,228} Fr_3^{-0,080} \frac{\Delta z^{-0,05}}{y_h} \frac{L^{-0,220}}{y_h} Fr_{y_h}^{4,766} \right) \quad (6.4)$$

Com coeficiente de correlação, R^2 , foi de 0,65. A Figura 6.41 mostra os valores entre os estimados da nova relação adimensional de interesse e medidos experimentalmente.

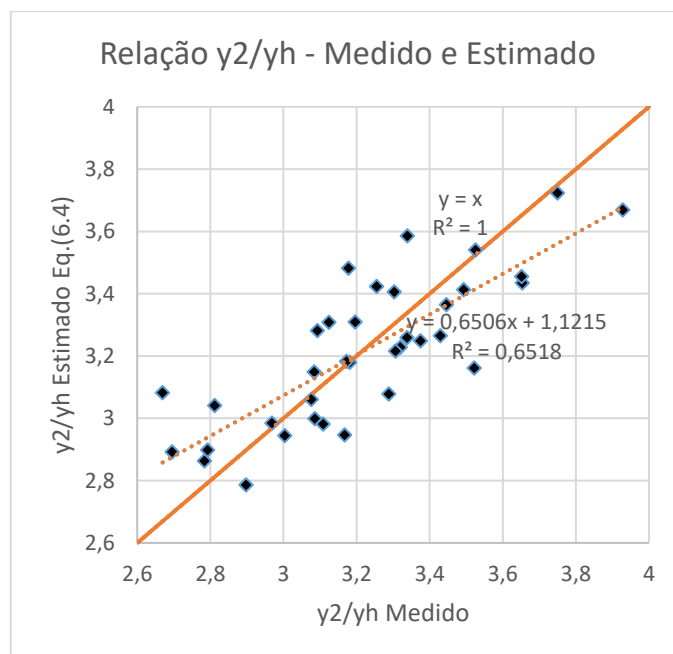


Figura 6.41: Relação entre Medido e Estimado (y_2/y_h).

6.3.3.1 Análise dos resíduos

O mesmo teste para conferência da normalidade dos resíduos, *Shapiro-wilk*, gerou a estatística de teste de $W=0,97664$ e o valor- $p=0,6313$. Como nível de significância adotado é de 5% (0,05), menor que o valor- p gerado, a hipótese nula não é rejeitada. Ou seja, os resíduos têm distribuição normal.

Finalmente, considerando atendidos os critérios de independência e normalidade como já discutido e previsto por Naghettini *et al.* (2017), a homogeneidade de variância dos resíduos é notória no gráfico da Figura 6.42. Indicando homocesticidade e correta distribuição para esta regressão apresentada.

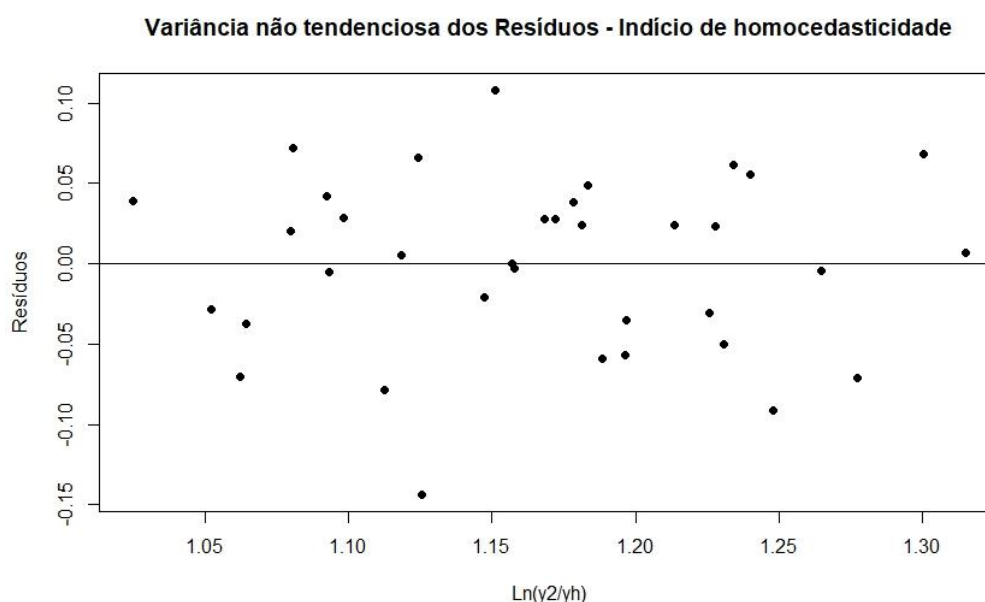


Figura 6.42: Variância dos resíduos $\ln(y_2/y_h)$.

6.3.4 3º Regressão múltipla para análise dimensional

Com a intenção da boa prática de pesquisa, finalmente, tentou-se a última regressão linear múltipla para enquadrar todas as estatísticas de teste nos critérios discutidos por Naghettini e Pinto (2007). Apesar de poder utilizar-se para o projeto as Equações 6.4 e 6.2 como balizadores, atentando-se para faixa de validade das vazões ensaiadas, além das geometrias dos degraus e demais dispositivos, a rigorosa regressão foi executada.

A partir do subitem anterior, os valores do teste p, “teste do F parcial”, mostraram que $\frac{L}{y_h}$ e Fr_{y_h} apresentaram uma maior participação individual na regressão, refez-se o processo com a sucinta relação da Equação 6.5.

$$\frac{y_2}{y_h} = \text{função} \left(\frac{L}{y_h}, Fr_{y_h} \right) \quad (6.5)$$

Para regressão linear múltipla nesse padrão, foi detectado um problema dos programas R e Excel no cálculo do coeficiente de correlação quando se exige a condição de interseção zero. O número foi superestimado nos dois *softwares*, com valores de R^2 de 0,99. Procedeu-se então o cálculo manual. Quase nenhuma diferença nos coeficientes foi observada no ajuste com interseção ou sem, gerando-se valores de R^2 de 0,53 e coeficientes exponenciais muito próximos. Optou-se então pelo ajuste corrigido sem interseção, os resultados são mostrados na Tabela 6.10.

Tabela 6.10: Resumo da estatística de regressão (y_2/y_h) corrigida.

	Estimado	Erro	Padrão	Valor t Pr(> t)
a1	-0,14037	0,03732	-3,761	0,000639 ***
a2	2,94693	0,16369	18,003	< 2e(-16) ***
Significância: 0 "****" 0,001"***" 0,01 "****" 0,05 " " 0,1 " " 1				
Erro residual padrão 0,06463 em 34 graus de liberdade				
R quadrao múltiplo: 0,5255, R quadrao ajustado 0,5037				
Estatística-F: 5879 em 2 e 34 GL, p-valor 2,2e(-6)				

Para o “teste do F total”, com $F(0,05;2,34) = 3,285$, ou seja, ao nível de significância de 5% com 2 variáveis independentes e 34 graus de liberdade, a distribuição F de *Snedecor* retorna o valor 3,285. Conforme o valor de 5879 é maior que 3,285, rejeita-se a hipótese nula (a relação entre as variáveis não é linear). Portanto, também existe regressão para o caso.

No que tange a participação de cada variável isoladamente, conforme Naghettini e Pinto (2007), o “teste do F parcial” mostrou que os dois parâmetros adimensionais $\frac{L}{y_h}$ e Fr_{y_h} têm participação preponderante no valor de y_2/y_h . Portanto, com nível de significância de 5% (0,05) é possível ver que o valor-p é superior em todos os casos, assim, rejeita-se a hipótese nula (a variável isolada não melhora significativamente o modelo). A Equação 6.6 conclui o ajuste para essa outra configuração.

$$\frac{y_2}{y_h} = \frac{L}{y_h}^{-0,140} Fr_{y_h}^{2,947} \quad (6.6)$$

Brevemente, é possível visualizar que a participação da posição do paramento (L) e as condições hidráulicas de entrada no sistema referentes à cada vazão são preponderantes para análise dimensional. As Equações 6.6, 6.4 e 6.2 discutidas não são inválidas, apenas traduzem que a última e terceira regressão gerou a natureza total dos dados ensaiados. Acredita-se que devido à faixa de vazões, alturas de soleira e configuração fixa da descida ensaiada, não foi possível alcançar uma maior participação das demais variáveis.

O terceiro e último ajuste linear múltiplo é exibido na Figura 6.43, dessa vez atendendo-se todos os critérios globais e isolados das variáveis participantes, como discutido por Naghettini *et al.* (2017).

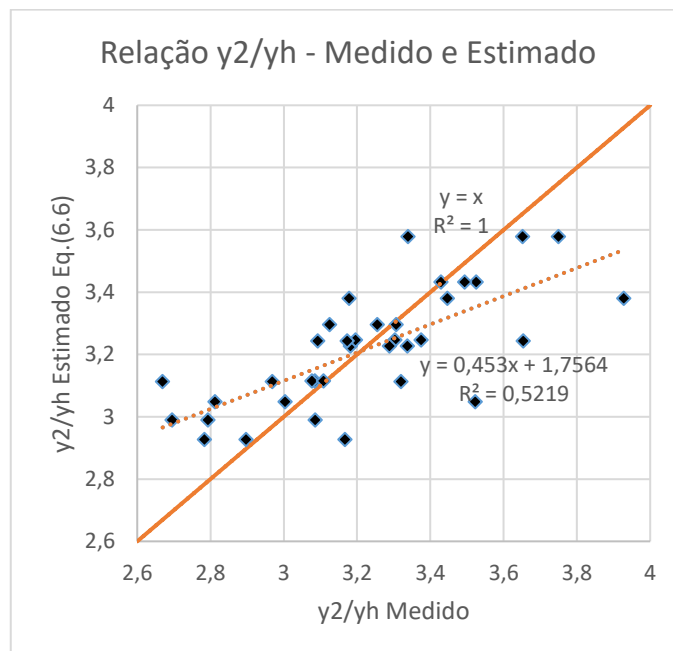


Figura 6.43: Relação entre Medido e Estimado (y_2/y_h) corrigidos.

6.3.4.1 Análise dos resíduos

O teste, *Shapiro-wilk*, para conferência da normalidade dos resíduos, retornou a estatística de teste de $W=0,96612$ e o valor- $p=0,3292$. Como nível de significância adotado é de 5% (0,05), menor que o valor- p encontrado, a hipótese nula é não é rejeitada. Ou seja, os resíduos têm distribuição normal.

Por fim, considerando também atendidos os critérios de independência e normalidade como já discutido e previsto por Naghettini *et al.* (2017), a homogeneidade de variância dos resíduos é observada no gráfico da Figura 6.44. Apresentando, portanto, indícios de homocesticidade e correta distribuição para terceira e última regressão linear múltipla.

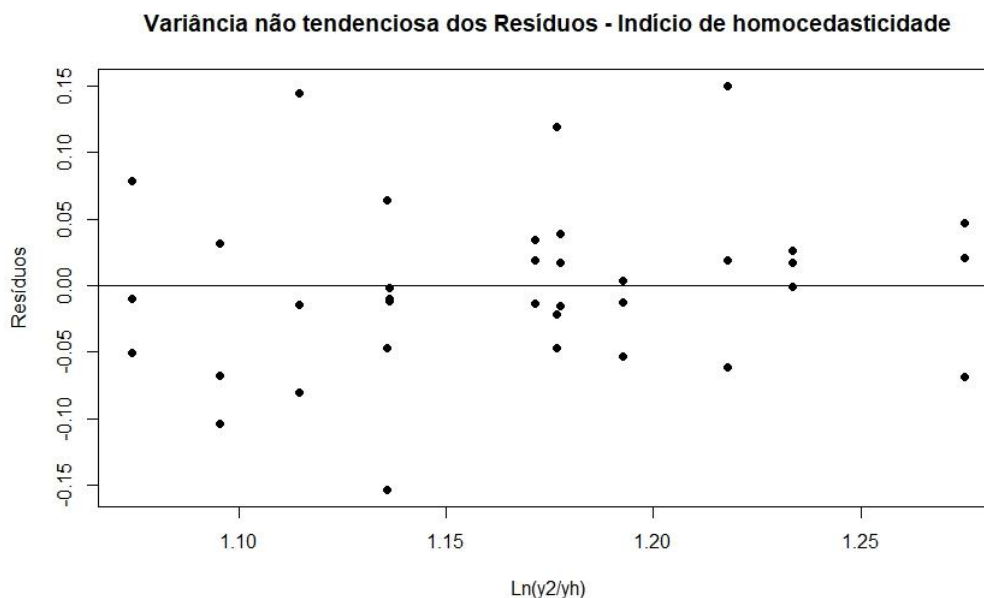


Figura 6.44: Variância dos resíduos $\ln(y_2/y_h)$ corrigida.

6.3.5 Análise física do fenômeno

A discussão precedente deu-se sobre a ótica do rigor estatístico clássico para elencar as variáveis importantes para análise do sistema. Porém, como discussão complementar, será abordada análise por gráficos adimensionais dos resultados compilados no Apêndice III.

Como existe uma dissipação parcial da energia deve-se analisar se a soleira, Δz , localizada a uma distância, L , gera um efeito sobre os parâmetros y_1 , y_2 e y_3 .

A Figura 6.45 avalia o efeito da altura da soleira, Δz , e do afastamento, L , sobre a relação y_3/y_h . Observa-se que quanto maior o afastamento, gera-se uma aumento da relação y_3/y_h , mas do ponto de vista de valores que melhor permitem reproduzir a relação y_3/y_h , todos números estão próximos da unidade, nesse sentido as soleiras de alturas $\Delta z = 3$ cm e 4 cm apresentam melhor desempenho a uma distância de afastamento de $L/L_b = 0,469$ (37,5cm / 80 cm). Confirmando os resultados encontrados pela análise estatística e indicativos de melhor escolha para outro adimensional dependente (y_2/y_h).

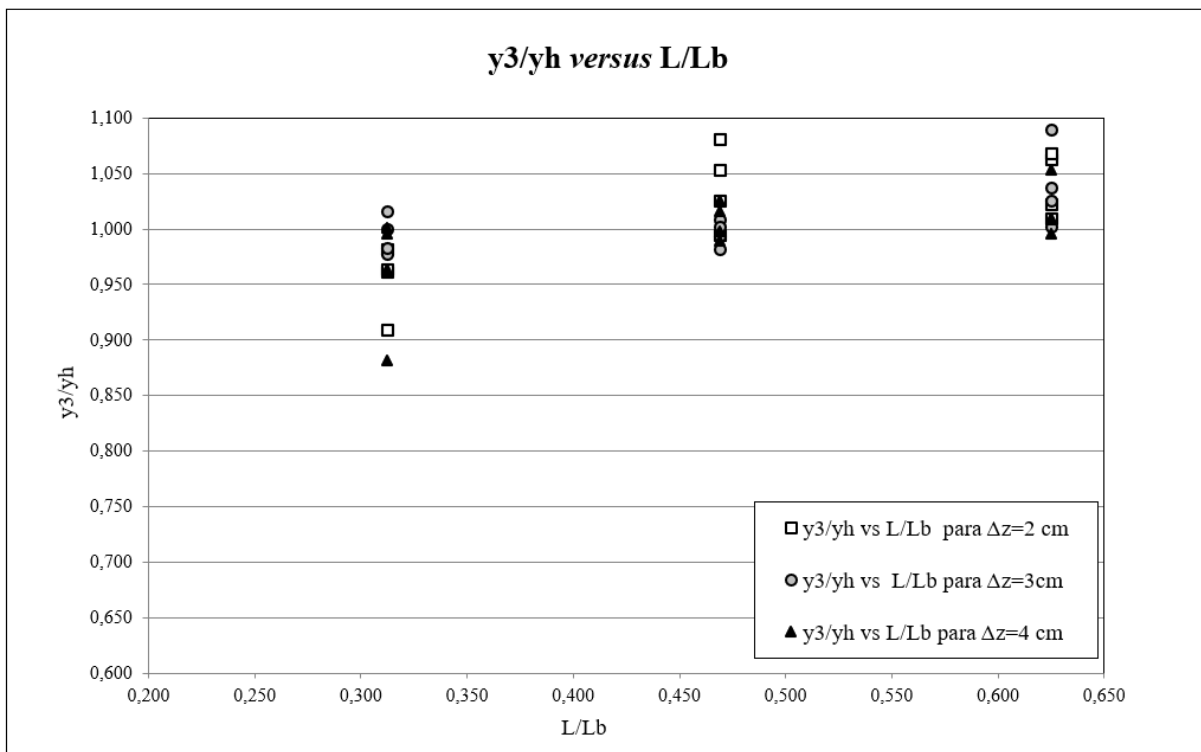


Figura 6.45: Relações entre y_3/y_h e L/L_b .

A Figura 6.46 relaciona y_h com y_1 , observa-se que para mesmos valores de y_h existe uma distribuição vertical de diferentes valores de y_1 , denotando, mais uma vez, a influência de Δz e do afastamento L .

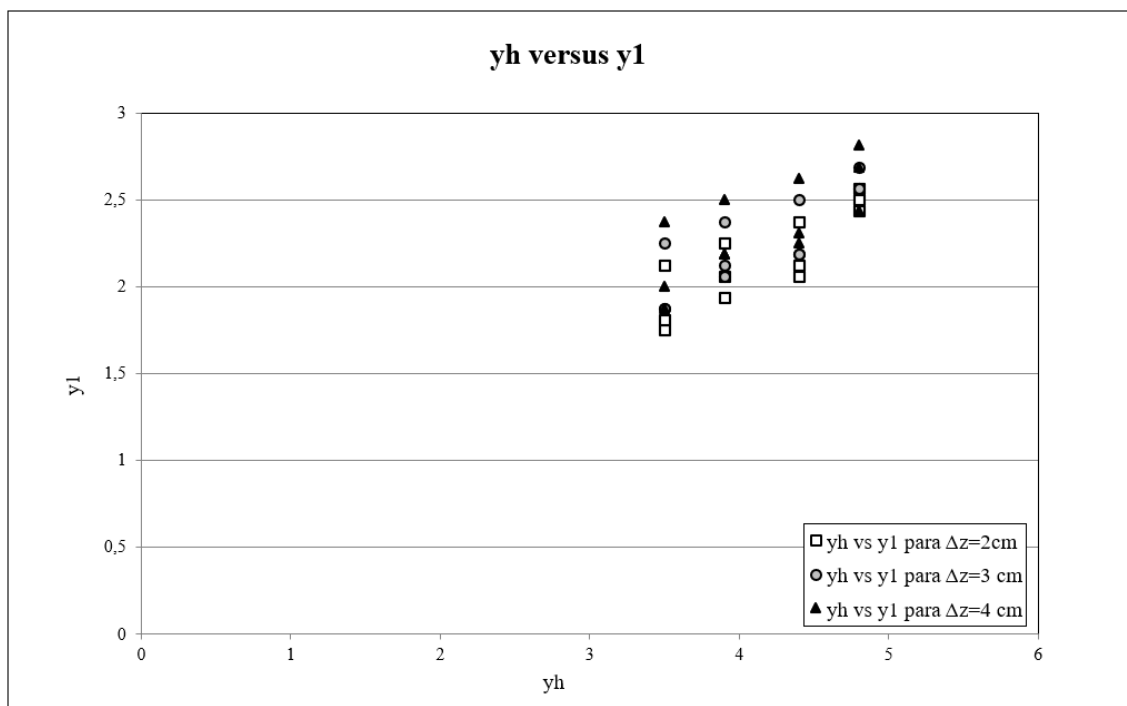


Figura 6.46: Relação entre y_h e y_1 para avaliar o efeito do afastamento e altura da soleira.

Com intuito de visualizar melhor o grau de influência de Δz e L na profundidade de pé (y_1) foi construído o gráfico que relaciona y_1/Lb e L/Lb . Pode-se inferir que, conforme maior o afastamento, menor é o valor y_1 , reduzindo o efeito da soleira sobre y_1 , como é assinalado pela seta na Figura 6.47. Analisando os valores na distribuição vertical, quanto mais próxima a soleira ao pé da estrutura da escada, maior é o efeito da altura de Δz . Porém, conforme se afasta a soleira, sucede-se uma redução da faixa de distribuição vertical dos valores de y_1 .

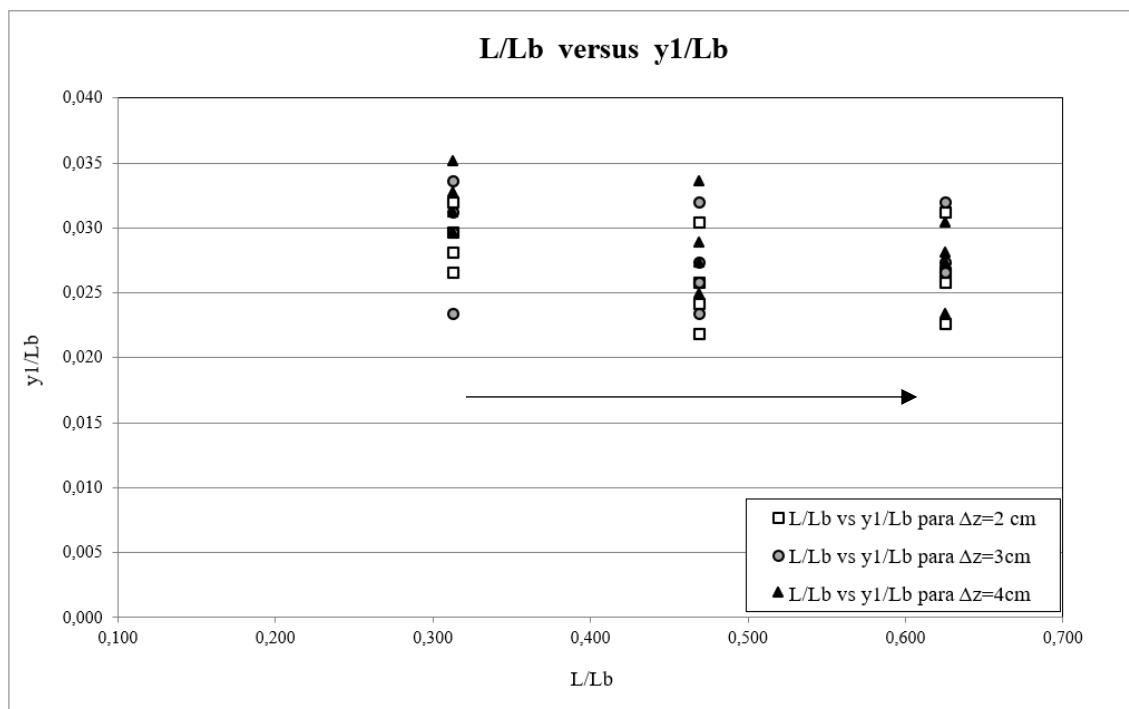


Figura 6.47: Relação y_1/Lb e L/Lb .

Por fim, para analisar-se o efeito do afastamento da soleira sobre os valores de y_2 , foi construída a Figura 6.48. Aumentando-se o afastamento da soleira, o valor de y_2 tende a reduzir-se, conforme é assinalado pela seta na Figura 6.48. Analisando-se a distribuição vertical dos valores de y_2/Lb , na primeira coluna ($L/Lb=25\text{cm}/80\text{cm}$), o efeito na elevação de y_2 é maior na soleira $\Delta z=4\text{cm}$. Com o aumento do afastamento de Δz ($L/Lb=37,5\text{cm}/80\text{cm}$ e $L/Lb=50\text{cm}/80\text{cm}$), observa-se um maior efeito da soleira $\Delta z=2\text{cm}$. Então, quando soleiras de maior altura estão mais próximas ao pé da escada, maiores são seus efeitos nas alturas de y_2 . Quando as soleiras são afastadas, maior é a eficiência na dissipação da energia, como visto para soleiras $\Delta z=3\text{ cm}$ e $\Delta z=4\text{ cm}$, gerando uma redução do valor de y_2 .

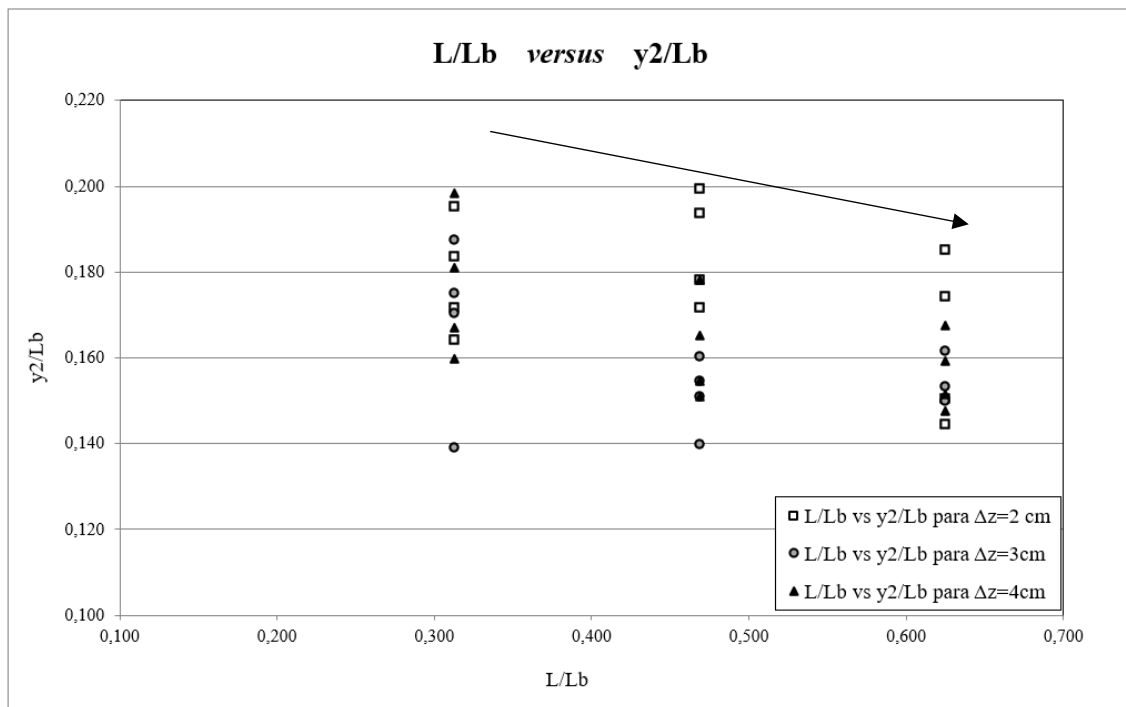


Figura 6.48: Relação entre y_2/y_h e L/Lb.

7 CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões realizadas nos itens precedentes, diversas conclusões podem ser estabelecidas no tocante às modelagens numéricas desenvolvidas e técnicas experimentais de análise por filmagem.

Observou-se que os resultados experimentais, tanto para o Cenário 1 quanto para o Cenário 2, tomadores das referências para as modelagens numéricas realizadas, foram aderentes às previsões adimensionais de outros autores. Esse fato ficou nítido quando todas as medianas são correlacionadas na forma adimensional junto as curvas experimentais constantes da literatura. Com efeito, a validação da metodologia de filmagem por alta frequência e *software* utilizado para o tratamento atenderam às necessidades experimentais de calibração dos CFD`s e investigação do Cenário 3.

Reafirmou-se o papel de instrumento dissipador de energia das descidas de água em degraus. A configuração do Cenário 2, constante dessas macro-rugosidades, apresentou perda de 88,2% de energia na calha em relação ao valor total disponível a montante, além de 70,1% de perda em relação a uma mesma descida geométrica, porém lisa, como constatado no Cenário 1. Os valores também se encontraram dentro das referências da literatura.

Para parte computacional da pesquisa, o escoamento altamente aerado não foi direto para obtenção dos resultados. A investigação dos *solvers* disponíveis em um dos *softwares* foi fundamental para melhora desses valores. De fato, a representação altamente bifásica, ar e água, é algo estressante aos modelos numéricos. Neste ramo da investigação pode-se concluir:

- O Modelo numérico 1, representante do MEF, como previsões teóricas da literatura pretérita afirmaram, é capaz de representar a fluidodinâmica computacional com boas aproximações, porém, é mais moroso e desgastante no processo, uma vez comparado ao Modelo numérico 2, que representou o MVF. Dessa forma, apenas no Cenário 2, enquanto o MEF processou o problema com 10,5 gigabytes de dados, o MVF gerou apenas 2,1 gigabytes. As funções de peso pareceram atribuir condições mais críticas e sensíveis à propagação na malha;
- Os erros em relação ao modelo físico reduzido concluem, também, um melhor desempenho para o MVF, mais utilizado pelos *softwares* comerciais disponíveis. Resumindo-se, para o Cenário 1, estrutura de controle lisa necessária para comparação à alta aeração dos degraus, o MEF (Modelo Numérico 1) errou 7,4% contra 1,9% do MVF (Modelo Numérico 2). Já

para o Cenário foco, Cenário 2, a alta aeração aumentou o desvio para 11,1% para o MEF, contra 6,0% do MVF;

- Como a vazão de dimensionamento de projeto, referência do regime deslizante sobre turbilhões, foi fixada nos modelos, as profundidades também se encontraram corretas pelo modelo físico reduzido. Esses valores ficaram na faixa máxima de 10% e 12,9% para os Cenários 1 e 2, respectivamente;
- A essência da discussão para boa modelagem numérica em degraus passou pela questão do *solver* mais adequado à condição bifásica. O Modelo numérico 2, via MVF, apresentou excelente capacidade de mistura de ar e água, medida em todos os casos estabelecidos pela condição do VOF, para o *solver multiphaseEulerFoam*. Esse recurso de aplicação dos pacotes de solução às Equações de *Navier-Stokes* pôde ser visto em todos os estudos gráficos da variável VOF apresentados, e, principalmente, pela posição de início da aeração demonstrada. Para a vazão de referência, o início da aeração deu-se no 6º degrau do modelo físico reduzido, e, exatamente, no 6º degrau do modelo numérico por meio de volumes finitos;
- Por fim, para as vazões extrapoladas no modelo escolhido, Modelo numérico 2 que trabalhou com MVF, como esperado, na condição de escoamento em quedas sucessivas (*napped flow*), o erro da velocidade final no Cenário 2 foi de menos de 1%. Conforme menores velocidades reinantes na malha projetada para 5,2 l/s, característica do regime deslizante. Nesse sentido, para a vazão máxima ensaiada do regime deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), o erro da velocidade terminal subiu para 15,3%. De fato a literatura, mais uma vez, sustentou à informação da diferença de natureza dos modelos em CFD. Uma vizinhança limitada para variações das entradas sem alteração da malha, ainda mais considerando-se o escoamento altamente aerado responsável por diferentes gradientes de velocidade e pressão no domínio de cálculo.

No tocante ao Cenário 3, aplicado a uma situação de campo, os dados experimentais foram extraídos para os sistema da descida e bacia de dissipação. O fenômeno do escoamento tipo *Weir Flow*, previsto por Hager (1992) e detectado por Conterato (2014), foi também evidenciado. Nesse sentido, o domínio das alturas das solerias foi reduzido para 4, 3 e 2 centímetros. Principalmente levando-se em conta à eficiência da remoção de energia da descida em degraus já da ordem de 88,2% frente à energia disponível a montante.

O módulo mostrou-se eficiente para Equação de regressão múltipla 6.2. Os valores chegaram, quase todos, à relação de $\frac{y_3}{y_H}$ próximo a unidade. Ou seja, para faixa de vazões ensaiada do regime deslizante sobre turbilhões e geometrias adotadas, o sistema funcionará sempre próximo da condição hidráulica de entrada e saída. Do ponto de vista do rigor estatístico, a partir de Naghettini *et al.* (2017), os resíduos da regressão tiveram distribuição normal, independência e homogeneidade de variâncias. Porém, apesar da distribuição de F *Snedecor*, pelo teste do F total, indicar a existência de regressão, a participação isolada de cada variável não foi atendida para todas aquelas elencadas na análise dimensional.

Em sequência, uma nova abordagem, a partir de $\frac{y_2}{y_H}$ foi tomada em nova análise. Esse parâmetro representou a profundidade escavada na berma e é importante no custo da obra. Todos os critérios discutidos foram atendidos, mas com participações isoladas ainda pouco representativas de algumas variáveis. Encontrou-se um coeficiente de correlação mais alto, $R^2=0,65$, neste caso, conforme Equação de regressão múltipla 6.4.

Por fim, uma última análise dimensional enquadrou-se em todos os critérios, globais e individuais, estatísticos descritos por Naghettini *et al.* (2017). Mostrou-se a importância mais relevante da posição (L) do paramento (soleira) na berma e das condições de entrada (vazão) para Equação de regressão múltipla 6.6 com $R^2=0,53$. Os testes do F total e parcial foram atendidos para cada variável isolada.

Todas as equações desenvolvidas foram suficientes à abordagem do sistema proposto. A primeira considera a entrada frente à saída, enquanto as duas últimas trabalharam com a profundidade das valas escavadas nas bermas. A eficiência do módulo é alta, uma vez que apenas na descida em degraus a dissipação foi superior a 80% de energia. Dessa forma, o sistema foi lapidado a partir das condições de “*pseudo-Weir Flow*”, geometria fixada e vazões no modelo físico reduzido de 5,2 l/s até 8,0 l/s. A faixa de variação da posição da soleira (L) foi testada evitando-se o afogamento abrupto do escoamento no pé e o salto de degraus na nova descida em sequência. Ou seja, 25, 37,5 e 50 centímetros foram adotados para (L) no modelo físico reduzido.

8 RECOMENDAÇÕES

O presente estudo foi capaz de avaliar a aplicação do Método do Elementos Finitos frente ao Método dos Volumes Finitos em descidas de água lisa e em degraus. Além de desenvolver uma análise experimental aplicada a um caso de campo para o sistema de descida e bacia de dissipação. Porém, pesquisas futuras poderiam dar sequência a este trabalho através de:

- Construção de um Modelo físico reduzido de maiores dimensões capaz de suportar maiores vazões na calha. Além disso, variação da geometria prévia, por meio de novos degraus e inclinações do paramento.
- Verifica-se, também, a necessidade de variação da rugosidade, aqui tratada em escala como concreto liso, a fim de se premeditar o comportamento do escoamento, e, conseqüentemente, do sistema proposto.
- Executar novas simulações em CFD. Para isso é fundamental o investimento em licenças dos *softwares* comerciais conceituados não disponíveis nas licenças educacionais exploradas neste trabalho.
- Construção de um centro de cálculo eletrônico com capacidade de processamento dos modelos numéricos, inclusive tridimensionais. Recurso computacional suficiente foi o principal desafio para esta pesquisa.
- Com o avanço dos recursos tecnológicos, a modelagem numérica pela fluidodinâmica será cada vez mais presente. Nesse sentido, a consciência de que as etapas de um projeto contarão com a fase de simulação, inclusive CFD quando couber, é cada vez mais eminente. Propõe-se ao Programa de Pós-Graduação o investimento em disciplinas voltadas à construção e difusão interna desse conhecimento.

REFERÊNCIAS

- AL-HASHIMI, S. A. M.; MADHLOOM, H. M.; NAHI, T. N. Experimental and Numerical Simulation of Flow Over Broad Crested Weir and Stepped Weir Using Different Turbulence Models. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, v. 21, n. 02, p. 28–45, 2017.
- ALIKHANI, A.; BEHROZI-RAD, R.; FATHI-MOGHADAM, M. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International Journal of Physical Sciences*, v. 5, n. 1, p. 25–29, 2010.
- ALTALIB, A. N.; MOHAMMED, A. Y.; HAYAWI, H. A. Hydraulic jump and energy dissipation downstream stepped weir. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 69, n. July, p. 1–7, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2019.101616>>.
- ARANTES, E. J. *Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via cfd*. 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- AUTODESK®. *Autodesk® CFD*. Disponível em: <<http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/ENU/>>. Acesso em: 29 fev. 2020.
- BAUER, W. J. Turbulent Boundary on Steep Slopes. *TRANSACTIONS, ASCE*, v. 119, p. paper n 1212, 1954.
- BAYON, A.; TORO, J.; BOMBARDELLI, F.; MATOS, J.; LOPEZ, P. Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydro-Environment Research*, v. 19, n. October 2017, p. 137–149, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jher.2017.10.002>>.
- BENNETT, P.; CHESTERTON, J.; NEEVE, D.; UCUNCU, M.; WEARING, M.; JONES, S. Use of CFD for modelling spillway performance. *Dams and Reservoirs*, v. 28, n. 2, p. 62–72, 2018.
- BENTALHA, C.; HABI, M. Free surface profile and inception point as characteristics of aerated flow over stepped spillway: Numerical study. *Journal of Water and Land Development*, v. 42, n. 1, p. 42–48, 2019.
- BOES, R. M.; HAGER, W. H. Hydraulic Design of Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 129, n. 9, p. 671–679, set. 2003. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%2907339429%282003%29129%3A9%28671%29>>.
- BRANDÃO, L. *Modelação numérica 3D de escoamentos em descarregadores de cheia. Aplicação ao descarregador de cheias complementar do aproveitamento hidroelétrico da Caniçada*. 2015. 201 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.
- CARVALHO, A. D. *Pilha de Disposição de Estéril, Jacaré, Carajás, VALE*. Disponível em: <<http://acdesenhos.com.br/projetos/>>. Acesso em: 21 nov. 2019.
- CHAMANI, M. R. *Air inception in skimming flow regime over stepped spillways*. Zürich, Switzerland: Balkema, 2000.
- CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 29, n. 6, p. 809–819, 2002.

- CHANSON, H; TOOMBES, L. Hydraulics of stepped chutes: The transition flow. *Journal of Hydraulic Research*, v. 42, n. 1, p. 43–54, 2004.
- CHANSON, H. *Energy dissipation in hydraulic structures*. 1. ed. Boca Raton, FL United States: CRC Press, 2015.
- CHANSON, H. *Hydraulic design of stepped cascades, channel, weirs and spillways*. 1. ed. New York: Pergamon, 1994.
- CHANSON, H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. *Dam Engineering*, v. 11, n. 4, p. 205–242, 2001. Disponível em: <www.nature.com>.
- CHANSON, H. Stepped spillway flows and air entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 20, n. 3, p. 422–435, 1 jun. 1993. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/193-057>>.
- CHANSON, H. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2. ed. Oxford, UK: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- CHANSON, H. *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. 1. ed. Lisse, The Netherlands: Balkema, 2002.
- CHOW, V. TE. *Hidráulica de Canales abiertos*. 1. ed. Santa fé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill International S.A, 1985.
- CONTERATO, E. *Determinação de Critérios de Dimensionamento de Soleira Terminal em Bacia de Dissipação a Jusante de Vertedouro em Degraus*. 2014. 156 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- DAI PRÁ, M. *Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade IV:1H*. 2004. 134 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- DAI PRÁ, M.; PRIEBE, P. S.; SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. Dissipação de energia do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de declividade 1V:1H. *Ingeniería del agua*, v. 20, n. 1, p. 1, 2016.
- FAEL, C.; PINHEIRO, A. N. Escoamentos em Quedas Sucessivas. Condições de Ocorrência e Energia Residual. *Associação Portuguesa de Recursos Hídricos*, v. 24, n. 1, p. 39–50, 2003.
- FARIA, T. M. G. A. *Modelação numérica de escoamentos sobre descarregadores em degraus*. 2014. 92 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. *Computational methods for fluid dynamics*. 3. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.
- FLOW-3D®. *FLOW-3D® Documentation*. Disponível em: <<https://www.flow3d.com/resources/cfd-101/modeling-techniques/favor-vs-body-fitted-coordinates/>>.
- GOMES, J. F. *Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade IV:0,75H*. 2006. 195 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

HAGER, W. H. *Energy dissipators and hydraulic jump*. 1. ed. Zurich , Switzerland: Springer-Science+Business Media, B.V., 1992.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, v. 39, n. 1, p. 201–225, jan. 1981. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021999181901455>>.

HORNER, M. W. *An Analysis of Flow on Cascades of Steps*. 1969. 357 f. Tese , University of Birmingham, UK, 1969.

LIRA, V. M. P. *Numerical modeling of a 90° open- channel confluence flow using openfoam cfd*. 2014. 86 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. C. Descarregadores de Cheias em Degraus: Posição Actual da Avaliação da Disipação de Energia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, Recife. Anais.. 1995, Recife: ABRH, 1995. p. 65–71.

MEDHI, B. J.; SINGH, A.; THOKCHOM, A. K.; MAHAPATRA, S. Experimental and computational study on flow over stepped spillway. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 33, n. 5, p. 2101–2112, 2019.

MEIRELES, I.; RENNA, I.; MATOS, J.; BOMBARDELLI, F. Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, n. Inglaterra, 2012.

MIRANDA, D. A. DE. *Análise Experimental e Numérica de Padrões de escoamento e de Deposição de Sedimentos Em Reservatórios Retangulares Rasos: Influência do Posicionamento dos Canais de Entrada e de Saída*. 2019. 246 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L.; DARWISH, M. *The finite volume method in computational fluid dynamics*. 1. ed. Switzerland: Springer, 2015.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A.; COSTA, V.; FERNANDES, W.; SILVA, A. T. *Fundamentals of statistical hydrology*. 1. ed. Switzerland: Springer, 2017.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: CPRM, 2007.

NOVAKOSKI, C. K.; CONTERATO, E.; MARQUES, M.; TEIXEIRA, E. D.; LIMA, G. A.; MESS, A. Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. *RBRH*, v. 22, n. 0, p. 1–8, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S231803312017000100213&lng=en&tlng=en>.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M.; CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Onset of skimming flow on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 127, n. 6, p. 524–525, 2001.

OHTSU, I.; YASUDA, Y. Characteristics of Flow Conditions on Stepped Channels. In: CONGRESS-INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR HYDRAULIC RESEARCH, 27th, 1997. San Francisco-CA. Proceedings...San Francisco: American Society of Civil Engineers, 1997. p.583-588. 1997, [S.l: s.n.], 1997.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 130, n. 9, p. 860–869, 2004.

OLIVEIRA, D. T. DE. *Teoria da semelhança e considerações sobre projeto exploração de modelos fluviais*. 1. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1980.

OPENFOAM®. *User Guide - OpenFOAM®*. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/standard-solvers.php>>. Acesso em: 13 maio 2020.

OSMAR, F. M. *Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade IV:0,75H*. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PADULANO, R.; FECAROTTA, R.; GIUDICE, G.; ASCE, M.; CARRAVETTA, A. Hydraulic Design of a USBR Type II Stilling Basin. *J. Irrig. Drain Eng.*, v. 143, n. 5, p. 1–9, 2017. Disponível em: <doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001150.>.

RAJARATNAM, N. Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 116, n. 4, p. 587–591, 1990.

RAJARATNAM, N.; CHAMANI, M. R. Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 126, n. 4, p. 361–368, 1999.

SALMASI, F.; SAMADI, A. Experimental and numerical simulation of flow over stepped spillways. *Applied Water Science*, v. 8, n. 8, p. 1–11, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13201-018-0877-5>>.

SANAGIOTTO, D. *Características do escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade IV:0,75H*. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHLICHTING, H. *Boundary-layer Theory*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1979.

SHOJA, F.; NIKPOUR, M. R.; SADEGHI, H. Determination of Energy Dissipation in Stepped Spillways Using Finite Element and Finite Volume Methods. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, v. 3, n. 4, p. 150–155, 2013.

SIMÕES, A.L.A. *Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento*. 2008. 286 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-21072008-141151/pt-br.php>>.

SORENSEN, R. M. Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. III, n. 12, p. 1461–1472, 1985.

STEPHENSON, D. Energy dissipation down stepped spillways. *Water Power & Dam Construction*, v. 43, n. 9, p. 27–30, 1991.

TASSINARI, L. C. DA S.; SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M.; LAUFFER, L.; NETO, E. F. T. Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. January, p. 1–17, 2020.

TEIXEIRA, E. D. *Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo*

em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. 2008. 293 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

TOZZI, M. J. *Caracterização/Comportamento de escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus*. 1992. 302 f. Tese (Doutorado em Hidráulica) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

USBR. *UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION. Design of Small Dams*. 3. ed. Washington: Water Resources Technical Publication, 1987.

VALERO, D.; BUNG, D. B.; CROOKSTON, B. M. Energy dissipation of a Type III basin under design and adverse conditions for stepped and smooth spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 144, n. 7, 2018.

VALERO, DANIEL; BUNG, D. B. Development of the interfacial air layer in the non-aerated region of high-velocity spillway flows. Instabilities growth, entrapped air and influence on the self-aeration onset. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 84, p. 66–74, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.012>>.

VERSTEEG, H. . K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to the computational fluid dynamics*. 2. ed. London: Pearson, 2007.

VIANNA, M. R.; BRAZ, M. DA G.; SILVA, E. F. DA S. IX-019- Desempenho hidráulico de dissipadores contínuos em degraus e sua relação com o ressalto hidráulico: estudo de caso e recomendações para trabalho experimental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2013, Goiânia. Anais.. 2013, Goiânia: ABES, 2013.

XU, W. L.; LUO, S. J.; ZHENG, Q. W.; LUO, J. Experimental study on pressure and aeration characteristics in stepped chute flows. *Science China Technological Sciences*, v. 58, n. 4, p. 720–726, 2015.

ZHAN, J.; ZHANG, J.; GONG, Y. Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, v. 6, n. 3, p. 139–142, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.taml.2016.03.003>>.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the developing flow region of stepped spillways. I: Physical modeling and boundary layer development. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 142, n. 7, p. 1–8, 2016a.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the developing flow region of stepped spillways. II: Pressure and velocity fields. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 142, n. 7, p. 1–9, 2016b.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Self-aeration in the rapidly- and gradually-varying flow regions of steep smooth and stepped spillways. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 17, n. 1, p. 27–46, 2017.

APÊNDICE I – DADOS EXPERIMENTAIS CENÁRIO 1

Vazão (l/s)	2	3	4	5,2	6	7	8
Velocidades (m/s)	2,55	2,93	3,08	3,98	3,58	3,65	4,1
	2,7	2,93	3,08	3,84	3,89	3,88	4,1
	2,48	2,89	3,55	3,95	3,71	4,09	4,12
	2,68	3,09	3,13	4,02	3,98	4,09	4,18
	2,55	3,22	3,4	3,76	3,85	4,09	4,05
	2,45	2,83	3,24	3,53	3,79	4,28	4,05
	2,55	2,82	3,28	3,7	3,96	3,83	4,1
	2,18	2,75	2,98	3,67	3,71	4,02	3,91
	2,4	2,86	3,11	3,57	3,89	4	4,1
	2,45	2,8	3,5	3,72	3,89	3,83	3,48
	2,5	3,1	3,2	3,77	3,98	4,09	4,18
	2,55	3,2	3	3,7	3,85	4,28	4,05
	2,52	2,85	3	3,88	3,79	3,85	4,05
	2,2	2,86	3,45	4,06	3,85	4,02	4,15
	2,51	2,85	3,3	3,75	3,9	4	3,95

Vazão(l/s)	2	3	4	5,2	6	7	8
Vel. mín(m/s)	2,18	2,75	2,98	3,53	3,58	3,65	3,48
Vel. máx(m/s)	2,7	3,22	3,55	4,06	3,98	4,28	4,18
Vel. Mediana (m/s)	2,51	2,86	3,19	3,76	3,85	4,02	4,1

APÊNDICE II – DADOS EXPERIMENTAIS CENÁRIO 2

19/12/2019							
Vazão(l/s)	5,2	2	3	4	6	7	8
Velocidades(m/s)	2,02	1,17	1,46	1,55	2,01	2,07	2,24
	1,88	1,21	1,56	1,54	2,12	2,09	2,29
	1,92	1,5	1,49	1,67	2,09	2,06	2,13
	2,02	1,3	1,38	1,69	2,11	2,03	2,18
	2,1	1,3	1,37	1,71	2,13	2,2	2,19
	1,98	1,4	1,49	1,75	2,02	2,1	2,19
	2,05	1,3	1,46	1,55	2,01	2,13	2,22
	1,97	1,32	1,33	1,79	2,06	2,22	2,29
	2	1,18	1,44	1,68	2,19	2,08	2,25
26/12/2019							
Vazão(l/s)	5,2	2	3	4	6	7	8
Velocidades(m/s)	2,12	1,4	1,43	1,9	1,99	2,1	2,21
	1,88	1,41	1,33	1,76	2,05	2,01	2,27
	2,02	1,32	1,46	1,47	2,07	2,33	2,21
	1,98	1,18	1,35	1,58	2,17	2,1	2,1
	1,98	1,21	1,32	1,76	2,07	2,33	2,09
	1,84	1,17	1,43	1,64	2,09	2,07	2,18
	1,84	1,21	1,57	1,64	2,17	2,13	2,23
	1,86	1,32	1,56	1,46	2,2	2,21	2,33
	2	1,26	1,44	1,58	2,21	2,02	2,29
07/01/2020							
Vazão(l/s)	5,2	2	3	4	6	7	8
Velocidades(m/s)	1,86	1,2	1,32	1,79	2,06	2,09	2,12
	1,89	1,29	1,39	1,49	2,17	2,18	2,19
	1,95	1,39	1,46	1,48	2,18	2,04	2,17
	2,1	1,38	1,56	1,59	2,04	2,31	2,22
	2,05	1,36	1,44	1,58	2,19	2,19	2,18
	1,9	1,34	1,44	1,61	2,14	2,11	2,19
	1,85	1,33	1,51	1,62	2,02	2,1	2,17
	1,9	1,28	1,32	1,76	2,09	2,23	2,29
	2,01	1,27	1,47	1,79	2,04	2,3	2,31

Vazão(l/s)	5,2	2	3	4	6	7	8
Vel. mín(m/s)	1,84	1,17	1,32	1,46	1,99	2,01	2,09
Vel. máx(m/s)	2,12	1,5	1,57	1,9	2,21	2,33	2,33
Vel. Mediana (m/s)	1,98	1,3	1,44	1,64	2,09	2,1	2,21

APÊNDICE III – DADOS EXPERIMENTAIS CENÁRIO 3

Vazão (l/s)	yh(cm)			y1(cm)			y2(cm)			y3(cm)			Δz(cm)	L(cm)
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima		
5,2	3,42	3,5	3,58	1,875	2,125	2,375	12,5	13,125	13,75	2,5	3,4375	4,375	2	25
6	3,75	3,9	4,05	2	2,25	2,5	12,5	13,75	15	3,125	3,75	4,375	2	25
7	4,22	4,4	4,58	2,125	2,375	2,625	13,125	14,6875	16,25	3,25	4	4,75	2	25
8	4,61	4,8	4,99	2,25	2,5625	2,875	14,25	15,625	17	3,75	4,625	5,5	2	25
5,2	3,42	3,5	3,58	1,125	1,75	2,375	12,5	13,75	15	2,8125	3,6875	4,5625	2	37,5
6	3,75	3,9	4,05	1,375	1,9375	2,5	13,125	14,25	15,375	3,625	4	4,375	2	37,5
7	4,22	4,4	4,58	1,5	2,0625	2,625	13,75	15,5	17,25	3,75	4,375	5	2	37,5
8	4,61	4,8	4,99	1,625	2,4375	3,25	13,75	15,9375	18,125	4,75	5,1875	5,625	2	37,5
5,2	3,42	3,5	3,58	1,25	1,8125	2,375	10	11,5625	13,125	3,125	3,71875	4,3125	2	50
6	3,75	3,9	4,05	1,25	2,0625	2,875	10,625	12,0313	13,4375	3,125	3,9375	4,75	2	50
7	4,22	4,4	4,58	1,5	2,125	2,75	12,5	13,9375	15,375	3,75	4,5	5,25	2	50
8	4,61	4,8	4,99	1,75	2,5	3,25	13,125	14,8125	16,5	3,75	5,125	6,5	2	50
5,2	3,42	3,5	3,58	2	2,25	2,5	10,625	11,6875	12,75	2,625	3,5	4,375	3	25
6	3,75	3,9	4,05	2,125	2,375	2,625	12,25	13,625	15	3	3,8125	4,625	3	25
7	4,22	4,4	4,58	2,25	2,5	2,75	12,5	14	15,5	3,625	4,46875	5,3125	3	25
8	4,61	4,8	4,99	2,375	2,6875	3	13,75	15	16,25	3,25	4,71875	6,1875	3	25
5,2	3,42	3,5	3,58	1,25	1,875	2,5	10	11,125	12,25	2,75	3,4375	4,125	3	37,5
6	3,75	3,9	4,05	1,5	2,0625	2,625	11,25	12,0625	12,875	2,75	3,875	5	3	37,5
7	4,22	4,4	4,58	1,625	2,1875	2,75	11,25	12,375	13,5	3,75	4,4375	5,125	3	37,5
8	4,61	4,8	4,99	1,75	2,5625	3,375	11,375	12,8125	14,25	3,75	4,8125	5,875	3	37,5
5,2	3,42	3,5	3,58	1,25	1,875	2,5	9,75	11,1875	12,625	2,875	3,8125	4,75	3	50

Vazão (l/s)	yh(cm)			y1(cm)			y2(cm)			y3(cm)			Δz(cm)	L(cm)
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima		
6	3,75	3,9	4,05	1,25	2,125	3	11,125	12	12,875	2,75	4	5,25	3	50
7	4,22	4,4	4,58	1,5	2,1875	2,875	11,375	12,25	13,125	4	4,5625	5,125	3	50
8	4,61	4,8	4,99	1,75	2,5625	3,375	12	12,9375	13,875	4	4,8125	5,625	3	50
5,2	3,42	3,5	3,58	2,125	2,375	2,625	11,8125	12,7813	13,75	2,75	3,375	4	4	25
6	3,75	3,9	4,05	2,25	2,5	2,75	12,5	13,375	14,25	2,625	3,4375	4,25	4	25
7	4,22	4,4	4,58	2,375	2,625	2,875	12,9375	14,4688	16	3,25	4,40625	5,5625	4	25
8	4,61	4,8	4,99	2,5	2,8125	3,125	14,25	15,875	17,5	3,3125	4,78125	6,25	4	25
5,2	3,42	3,5	3,58	1,375	2	2,625	11,25	12,0625	12,875	2,4875	3,49375	4,5	4	37,5
6	3,75	3,9	4,05	1,625	2,1875	2,75	11,5	12,375	13,25	3,125	4	4,875	4	37,5
7	4,22	4,4	4,58	1,75	2,3125	2,875	12,25	13,2188	14,1875	3,75	4,46875	5,1875	4	37,5
8	4,61	4,8	4,99	1,875	2,6875	3,5	13	14,25	15,5	3,9375	4,75	5,5625	4	37,5
5,2	3,42	3,5	3,58	1,25	1,875	2,5	11,125	11,8125	12,5	3,4375	3,6875	3,9375	4	50
6	3,75	3,9	4,05	1,5	2,1875	2,875	11,375	12,125	12,875	3,125	3,9375	4,75	4	50
7	4,22	4,4	4,58	1,625	2,25	2,875	12,375	12,75	13,125	3,75	4,4375	5,125	4	50
8	4,61	4,8	4,99	1,75	2,4375	3,125	12,5	13,4063	14,3125	4,1875	4,78125	5,375	4	50