

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

LUCAS CAMARGO DA SILVA TASSINARI

ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS DE ALTA
DECLIVIDADE: ANÁLISE DE INCERTEZAS COM UMA ABORDAGEM
COMPUTACIONAL

PORTO ALEGRE

2022

LUCAS CAMARGO DA SILVA TASSINARI

ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS DE ALTA
DECLIVIDADE: ANÁLISE DE INCERTEZAS COM UMA ABORDAGEM
COMPUTACIONAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de doutor.

Orientadora: Profa. Dra. Daniela Guzzon Sanagiotto

PORTO ALEGRE

2022

CIP - Catalogação na Publicação

Tassinari, Lucas Camargo da Silva
Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Alta Declividade: análise de incertezas com uma abordagem computacional / Lucas Camargo da Silva Tassinari. -- 2022.
192 f.
Orientadora: Daniela Guzzon Sanagiotto.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Vertedouros em degraus. 2. Modelagem hidráulica.
3. Modelagem computacional. I. Sanagiotto, Daniela Guzzon, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LUCAS CAMARGO DA SILVA TASSINARI

ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS DE ALTA
DECLIVIDADE: ANÁLISE DE INCERTEZAS COM UMA ABORDAGEM
COMPUTACIONAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito à obtenção do grau de doutor.

Profa. Dra. Daniela Guzzon Sanagiotto – UFRGS
Orientadora

Prof. Dr. Jorge de Saldanha Gonçalves Matos – IST
Examinador

Prof. Dr. André Luiz Andrade Simões – UFBA
Examinador

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques – UFRGS
Examinador

Prof. Dra. Carolina Kühn Novakoski – UFSM
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Esta tese de doutorado foi desenvolvida dentro do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação da professora Daniela Guzzon Sanagiotto, a quem registro especial agradecimento.

Posso afirmar, certamente, que a minha jornada acadêmica junto à professora Daniela excedeu a técnica e a ciência, tendo sido essencial ao término deste documento a sua singular postura e dedicação nas orientações, características as quais espero ser capaz de reproduzir na minha vida profissional.

Agradeço à minha esposa Graziela pelo apoio incondicional, por ser uma inspiração, e pelo presente dado durante o doutorado, o Otávio, que certamente motivou mais que tudo o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço aos meus pais, entre muitos motivos, por terem embasado a minha curiosidade, que alimenta a busca pelo conhecimento necessário à elaboração desta tese.

Aos professores do IPH, registro minha admiração e agradecimento pelos conhecimentos transmitidos. Agradeço especialmente aos professores Marcelo Marques, Luiz Endres, Maurício Dai Prá e Eder Teixeira, do Laboratório de Obras Hidráulicas, pelo apoio necessário a essa pesquisa.

A elaboração desse texto precede o rito de defesa da tese, oportunidade que será de muito aprendizado junto aos professores Jorge Matos, André Simões, Marcelo Marques e Carolina Novakoski. Contudo, registro o meu agradecimento a estes excepcionais pesquisadores, desde já, pelas suas contribuições à ciência e mais especificamente ao estudo de estruturas hidráulicas. Seus textos alicerçaram estas páginas, como se observa ao longo das inúmeras citações, as quais eu gostaria que fossem traduzidas, de certa forma, como pequenos agradecimentos ao longo do texto.

Aos colegas de pesquisa do Laboratório de Obras Hidráulicas, agradeço pelo apoio moral e intelectual dado ao longo dos últimos anos, em especial às colegas Carol, Rute e Eliane, pelas discussões, e às colegas Isadora e Luísa, que se dedicaram a muitos resultados que compõem este trabalho. O convívio frequente com essas colegas e professores certamente fez falta durante o período de pandemia que ocorreu durante a elaboração dessa tese.

Agradeço aos colegas e amigos Arthur, Marcele, Pedro e Marcelle pela parceria profissional e pessoal ao longo dos anos. Que venham os próximos desafios!

Enfim, agradeço também o apoio financeiro do Projeto de P&D intitulado “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Forçada (Pré-Aeração)” firmado entre LAHE/DEC/FURNAS e FAURGS/IPH/UFRGS.

*“Quero assistir ao sol nascer,
Ver as águas dos rios correr,
Ouvir os pássaros cantar,
Eu quero nascer, quero viver.”*

(Candeia, 1976)

RESUMO

Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Alta Declividade: análise de incertezas com uma abordagem computacional

Estudos experimentais desenvolvidos ao longo dos anos caracterizaram o escoamento sobre diferentes configurações de vertedouros em degraus. Por outro lado, a modelagem computacional tem se mostrado uma importante ferramenta para a análise de escoamentos, com potencial para complementar estudos experimentais, os quais são suscetíveis aos efeitos de escala, de medição e do próprio modelo ou método aplicado. Nesse sentido, essa tese investigou possíveis efeitos de simplificações e limitações das metodologias tradicionalmente aplicadas à modelagem física. Para tanto, utilizou-se uma abordagem com fluidodinâmica computacional aplicada a vertedouros em degraus com alta declividade (1V:0,75H) para investigar os efeitos de medição em pressões, os efeitos de escala e os efeitos de simplificações adotadas em estudos de dissipação de energia quando aplicados ao dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico. Foram desenvolvidos dois modelos computacionais com geometrias semelhantes, utilizando-se técnicas com RANS. Para o estudo de efeitos de medição em pressões e efeitos de escala, o vertedouro foi modelado no software Ansys CFX, com modelo de turbulência $k-\epsilon$, modelo multifásico homogêneo e modelo de superfície livre na interface. Para o estudo de dissipação de energia, duas estruturas foram modeladas no software Ansys Fluent, sendo um vertedouro em degraus com aeração natural e outro com aeração induzida por defletor e câmara de ar. Nesses casos, utilizou-se o modelo de turbulência SST $k-\omega$, modelo multifásico Euleriano e modelo Symmetric para interação entre fases. A partir dos resultados obtidos, foram sugeridos valores de frações de água que melhor definem a superfície livre nas diferentes regiões do escoamento, foram sugeridas regiões para instalação de medidores de pressão de forma que as pressões extremas sejam capturadas nos degraus, foi sugerida uma nova abordagem computacional com fluidos hipotéticos para estudos de efeitos de escala, verificou-se que a indução de ar por defletor e câmara de ar não altera significativamente a dissipação de energia ao longo da calha e verificou-se que diferentes simplificações e incertezas comuns aos estudos experimentais de dissipação de energia ao longo da calha não representam impactos significativos no dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico.

Palavras-chave: Vertedouros em Degraus. CFD. Modelagem Hidráulica. Efeitos de Escala. Dissipação de Energia. Escoamento Deslizante sobre Turbilhões.

ABSTRACT

Flow Over Steeply Sloping Stepped Spillways: uncertainty analysis with a computational approach

Studies developed among the years with physical modeling were used to characterize skimming flow over stepped spillways with different configurations. In the other hand, Computational Fluid Dynamics (CFD) has been shown an important tool to analyze hydraulic structures, with a great potential to complement physical modeling studies, which are susceptible to scale, measurement, and model effects. In that sense, this thesis investigated possible effects of simplifications and limitations of methodologies traditionally applied to physical modeling. For that, it was used and approach with CFD applied to steeply sloping stepped spillways (1V:0,75H) to investigate measurement effects on pressure data, scale effects and effects of methodologies simplifications adopted at energy dissipation studies applied to hydraulic jump stilling basins design. Two numerical models were developed for different geometries both using RANS techniques. For the studies of measurement effects on pressure and of scale effects, the spillway was modeled in Ansys CFX, with the turbulence model $k-\epsilon$, multiphase homogeneous model and free surface at the interface. For the energy dissipation study, two spillways were modeled in Ansys Fluent, being one a self-aerated stepped spillway and other a stepped spillway with aeration induced by deflector and air chamber. In these cases, the SST $k-\omega$ turbulence model and the Eulerian multiphase model were used, together with the Symmetric model for the interaction between phases. The obtained results showed the best values of water fraction to define free surface in the nonaerated and aerated regions and the best regions for installing pressure gauges to capture extreme pressures in the steps. A new CFD approach with hypothetical fluids was suggested for scale effects studies. It was verified that the induction of air by deflector and air chamber does not significantly alter the energy dissipation along the chute and it was verified that different simplifications and uncertainties common to the experimental studies of energy dissipation along the chute do not represent significant impacts on the design of hydraulic jump stilling basins.

Keywords: Stepped Spillways. CFD. Hydraulic Modelling. Scale Effects. Energy Dissipation. Skimming Flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1. Vertedouros em Degraus: (a) Vertedouro da Barragem do Ribeirão João Leite, da SANEAGO – Saneamento de Goiás S. A., Goiânia, GO; (b) Vertedouro da Barragem da UHE Dona Francisca, do Consórcio Dona Francisca, Nova Palma, RS.....	23
Figura 1.2. Visão geral do trabalho e a relação entre os assuntos abordados na tese.....	30
Figura 2.1. Critérios para determinar os regimes de escoamento: (a) curvas de diferentes autores e (b) análise das 04 regiões principais.	34
Figura 2.2. Regiões do escoamento deslizante sobre turbilhões (Skimming Flow).	35
Figura 2.3. Resultados obtidos por diferentes autores e ajuste para previsão do (a) comprimento do início da aeração – L_a e (b) profundidade – h_a , em função do número de Froude rugoso.	38
Figura 2.4. Aplicação prática de um dispositivo de aeração em uma calha do vertedouro da barragem Pedro do Cavalo, Brasil.....	40
Figura 2.5. Esquema de instalação de um defletor com configuração (a) a montante do primeiro degrau e (b) no primeiro degrau.	42
Figura 2.6. Regiões do escoamento em um vertedouro em degraus com defletor no início da calha e variáveis utilizadas nas equações apresentadas em Pfister, Hager e Minor (2006a).	42
Figure 3.1. Physical model with steps 0.06 m height: (a) photo of the structure during a test and (b) sketch of the structure with coordinates of the pressure taps and external edges of monitored steps (adapted from Sanagiotto, 2003).	60
Figure 3.2. Domain and boundary conditions used in the numerical model.	63
Figure 3.3. A medium grid in the region on the first steps of the stepped spillway and the water fraction (α) at the end of the simulation.	65
Figure 3.4. Pressure heads at the horizontal faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results for the grid testing, for the specific discharge $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	68
Figure 3.5. Pressure heads at the horizontal faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results with medium grid and experimental data for the model validation ($q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$); in the model scaled 1:10.	69
Figure 3.6. Pressure heads at the vertical faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results for the grid testing, for the specific discharge $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	70

Figure 3.7. Pressure heads at the vertical faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results with medium grid and experimental data for the model validation ($q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s/m}$); in the model scaled 1:10.....	70
Figure 3.8. Mean depths obtained experimentally and isolines of mean depths obtained numerically for the specific discharge $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s/m}$ for water fraction values from $\alpha = 0.90$ to $\alpha = 0.10$ along steps 01 to 25.	72
Figure 3.9. Velocity profiles from numerical results in the development of the boundary layer in the outer corners of steps 3 to 14 and profile adjusted with a power law with exponent $N = 3.9$ for a specific discharge $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s/m}$	74
Figure 3.10. Velocity profiles from numerical results in the aerated region (steps 15 to 25, for $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s/m}$) in the outer corners and profiles adjusted with power laws.	76
Figure 3.11. Nondimensional pressure profiles (P/P_{max}) for different relative positions (x/l) along the horizontal faces of steps in the nonaerated region (steps 3 to 21), the average mean pressure profile from numerical results with $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s/m}$ and experimental data found in the literature.....	77
Figure 3.12. Nondimensional pressure profiles (P/P_{min}) for different relative position (y/h) along the vertical faces of steps in the nonaerated region (steps 4 to 21), the average mean pressure profile from numerical results with $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s/m}$ and experimental data found in the literature.....	78
Figure 3.13. Probability distribution coefficients ($N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$) in steps 6, 12, 18 and 24 for different relative positions (a) in the vertical faces (y/h) and (b) in the horizontal faces (x/l), obtained from the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008).....	80
Figure 3.14. Standard deviation values for instantaneous pressures along the vertical faces obtained from the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008) in the (a) nonaerated region and (b) aerated region.	81
Figure 3.15. Standard deviation values for instantaneous pressures along the horizontal faces obtained from the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008) in the (a) nonaerated region and (b) aerated region.	82
Figura 4.1. Cargas de pressão no espelho do degrau 06. Região não aerada.....	111
Figura 4.2. Cargas de pressão no espelho do degrau 12. Região não aerada.....	111
Figura 4.3. Cargas de pressão no espelho do degrau 18. Região não aerada.....	111
Figura 4.4. Cargas de pressão no espelho do degrau 24. Região aerada.....	111

Figura 4.5. Cargas de pressão no patamar do degrau 06. Região não aerada.	112
Figura 4.6. Cargas de pressão no patamar do degrau 12. Região não aerada.	112
Figura 4.7. Cargas de pressão no patamar do degrau 18. Região não aerada.	112
Figura 4.8. Cargas de pressão no patamar do degrau 24. Região aerada.	112
Figura 4.9. Cargas de pressão no espelho do degrau 18. Simulações sem semelhança dinâmica. Região não aerada.....	114
Figura 4.10. Cargas de pressão no patamar do degrau 18. Simulações sem semelhança dinâmica. Região não aerada.....	114
Figure 4.11. Cargas de pressão no espelho do degrau 24. Simulações sem semelhança dinâmica. Região aerada.....	115
Figure 4.12. Cargas de pressão no patamar do degrau 24. Simulações sem semelhança dinâmica. Região aerada.....	115
Figura 5.1. Alturas de barragens de concreto e alvenaria que constam no Cadastro Nacional de Barragens do CBDB.	130
Figura 5.2. Instalações do Modelo LOH II. Cortesia de Carolina Novakoski.	135
Figura 5.3. Foto das instalações e esquema do sistema de indução de ar do Modelo LOH II, sendo (a) um corte transversal e (b) uma vista frontal da região da crista. Cortesia de Carolina Novakoski.	135
Figura 5.4. Geometria considerada para o defletor no Modelo LOH II. Cortesia de Carolina Novakoski.	136
Figura 5.5. Vista parcial da estrutura simulada do Modelo Físico LOH II: região próxima à crista da estrutura para (a) as simulações com aeração natural e para (b) as simulações com aeração induzida.	137
Figura 5.6. Velocidades médias junto às quinas dos degraus para as três malhas testadas para uma vazão específica $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	145
Figura 5.7. Cargas de pressão nos patamares dos degraus ao longo da calha, entre os degraus 5 e 20: resultados das simulações numéricas com a malha intermediária e dados experimentais de Matos et al. (2022) para a validação do modelo computacional. Não há valor experimental para o degrau 17.	146
Figura 5.8. Perfis de concentração de ar para o escoamento naturalmente aerado, com $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$: resultados numéricos e perfis teóricos obtidos a partir de um modelo de difusão para os degraus (a) 11, (b) 15, (c) 20 e (d) 25.	147

Figura 5.9. Profundidades adimensionalizadas ao longo da calha em degraus para $q = 0,15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ – resultados experimentais (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008) e numéricos, obtidos com os modelos multifásicos homogêneo no Ansys CFX (equivalente ao VOF, em linha tracejada) (TASSINARI et al., 2020) e Euleriano no Ansys Fluent (resultados do presente estudo, em linha contínua).	149
Figura 5.10. Resultados numéricos obtidos no presente estudo de dissipação de energia em relação à energia de montante para $q = 0,30\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q = 0,45\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ na região não aerada, comparados com os dados e proposições de outros pesquisadores. Na legenda, “ α ” refere-se à fração de água e “ α_c ” ao coeficiente de Coriolis.	150
Figura 5.11. Valores de diferença de energia adimensionalizada ($\Delta E/E_m$) para as simulações com coeficiente de Coriolis igual a 1,0 e variado e valores de Coeficiente de Coriolis para diferentes degraus na região não aerada ($q = 0,30\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q = 0,45\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$).	151
Figura 5.12. Resultados numéricos obtidos no presente estudo de dissipação de energia em relação à energia de montante para $q = 0,15\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ na região aerada, comparados com os dados e proposições de outros pesquisados. Na legenda, “ α ” refere-se à fração de água e “ α_c ” ao coeficiente de Coriolis.	152
Figura 5.13. Valores de dissipação de energia adimensionalizada ($\Delta E/E_m$) para a região aerada com $q = 0,15\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	153
Figura 5.14. Valores de coeficiente de Coriolis para os dois cenários onde estes valores são variáveis ($q = 0,15\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$).	153
Figura 5.15. Valores de dissipação de energia adimensionalizada ($\Delta E/E_m$) ao longo da calha para as três vazões simuladas ($0,15, 0,30$ e $0,45\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$).	155
Figura 5.16. Valores de dissipação de energia adimensionalizada ($\Delta E/E_m$) ao longo da calha para as vazões $0,15$ e $0,30\text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ com aeração natural e aeração induzida por defletor conjugado a uma câmara de fornecimento de ar.	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resumo de alguns trabalhos que analisaram computacionalmente o escoamento em vertedouros em degraus ou com aeração induzida.....	46
Table 3.1. Mean values of probability distribution coefficients ($N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$) defined based on the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008).....	81
Table 3.2. Mean and extreme pressures in full-scale prototype conditions in the region near the external corner of vertical faces from data found in the literature.....	84
Table 3.3. Mean and extreme pressures in full-scale prototype conditions in the region near the external corner of horizontal faces from data found in the literature.....	84
Tabela 4.1. Características dos fluidos e adimensionais considerados nas simulações. ...	108
Tabela 5.1. Características de algumas barragens com vertedouros em degraus localizadas no território brasileiro.....	131
Tabela 5.2. Estimativa dos comprimentos de bacia de dissipação de energia considerando-se valores de dissipação de energia obtidos nos 04 cenários analisados.....	157

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	Área da seção transversal do escoamento
<i>B</i>	Largura da calha do vertedouro
<i>C</i>	Concentração de ar
<i>C_b</i>	Concentração de ar no fundo da calha
<i>C_m</i>	Concentração média de ar
<i>C_{máx}</i>	Concentração máxima de ar em uma determinada seção
<i>C_{σ_p}</i>	Coefficiente de pressão
<i>d</i>	Altura característica do escoamento
<i>D'</i>	Difusividade turbulenta adimensional
<i>E</i>	Número de Euler – $E = \frac{\Delta P}{\rho V^2}$
<i>E_j</i>	Energia a jusante, ou no ponto a ser analisado
<i>E_m</i>	Energia a montante
<i>F</i>	Número de Froude – $F = \frac{V}{\sqrt{g.L}}$
<i>F*</i>	Número de Froude Rugoso – $F^* = \frac{q}{\sqrt{g.k_s^3 \cdot \cos(\theta)}}$
<i>f</i>	Coefficiente de atrito de Darcy-Weisbach, ou fator de resistência
<i>g</i>	Aceleração gravitacional
<i>H_d</i>	Carga hidráulica de projeto
<i>h</i>	Profundidade normal ao pseudofundo ou altura do degrau, dependendo do caso
<i>h_c</i>	Profundidade crítica
<i>h_a</i>	Profundidade no ponto de incipiência da aeração
<i>h₁</i>	Altura conjugada rápida
<i>h₂</i>	Altura conjugada lenta
<i>h₉₀</i>	Profundidade da mistura característica ar-água com concentração de ar local $C = 0,90$
<i>k</i>	Energia cinética turbulenta
<i>k_s</i>	Rugosidade da calha
<i>K'</i>	Constante de integração

L	Comprimento longitudinal medida ao longo da calha paralelamente ao pseudofundo ou uma variável de comprimento, dependendo do caso
L_a	Comprimento até o ponto de incipiência da aeração
L_j	Comprimento do ressalto hidráulico
L_{jet}	Comprimento do jato
$L_{CPmáx}$	Posição de maior flutuação de pressão em uma bacia de dissipação de energia
l	Comprimento do patamar do degrau
N	Expoente da equação de potência
$N_{0.1\%}$	Coefficiente de distribuição probabilística para probabilidade de não excedência de 0,1%
$N_{99.9\%}$	Coefficiente de distribuição probabilística para probabilidade de não excedência de 99,9%
p	Pressão
p'	Pressão modificada
P	Pressão média
P_{max}	Pressão máxima
$P_{0.1\%}$	Pressão com probabilidade de não excedência de 0,1%
$P_{99.9\%}$	Pressão com probabilidade de não excedência de 99,9%
Q	Vazão
q	Vazão específica
R	Número de Reynolds – $R = \frac{V.L}{\nu}$
T_w	Profundidade no rio ou canal a jusante da bacia de dissipação de energia
S'	Posição longitudinal adimensional de Gomes (2006)
u	Velocidade
u_m	Velocidade média
u_{max}	Velocidade máxima
u_{90}	Velocidade local para a profundidade h_{90}
V	Velocidade
W	Número de Weber – $W = \frac{\rho.V^2.L}{\sigma}$

X	Distância horizontal desde a crista do vertedouro ou desde o espelho do primeiro degrau, dependendo do caso
x	Distância horizontal desde o espelho do primeiro degrau
x_i	Distância horizontal entre o espelho do primeiro degrau e o ponto de incipiência da aeração
y	Distância ou profundidade normal ao pseudofundo
y_{90}	Profundidade normal ao pseudofundo onde a concentração de ar local é $C = 0,90$
Y	Distância vertical desde a crista do vertedouro ou desde o final do perfil Creager, dependendo do caso
α	Fração de água
α_{air}	Fração de ar
α_C	Coefficiente de Coriolis
α_r	Declividade da rampa do defletor em relação ao canal
β	Demanda relativa de ar
δ	Espessura da camada limite
ε	Dissipação da energia cinética turbulenta
μ	Viscosidade absoluta
μ_t	Viscosidade turbulenta
μ_{eff}	Viscosidade efetiva
θ	Declividade da calha do vertedouro – ângulo entre o pseudofundo e um plano horizontal
ρ	Massa específica
ρ_{air}	Massa específica do ar
σ	Tensão superficial
σ_d	Desvio padrão de valores de pressão
σ_p	Desvio padrão das flutuações de pressão
ω	Dissipação específica da energia cinética turbulenta
γ	Peso específico da água
γ_{air}	Peso específico do ar
λ	Escala geométrica
λ_V	Escala de velocidades

λ_v	Escala de viscosidade cinemática
$\lambda_{\Delta P}$	Escala de variação de pressão
λ_ρ	Escala de massa específica

LISTA DE SIGLAS

CNB	Cadastro Nacional de Barragens
CFD	Computational Fluid Dynamics
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
DNS	Direct Numerical Simulation
GCI	Grid Convergence Index
LOH	Laboratório de Obras Hidráulicas
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RMS	Root Mean Square
RMSE	Root Mean Square Error
SST	Shear-Stress Transport
PIV	Particle Image Velocimetry
VOF	Volume of Fluid

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO.....</u>	<u>22</u>
1.1	Contexto e Motivação.....	23
1.2	Objetivos	28
1.3	Organização do Trabalho.....	29
2	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	<u>31</u>
2.1	Vertedouros em Degraus	32
2.1.1	Características gerais do escoamento sobre vertedouros em degraus .	32
2.1.2	Características da Região de Desenvolvimento da Camada Limite	34
2.2	Aeração Induzida	38
2.3	Simulação Numérica	44
3	<u>COMBINATION OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACHES TO DETERMINE THE MAIN CHARACTERISTICS OF SKIMMING FLOW IN STEPPED SPILLWAYS.....</u>	<u>50</u>
	Abstract.....	53
3.1	Introduction	53
3.2	Materials and Methods	58
3.2.1	Experimental setup	59
3.2.2	Numerical modeling and governing equations.....	61
3.2.3	Boundary conditions	63
3.2.4	Grid testing and model validation.....	64
3.2.5	Data analysis	66
3.3	Model Validation.....	67
3.3.1	Grid testing and model validation through mean pressure.....	67
3.3.2	Procedure for determining the free surface of the flow along the stepped spillway	71
3.3.3	Validation through velocity distribution.....	74
3.4	Results and Discussions	76
3.4.1	Mean pressures on the surfaces of the steps	76
3.4.2	Statistical parameters of pressures with different probabilities of being overcome on the surfaces of the steps.....	79
3.4.3	Analysis of uncertainties in pressure data and their implications	83
3.5	Conclusions.....	86
	Acknowledgments.....	87

References	87
------------------	----

4 INVESTIGAÇÃO DE EFEITOS DE ESCALA NO ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS UTILIZANDO-SE UMA ABORDAGEM COM SEMELHANÇA DINÂMICA COM CFD

95

Resumo	97
4.1 Introdução	98
4.2 Metodologia.....	103
4.2.1 Escopo da Pesquisa	103
4.2.2 Modelo numérico	104
4.2.3 Condições simuladas.....	105
4.2.4 Condições de Contorno e Discretização.....	108
4.2.5 Análise dos resultados.....	109
4.3 Resultados e Discussão.....	110
4.4 Conclusões	115
Referências bibliográficas.....	117

5 ANÁLISE DE INCERTEZAS NA AVALIAÇÃO DA DISSIPACÃO DE ENERGIA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL E COM AERADORES: UMA ABORDAGEM COM CFD.....

124

Resumo	126
5.1 Introdução e Objetivos	127
5.2 Metodologia.....	134
5.2.1 Instalações Experimentais.....	134
5.2.2 Modelo Numérico.....	136
5.2.3 Características das Simulações.....	137
5.2.4 Teste de malha e validação do modelo	138
5.2.5 Análise dos Resultados	140
5.3 Escolha da Malha e Validação do Modelo	144
5.4 Resultados e Discussão.....	148
5.4.1 Determinação da superfície livre e de profundidades.....	148
5.4.2 Avaliação da dissipação de energia para vertedouros em degraus com aeração natural	149
5.4.3 Avaliação da dissipação de energia para vertedouros em degraus com aeradores	155

5.4.4	Avaliação dos efeitos das incertezas na dissipação de energia no dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico: estudo de caso	157
5.5	Conclusões	159
	References	161
6	<u>CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES</u>	170
6.1	Conclusões a respeito da adequabilidade da abordagem com CFD – RANS para o estudo de escoamento bifásico ar-água em vertedouros em degraus	171
6.2	Conclusões a respeito da determinação da superfície livre	173
6.3	Conclusões a respeito dos efeitos de medição em dados de pressão.....	173
6.4	Conclusões a respeito do estudo de efeitos de escala com CFD	174
6.5	Conclusões a respeito da dissipação de energia em vertedouros com aeração induzida por defletor e câmara de entrada de ar.....	174
6.6	Conclusões a respeito dos possíveis impactos no dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico devido às simplificações utilizadas nos estudos experimentais de dissipação de energia	175
6.7	Recomendações	176
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	178

1 INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

Os vertedouros são de grande importância às barragens, garantindo a sua segurança contra os excessos de água das enchentes. Quando estes são construídos em degraus, parte da energia do escoamento é dissipada ao longo da própria calha do vertedouro, permitindo reduzir as dimensões das estruturas de dissipação de energia a jusante do barramento (CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002; CHEN; DAI; LIU, 2002; FRIZELL; FRIZELL, 2015; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010; TABARI; TAVAKOLI, 2016; TOZZI, 2010), gerando significativa economia financeira às obras.

A Figura 1.1.a apresenta o vertedouro da barragem do Ribeirão João Leite, da SANEAGO, em Goiânia/GO. Esta barragem é do tipo gravidade, executada em Concreto Compactado com Rolo (CCR) e com fechamento junto às ombreiras em maciço de terra, destinada ao armazenamento de água para abastecimento do município de Goiânia. Esta barragem possui uma altura de 50 m e seu descarregador de cheias é constituído por uma crista vertente central com comprimento igual a 50 m, com perfil Creager e calha em degraus com declividade de 1V:0,75H e 60 cm de altura (SANEAMENTO DE GOIÁS - SANEAGO, 2000).



Figura 1.1. Vertedouros em Degraus: (a) Vertedouro da Barragem do Ribeirão João Leite, da SANEAGO – Saneamento de Goiás S. A., Goiânia, GO; (b) Vertedouro da Barragem da UHE Dona Francisca, do Consórcio Dona Francisca, Nova Palma, RS.

A Figura 1.1.b apresenta o vertedouro da barragem da UHE Dona Francisca. Esta também é uma barragem do tipo gravidade, executada em CCR, mas, destinada ao

armazenamento de água para geração de energia elétrica. O vertedouro também possui calha com declividade 1V:0,75H, em degraus com altura igual a 60 cm, e um perfil Creager, com comprimento igual a 335 m (SANTOS, 2018).

Ambas as estruturas apresentadas exemplificam a aplicabilidade de vertedouros com calhas em degraus em barragens construídas em CCR, tendo-se verificado o crescimento do uso desta técnica em novos barramentos desde a década de 1970, a partir do desenvolvimento tecnológico do CCR (SANAGIOTTO, 2003; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010).

Tradicionalmente, a abordagem de caracterização hidrodinâmica é feita por modelagem física (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; CHANSON, 1993, 2009; GOMES, 2006; OLINGER; BRIGHETTI, 2004; POVH *et al.*, 2004; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; TOZZI, 1992; ZHANG; CHANSON, 2016a, 2016b). Assim, a partir de estudos experimentais, desenvolvidos ao longo dos anos, foi possível caracterizar o escoamento sobre diferentes configurações de vertedouros em degraus a partir da análise de pressões, velocidades, lâminas d'água e frações de ar. Chanson, Yasuda e Ohtsu (2002) estudaram a dissipação de energia ao longo das calhas dos vertedouros e as recirculações de água dentro dos degraus considerando-se diferentes declividades de calhas. Outros autores estudaram características como pressões médias e instantâneas, a dissipação de energia ao longo da calha do vertedouro e a posição do início da aeração para estruturas com declividades 1,0V:0,75H (*e.g.*, MATOS *et al.*, 2022; MEIRELES *et al.*, 2012; OLINGER; BRIGHETTI, 2004; POVH *et al.*, 2004; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008), 1,0V:0,8H (*e.g.*, AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009), 1,0V:1,0H (*e.g.*, DAI PRÁ *et al.*, 2012; SIMÕES *et al.*, 2013; ZHANG; CHANSON, 2016b), 1,0V:2,0H (*e.g.*, BUNG, 2011; MEIRELES, 2011), entre outras.

De forma geral, identificou-se que a região não aerada do escoamento na calha escalonada apresenta as máximas pressões, sendo a aeração do escoamento benéfica no sentido de redução desses valores (GOMES, 2006). Nesse contexto, a inserção de aeradores nas estruturas escalonadas conduz o início da aeração para posições mais próximas da crista, em relação a estruturas sem dispositivos auxiliares para aeração do escoamento, não alterando, no entanto, a posição de incipiência da aeração (MOJTABA *et al.*, 2015; NOVAKOSKI, 2021). Esse fato possibilita que os vertedouros com calhas em degraus possam ser utilizados para vazões específicas superiores àquelas permitidas sem a aeração induzida (FERLA *et al.*, 2021; KOEN; BOSMAN; BASSON, 2019; NOVAKOSKI *et al.*, 2021; PRIEBE *et al.*, 2021; TERRIER, 2016).

Existem duas abordagens para estimar as características de escoamentos bifásicos ar-água: modelagem física e simulação numérica; e ambas as abordagens possuem incertezas (PFISTER; HAGER, 2014). A modelagem física é suscetível aos efeitos de escala, de medição e do próprio modelo ou método aplicado (HELLER, 2011), possuindo limitações relacionadas à capacidade de bombas, discretização espacial da obtenção de dados e à instrumentação e espaço laboratorial disponível. Dessa forma, a modelagem computacional surge como uma importante ferramenta de análise dos escoamentos, a qual proporciona maior flexibilidade para estudar estruturas hidráulicas com diferentes configurações, mas, a qualidade dos seus resultados é sensível ao código utilizado, calibração e validação dos resultados.

Conforme apresentado no Capítulo 5, a maioria das barragens brasileiras para abastecimento de água possuem altura inferior a 60 m, conforme Cadastro Nacional de Barragens – CNB do Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB¹. São muitas as barragens brasileiras cujo projeto não contou com modelagem física do vertedouro, sendo usual a adoção de critérios e metodologias apresentadas em USBR (1987), Eletrobrás (2000) e Eletrobrás (2003). Algumas barragens brasileiras contam com vertedouros em degraus, não tratados nos livros e manuais mencionados, os quais foram dimensionados considerando-se análises e metodologias apresentadas na literatura nacional (e.g., DAI PRÁ et al., 2012; GOMES, 2006; OLINGER; BRIGHETTI, 2004; POVH et al., 2004; SANAGIOTTO, 2003; TOZZI, 1992) e internacional e.g., (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; BINDO; GAUTIER; LACROIX, 1993; BOES; HAGER, 2003; CHANSON, 1993, 1994a, 1994b; FRIZELL, 2006; FRIZELL; FRIZELL, 2015; MATOS, 1990).

Analisando-se a conjuntura atual das barragens no Brasil, observa-se uma tendência em se projetar e executar barramentos para abastecimento de água, transporte e geração de energia com pequena a média alturas, buscando-se uma redução das áreas alagadas, seja pela presença de núcleos urbanos próximos aos rios, seja pela redução de áreas verdes alagadas. Nesse sentido, é possível que vertedouros em degraus com grandes alturas sejam observados, nos próximos anos, majoritariamente em barragens na área de mineração. Estes vertedouros possuem características distintas daquelas analisadas nesta tese, com declividades longitudinais normalmente iguais a 1V:2H ou maiores.

¹ Disponível para associados em <https://cadastrdebarragens.pti.org.br/>. Acesso em 25/01/2022, às 13:00.

Considerando-se, portanto, barragens de abastecimento de água, com vertedouros com alturas médias a baixas e vazões específicas inferiores aos limites indicados (ambas as características discutidas ao longo desta tese) e com aproximação e restituição do fluxo sem singularidades ou deflexões, pode-se inferir que no seu dimensionamento há especial interesse: (i) na dissipação de energia, para a verificação das estruturas a jusante do vertedouro; (ii) na sua declividade longitudinal e altura dos degraus, que impactam no comportamento hidrodinâmico do escoamento e na estabilidade global do bloco do vertedouro; (iii) nas profundidades ao longo da calha, que são necessárias para o dimensionamento dos muros laterais e na verificação das estruturas a jusante da calha; (iv) nas pressões que ocorrem junto às superfícies em concreto, que podem ser utilizadas para o dimensionamento estrutural das obras e verificação de possibilidade de ocorrência de cavitação, e; (v) no desenvolvimento longitudinal do escoamento, com definição do ponto de incipiência da aeração, importante para caracterizar o escoamento e definir equacionamentos diversos para os itens tratados anteriormente.

Outra variável a ser analisada é a aeração do escoamento, com reflexos no escoamento, podendo-se citar a sua influência nas profundidades e na proteção das superfícies contra danos por cavitação. No entanto, em se tratando de estruturas com menores altura e vazão específica de projeto, o estudo da aeração do escoamento tem importância reduzida frente os itens anteriormente citados, uma vez que tais características resultam menores velocidades ao longo da calha em degraus.

Assim, pode-se reduzir a verificação ou dimensionamento de vertedouros em degraus relativamente simples (vertedouro não controlado por comportas, com calha retilínea e com declividade constante), de relativa pequena altura e pequena vazão específica, à necessidade de conhecer pressões, profundidades e velocidades, estando a dissipação de energia fortemente relacionada às profundidades e velocidades.

Esta tese foi desenvolvida a partir de um projeto de P&D entre o Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de FURNAS (LAHE), o Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Fundação de Apoio à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FAURGS), denominado “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Forçada”. A pesquisa citada teve como objetivo principal desenvolver processos de análise experimental de parâmetros hidráulicos preponderantes em escoamentos sobre vertedouros em degraus com aeração induzida visando estabelecer critérios de dimensionamento dessas estruturas e verificar a

possibilidade de aumentar a eficiência hidráulica da dissipação da energia ao longo da calha e aumentar a vazão específica sem risco de erosão ou cavitação nos degraus. Ao longo dessa tese, estão citados diversos trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto de P&D (CANELLAS, 2020; FERLA *et al.*, 2021; MATOS *et al.*, 2022; NOVAKOSKI, 2021; NOVAKOSKI *et al.*, 2021; PRIEBE *et al.*, 2021; TASSINARI *et al.*, 2020), que contribuíram para este trabalho com dados, discussões, comparações e ideias.

Nesse contexto, esta tese busca investigar os possíveis efeitos de simplificações e limitações das metodologias tradicionalmente aplicadas à modelagem física. Para tanto, foram utilizadas abordagens numéricas com fluidodinâmica computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) da seguinte forma: o artigo apresentado no Capítulo 3 busca investigar os efeitos de medição em pressões; o artigo apresentado no Capítulo 4 busca investigar os efeitos de escala, e; o artigo apresentado no Capítulo 5 busca investigar os efeitos de simplificações adotadas em estudos de dissipação de energia ao longo da calha em degraus no dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

1.2 Objetivos

Na contextualização e motivação deste trabalho, mostrou-se, de forma sucinta, a importância dos vertedouros em degraus para a segurança de barragens e da sociedade. Contudo, apesar do enorme esforço investido por pesquisadores e engenheiros no desenvolvimento de conhecimento no tema, ainda há lacunas a serem investigadas, em alguns casos devido às simplificações associadas aos métodos de pesquisa aplicados.

O objetivo desta tese é, portanto, analisar o escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de alta declividade com uma abordagem computacional, com CFD, investigando-se os efeitos de incertezas e simplificações intrínsecas aos métodos experimentais tradicionalmente aplicados em estudos como esse.

Para cumprir com o objetivo geral da tese, os seguintes objetivos específicos são abordados na forma de questões científicas:

- ❖ As ferramentas de CFD que utilizam as equações das médias de Reynolds para Navier-Stokes (RANS, sigla em inglês para Reynolds-Averaged Navier-Stokes) são adequadas para modelar o escoamento bifásico ar-água que ocorre sobre vertedouros em degraus? Os valores médios de pressão e velocidade são representativos quando comparados com dados obtidos experimentalmente em modelos reduzidos?
- ❖ Em experimentos, as medidas de pressão nos degraus são feitas em locais específicos, podendo não registrar, necessariamente, as pressões médias extremas (máximas e mínimas) que podem ocorrer em espelhos e patamares nos degraus. A modelagem com CFD pode ser utilizada para investigar os efeitos de medição devido às incertezas na posição de medição considerando-se escalas de protótipo? Se isso for verificado, qual é a incerteza relativa devido aos efeitos de medição e quais são as regiões de maior solicitação dos degraus?
- ❖ Em hidráulica experimental, devido à impossibilidade de se promover semelhança total entre protótipo e modelo, em função de o fluido água ocorrer em ambos os casos, incidem os efeitos de escala. Contudo, em modelagem computacional, é possível alterar as características dos fluidos, de forma a se ter semelhança em outros dimensionais. Com isso, a modelagem computacional pode ser utilizada no estudo dos efeitos de escala permitindo medir as consequências de desconsiderar o efeito de um

ou mais adimensionais, em termos de valores médios de pressão, em escoamentos sobre vertedouros em degraus?

- ❖ Um dos principais benefícios em se utilizar uma calha em degraus é a dissipação de energia ao longo da calha, que reflete economia na execução da bacia de dissipação, quando necessária, a jusante do vertedouro. A literatura fornece dados de dissipação de energia a partir de estudos experimentais, que necessitaram realizar simplificações para a definição da dissipação de energia, seja definindo a profundidade do escoamento no pé do vertedouro por uma medição indireta da profundidade no final do ressalto hidráulico, seja desconsiderando a variação de velocidades ao longo do perfil ($\alpha_c = 1,0$). Assim, quais são os possíveis impactos no dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico devido às simplificações utilizadas nos estudos experimentais de dissipação de energia em vertedouros em degraus? A dissipação de energia ao longo da calha em degraus é alterada devido à indução de ar no início da calha?

1.3 Organização do Trabalho

Nesta tese, foi desenvolvida uma série de estudos que estão apresentados nos Capítulos 3 a 5, na forma de artigos. No Capítulo 2, está apresentada uma revisão bibliográfica com os conteúdos básicos necessários ao entendimento do tema, mas que não constam nos artigos, devido à característica resumida das revisões bibliográficas comumente apresentadas em artigos.

A Figura 1.2 apresenta uma visão geral da tese, mostrando o que está abordado em cada um dos capítulos. Posteriormente, no início de cada um dos Capítulos 3 a 5, apresenta-se um resumo do que foi abordado do referido capítulo, assim como a sua relação com o trabalho.

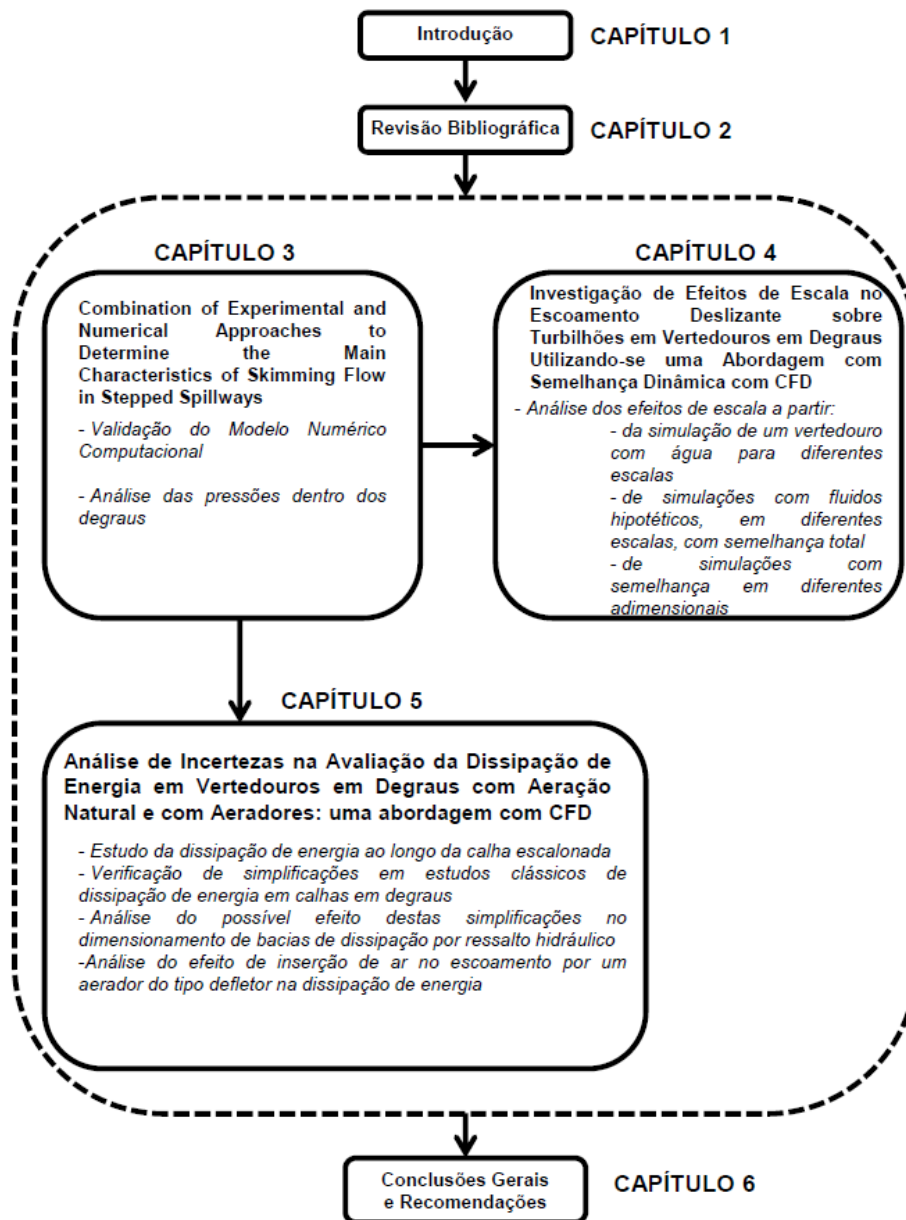


Figura 1.2. Visão geral do trabalho e a relação entre os assuntos abordados na tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, está apresentada uma revisão da literatura que engloba os assuntos: vertedouros em degraus, aeração induzida e simulação numérica.

2.1 Vertedouros em Degraus

Com o objetivo de reunir conhecimentos necessários à compreensão do escoamento sobre vertedouros em degraus, estão apresentadas, neste item, características gerais do escoamento sobre vertedouros em degraus e características da região de desenvolvimento da camada limite.

2.1.1 Características gerais do escoamento sobre vertedouros em degraus

As rugosidades nas superfícies dos vertedouros aceleram o desenvolvimento da camada limite em comparação com os vertedouros com calha lisa, antecipando o início da aeração do escoamento (FRIZELL; FRIZELL, 2015; GOMES, 2006; ZHANG; CHANSON, 2016a). Isso altera as propriedades da massa fluida, reduzindo significativamente os danos causados por erosão e cavitação (PETERKA, 1953).

A cavitação incipiente em vertedouros em degraus está relacionada à vazão específica, à dimensão dos degraus empregados e ao desenvolvimento da camada limite, que, por sua vez, está relacionado à altura e declividade da calha do vertedouro (GOMES, 2006). Por outro lado, a severidade do dano, entre outros fatores, está associada à intensidade da cavitação e ao tempo de atuação (FALVEY, 1990), traduzido em probabilidade de ocorrência de uma determinada pressão extrema.

Assim, os vertedouros em degraus possuem vazão específica e altura limitados pelas restrições impostas pela cavitação, sendo a zona próxima à seção de afloramento da camada limite a mais crítica em termos de risco de cavitação (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009). Após esta zona, inicia-se a aeração do escoamento e, a partir de uma concentração adequada de ar junto ao fundo da calha, previnem-se os danos devido à cavitação.

Ainda não há consenso na literatura a respeito de vazões específicas e velocidades críticas para prevenir os danos por cavitação na zona não aerada do escoamento sobre degraus.

Para um vertedouro com calha com declividade 1V:0,75H, (GOMES, 2006) restringiu o uso de estruturas em degraus para uma vazão específica igual a 13,3 m³/s/m (considerando-se degraus com 0,60 m de altura), com velocidades médias da ordem de 17 m/s, obtidas para a seção de afloramento da camada limite. Esses valores foram determinados considerando-se pressões negativas extremas com 0,1% de probabilidade de ocorrência, sendo esta probabilidade recomendada por Lopardo et al. (2004) para analisar a tendência a danos por cavitação.

Para um vertedouro com calha com declividade 1V:0,8H, também considerando-se 0,1% de probabilidade como um valor representativo para as pressões extremas, Amador, Sánchez-Juny e Dolz (2009) estabeleceram a velocidade crítica de 15 m/s para a seção onde a camada limite atinge a superfície livre, o que corresponde a uma vazão específica igual a 11,5 m³/s/m para degraus com 0,60 m de altura, em escala de protótipo.

Boes e Hager (2003b) apresentam uma velocidade crítica para incipiência de cavitação na região não aerada do escoamento de aproximadamente 20 m/s a partir da qual os autores estabeleceram um limite de vazão específica para projeto de vertedouros em degraus igual a 25 m³/s/m. Matos et al. (2022) concluíram que vazões máximas da ordem de 15 a 20 m³/s/m são aconselháveis para vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H com aeração natural, para degraus com alturas entre 0,60 e 1,20 m.

Dessa forma, a literatura fornece como limites para vazões específicas de projeto valores que vão desde 11,5 m³/s/m até 25 m³/s/m, ou superiores, havendo registros de projetos executados com vazões específicas de até 172 m³/s/m^[2] (FRIZELL; FRIZELL, 2015). Como solução para redução do risco de cavitação, podem ser utilizadas estruturas que permitam a aeração do escoamento (MOJTABA *et al.*, 2015).

O escoamento sobre degraus pode ser caracterizado em dois regimes básicos: *nappe flow* (em quedas sucessivas) ou *skimming flow* (deslizante sobre turbilhões). No primeiro regime, existe uma sucessão de quedas livres seguidas por ressalto hidráulicos em cada degrau, onde a dissipação de energia ocorre tanto na quebra do jato d'água quanto no ressalto (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008). No segundo regime, que ocorre em vertedouros com calhas com maior declividade e maiores vazões específicas, observa-se a formação de um pseudofundo, abaixo do qual se formam vórtices que ficam

² Comenta-se que este não é um vertedouro convencional. Este é um vertedouro auxiliar, controlado por comportas, que conduzem as vazões para uma calha lisa seguida de uma seção em degraus com declividade constante, que termina em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico USBR tipo III modificada.

recirculando presos entre o degrau e o escoamento que ocorre acima do pseudofundo (CHANSON, 1993). Existe um regime de transição entre o *nappe* e o *skimming flow* que possui características de ambos os regimes, mas, de forma geral, este regime de transição deve ser evitado como condição primária de projeto (FRIZELL; FRIZELL, 2015).

Conforme comentado em Simões et al. (2012), Ohtsu et al. (2004) observaram que o perfil da superfície livre na região em regime uniforme, pra declividades da calha em degraus entre 19 e 55°, é independente da relação entre altura do degrau (h) e profundidade crítica (h_c), e a sua declividade é praticamente igual à declividade do pseudofundo. Essa região foi denominada Perfil Tipo A. Para declividades entre 5,7 e 19°, essa semelhança entre a declividade da superfície livre e do pseudofundo (Perfil Tipo A) ocorre apenas para pequenas relações h/h_c . Para relações maiores, a superfície livre assume um padrão diferente, denominado Perfil Tipo B.

A Figura 2.1 apresenta dados de diversos estudos que definem o regime de escoamento a partir da relação entre profundidade crítica (h_c) e altura do degrau (h) versus a relação entre altura (h) e comprimento do degrau (l).

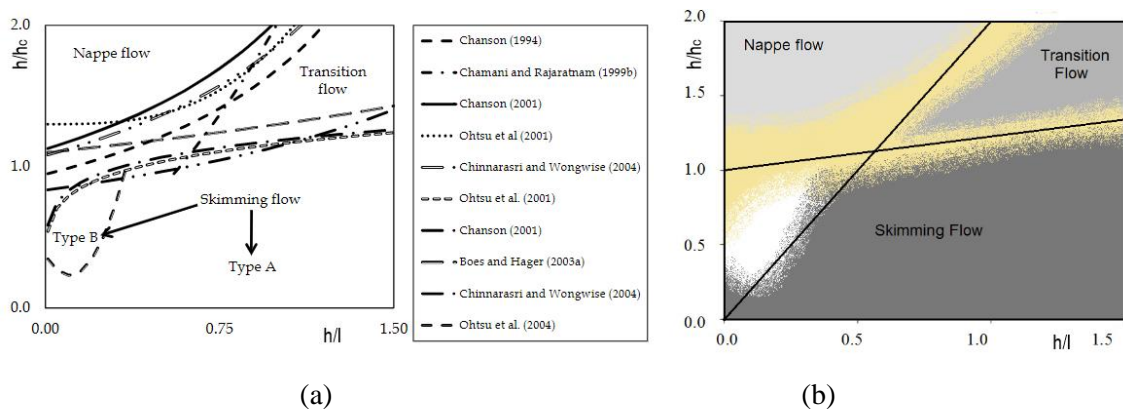


Figura 2.1. Critérios para determinar os regimes de escoamento: (a) curvas de diferentes autores e (b) análise das 04 regiões principais.

Adaptado de: Simões et al. (2012).

2.1.2 Características da Região de Desenvolvimento da Camada Limite

Uma característica importante ao escoamento sobre vertedouros é a posição onde a camada limite atinge a superfície do escoamento, chamada de ponto de incipiência da aeração (*critical point*, *inception point*, entre outros). Espera-se que, logo após esta seção, a superfície livre do escoamento deforme e a entrada de ar inicie (CAMPBELL; COX;

BOYD, 1965; CHANSON, 1994a), terminando, portanto, a região não aerada do escoamento, conforme apresentado na Figura 2.2.

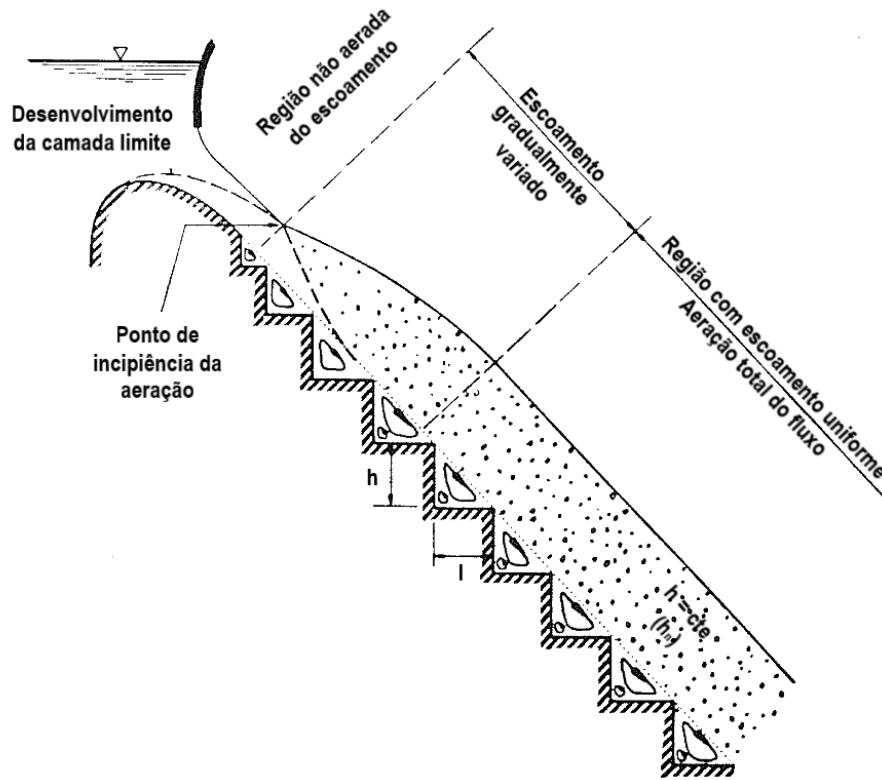


Figura 2.2. Regiões do escoamento deslizante sobre turbilhões (Skimming Flow).

Adaptado de: Chanson (1993).

Contudo, além de ser necessário o completo desenvolvimento da camada limite, para facilitar a entrada de ar no escoamento, é necessário que os turbilhões nas camadas mais superficiais do escoamento possuam energia suficiente para deformar a superfície livre (MEIRELES; BOMBARDELLI; MATOS, 2014), ou seja, a energia cinética turbulenta deve superar os efeitos da tensão superficial e da gravidade (CHANSON, 1993).

Para o caso de uma placa lisa, com gradiente de pressão nulo, a espessura da camada limite varia apenas em função da distância relativa à borda de início do escoamento e em função da velocidade do escoamento. No entanto, para o caso de um vertedouro, a análise do desenvolvimento da camada limite agrega três dificuldades adicionais (WOOD; ACKERS; LOVELESS, 1983): a superfície possui rugosidade; o escoamento é acelerado, e; existe certa dificuldade em definir a posição de início do desenvolvimento da camada limite.

Em um vertedouro em degraus com altura $h=0,10$ m e calha com declividade 1,0V:1,0H, Zhang e Chanson (2016b, 2016a) estudaram as características hidráulicas na região de desenvolvimento da camada limite, ou seja, na região não aerada do escoamento. As características básicas do desenvolvimento da camada limite derivaram de medições de velocidade, a partir das quais foram obtidos os valores da espessura da camada limite (δ), definida como sendo a profundidade onde a velocidade equivale a 99% da velocidade máxima do perfil ($u_{m\acute{a}x}$).

O perfil de desenvolvimento da camada limite no experimento desenvolvido por Zhang e Chanson (2016a) foi ajustado à

$$\frac{\delta}{X} = 0,15 \times \left(\frac{X}{k_s}\right)^{-0,37} \quad 2.1$$

sendo X a distância longitudinal medida a partir do espelho do degrau 1 e k_s a rugosidade da calha, calculada através da Equação 2.2 em função da altura do degrau (h) e do ângulo entre o pseudofundo e a horizontal (θ).

$$k_s = h \cdot \cos(\theta) \quad 2.2$$

A Equação 2.1 é válida para $0,9 \leq h_c/h \leq 1,7$ e $0 < X/k_s < 15$ e se mostrou adequada tanto para os dados de Zhang e Chanson (2016b) quanto para os dados de Meireles et al. (2012), sugerindo que o desenvolvimento da camada limite é minimamente influenciado pelo tipo da crista do vertedouro ou pela declividade da calha, em especial para $\frac{X}{k_s} > 10$ (ZHANG; CHANSON, 2016a).

O ponto de incipiência da aeração determina o final da região não aerada do escoamento. Portanto, além de ser importante conhecer o desenvolvimento da camada limite na região não aerada, faz-se importante conhecer a posição do ponto de incipiência da aeração e suas características, como profundidade e concentração média de ar (C_m), a qual se caracteriza por ser um valor próximo a 20% (BUNG, 2011; MEIRELES *et al.*, 2012). Ainda, alguns estudos (BOES; HAGER, 2003b; TERRIER, 2016) determinam o ponto de incipiência da cavitação como sendo a seção onde a concentração de ar no fundo da calha (C_b) é igual a 1% ($C_b = 0,01$).

Na região não aerada do escoamento, o desenvolvimento da concentração média de ar pode ser estimado a partir da Equação 2.3, ajustada por Meireles et al. (2012) para um vertedouro em degraus com declividade 1V:0,75H. Este ajuste resultou um coeficiente de determinação $R^2=0,62$.

$$C_m = 0,14 + 0,063 \left(\frac{L}{La} \right)^{10,8} \quad 2.3$$

sendo L uma distância longitudinal medida ao longo da calha do vertedouro, paralela ao pseudofundo, e La o comprimento do início da aeração, desde o início da crista do vertedouro até a seção de incipiência da aeração.

A partir de dados obtidos experimentalmente e provenientes de outros estudos (e.g. TOZZI, 1992; SANAGIOTTO, 2003; DAI PRÁ et al., 2012), Conterato, Marques e Alves (2015) propuseram a uniformização de equações para caracterizar o escoamento sobre degraus.

A Equação 2.4 permite calcular o comprimento do início da aeração (La) e a Equação 2.5 permite calcular a profundidade (ha) do escoamento nesse ponto. Ambas as equações foram ajustadas em função do número de Froude Rugoso (F^* , obtido através da Equação 2.6, sendo q a vazão específica e k_s a rugosidade da calha – Equação 2.2).

$$La/k_s = 12. F^{*2/3} \quad 2.4$$

$$ha/k_s = 1/3. F^{*2/3} \quad 2.5$$

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot k_s^3 \cdot \cos(\theta)}} \quad 2.6$$

A Figura 2.3 apresenta o bom ajuste das equações propostas por Conterato, Marques e Alves (2015) com os dados experimentais.

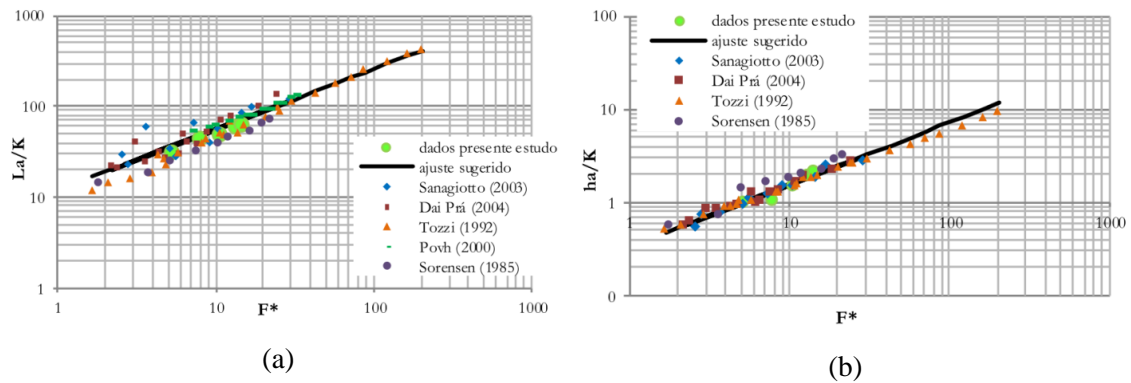


Figura 2.3. Resultados obtidos por diferentes autores e ajuste para previsão do (a) comprimento do início da aeração – L_a e (b) profundidade – h_a , em função do número de Froude rugoso.

Adaptado de: Conterato, Marques e Alves (2015).

2.2 Aeração Induzida

A prevenção contra os danos da cavitação em estruturas hidráulicas pode ser feita de diferentes maneiras (KELLS; SMITH, 1991): (i) prevenindo-se o fenômeno da cavitação para que o mesmo não ocorra, (ii) controlando-se o colapso das bolhas de ar de forma que o mesmo ocorra longe da superfície sólida da estrutura, (iii) utilizando-se materiais resistentes aos danos por cavitação, e (iv) com aeração de forma a mitigar os efeitos das altas pressões devido ao colapso das bolhas de ar de cavitação.

A utilização de aeradores aplica-se, portanto, à quarta maneira apresentada para a prevenção contra dos danos da cavitação (KELLS; SMITH, 1991; KÖKPINAR; GÖĞÜŞ, 2002). Pinto, Neidert e Ota (1982) apresentam uma descrição do mecanismo de aeração do escoamento devido à presença de um dispositivo de indução da aeração. Basicamente, o início do arraste de ar para o escoamento é caracterizado pela tensão superficial entre o ar e a água na região logo a jusante do ponto de separação do escoamento devido a um degrau ou defletor, de forma que quando os efeitos da tensão superficial são superados, a interface entre os fluidos se transforma em um jato que possui maior eficiência para o arraste de ar. Quando a água atinge o fundo do canal, o escoamento possui um volume de ar incorporado que é deslocado para jusante e misturado na água e as bolhas de ar tendem a ascender do fundo da estrutura, enquanto a turbulência tende a manter a mistura dentro da camada limite turbulenta. A concentração de ar será máxima no ponto logo após o impacto do jato, reduzindo gradualmente para jusante até atingir uma condição de

equilíbrio, após a interação e incorporação do ar a partir da superfície livre do escoamento.

Para o projeto de um sistema de aeração induzida, Pinto, Neidert e Ota (1982) sugerem que sejam respondidas três perguntas, estando a resposta à primeira pergunta relacionada à concepção do sistema:

- Qual é a velocidade em que a aeração deve ser inicialmente induzida no escoamento?
- Qual é o volume de ar que deve ser proporcionado?
- Qual é a distância entre os aeradores para manter o nível de proteção requerido?

Com base nesses questionamentos, e para respondê-los efetivamente, devem ser definidas as seguintes características para o sistema de aeração (KELLS; SMITH, 1991):

- Concentração de ar (C) necessária à proteção das superfícies,
- Taxa de entrada de ar (β),
- Localização e distância entre aeradores,
- Taxa de decaimento de ar,
- Geometria e tamanho dos aeradores,
- Sistema de suprimento de ar.

Kökpınar e Gögüs (2002) estudaram aeradores do tipo degrau e defletores em calha lisa, similares à estrutura apresentada na Figura 2.4, com o objetivo de proporcionar equações definidas através de experimentos que permitissem a estimativa do comprimento do jato (L_{jet}), a subpressão desenvolvida na cavidade de ar do dispositivo e a taxa de entrada de ar (β). Os resultados obtidos no estudo para β foram comparados com dados de protótipo, provenientes das barragens Guri (na Venezuela) e Foz da Areia (no Brasil).

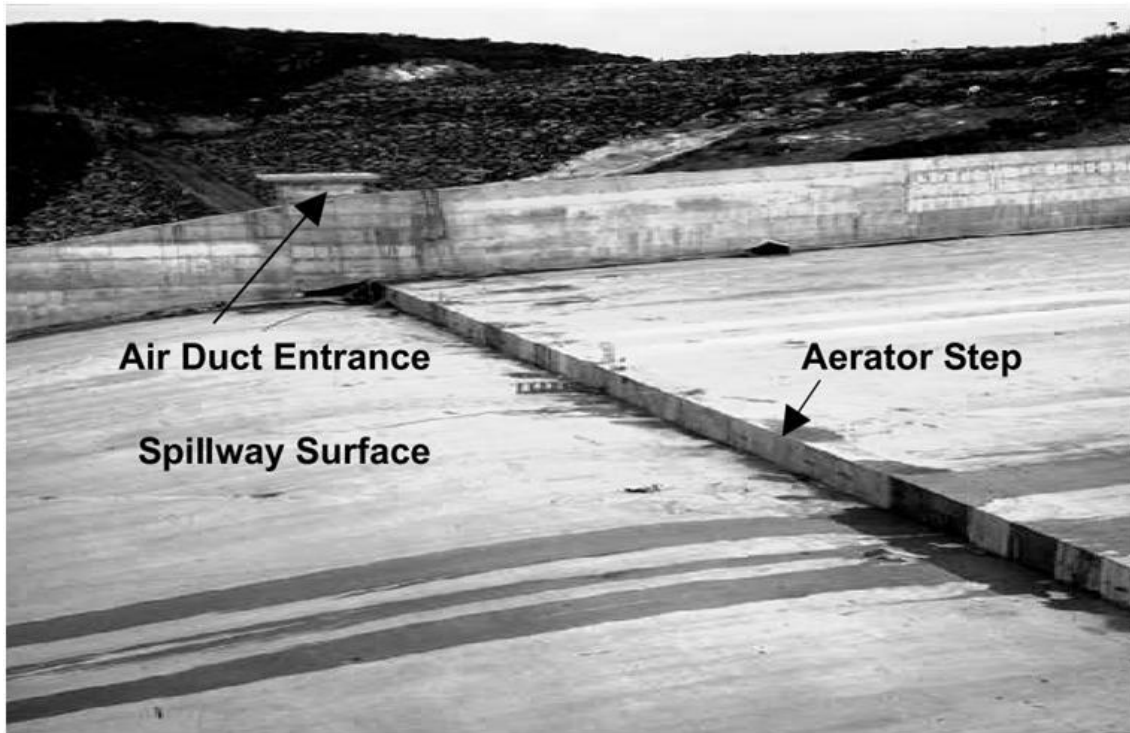


Figura 2.4. Aplicação prática de um dispositivo de aeração em uma calha do vertedouro da barragem Pedro do Cavallo, Brasil.

Fonte: Chanson (1993).

O comprimento do jato de água sobre defletor (com ou sem degrau) deve ser, portanto, uma função da velocidade média de escoamento de água, profundidade do escoamento, altura do defletor, altura do degrau, largura do canal, área do conduto do sistema de suprimento de ar, declividade do canal, declividade da rampa em relação ao canal, intensidade de turbulência, massa específica da água e viscosidade dinâmica da água.

Pfister e Hager (2010a) estudaram aeradores do tipo defletores em rampa, com ou sem degrau (*offset*), em calha lisa, e observaram que o jato formado pelo defletor possui grande influência nas proximidades da superfície livre, aumentando a concentração média de ar logo após o contato do jato, mas, possui pouca influência na concentração de ar junto ao fundo. Ainda, há uma intensa redução de concentração de ar junto ao fundo do canal na região $L_{jet} \leq x \leq 3.L_{jet}$, chegando a concentração de ar junto ao fundo a $C_b = 0,01$ no final desta zona. Assim, a zona crítica, com possibilidade de danos por cavitação inicia-se em $x = 3.L_{jet}$ (sendo x a distância ao longo da calha a partir do final do aerador), o que representa um comprimento da ordem de 40 a 50 m em protótipos, consistente com espaçamentos usuais entre aeradores (PFISTER; HAGER, 2010a).

Aeradores do tipo defletores possuem maior eficiência em termos de aeração do escoamento do que aeradores do tipo degrau, produzindo maiores valores de C_b e β (ZAMORA *et al.*, 2009). Para garantir a eficiência da entrada de ar no escoamento em vertedouros em calha lisa, devem ser satisfeitos valores mínimos de Número de Froude $F \cong 6,0$ para aeradores do tipo degrau e $F \cong 5,0$ para defletores com $\alpha_r = 6^\circ$ e $F \cong 4,0$ para defletores com declividade da rampa do defletor em relação ao canal $\alpha_r = 11^\circ$ (PFISTER; HAGER, 2010b, 2010a). Em vertedouros em degraus, fazem-se necessários valores menores para o número de Froude, sendo recomendados valores mínimos de $F \cong 2,7$ para aeradores do tipo degrau (ZAMORA *et al.*, 2008) e $F \cong 2,0$ para defletores (TERRIER, 2016).

Ao inserir um aerador em um modelo de vertedouro em degraus, Pfister, Hager e Minor (2006b) observaram que, para um dado valor de β , a concentração máxima de ar em uma determinada seção ($C_{m\acute{a}x}$) reduz linearmente a partir da origem ($x = 0$ ocorre na quina localizada na extremidade superior do primeiro espelho), para $0,5 \leq x/h_c \leq 5,0$. No referido trabalho, foram realizados ensaios com um modelo com declividade 1V:0,84H e degraus com $h = 0,093m$.

Além disso, a pré-aeração do escoamento com uma abertura no primeiro espelho não resultou efeitos significativos na performance do vertedouro em degraus no que compete à dissipação de energia (PFISTER; HAGER; MINOR, 2006b).

Ao inserir defletores (Figura 2.5) em diferentes posições na região do primeiro degrau de um vertedouro com calha escalonada com as mesmas características de Pfister, Hager e Minor (2006b), Pfister, Hager e Minor (2006a) observaram diferenças na região logo a jusante dos dispositivos no que se refere à concentração de ar. No entanto, não foram identificadas diferenças significativas nas concentrações de ar em posições mais distantes ao longo da calha em função do dispositivo de aeração.

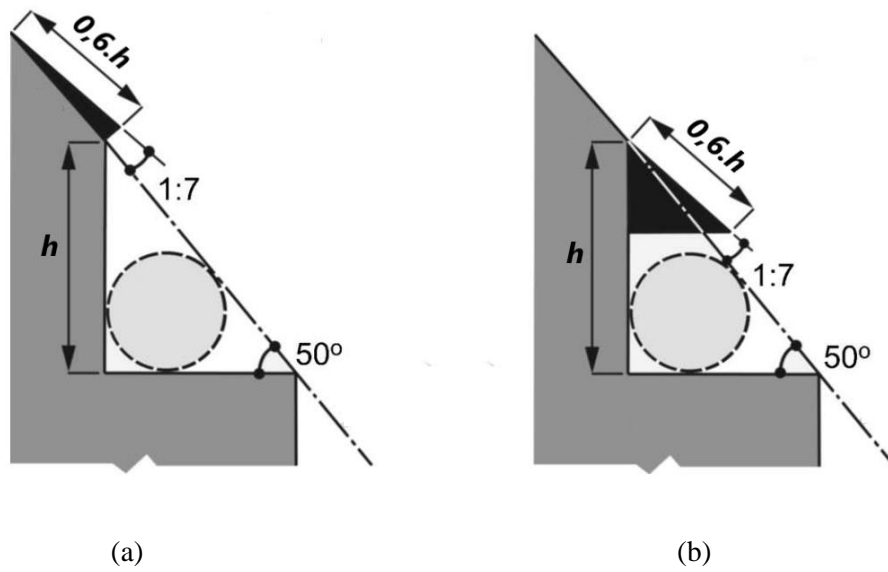


Figura 2.5. Esquema de instalação de um defletor com configuração (a) a montante do primeiro degrau e (b) no primeiro degrau.

Adaptado de: Pfister, Hager e Minor (2006a).

Quando utilizados defletores, podem ser considerados quatro diferentes regiões no escoamento, conforme Figura 2.6 (PFISTER; HAGER; MINOR, 2006a).

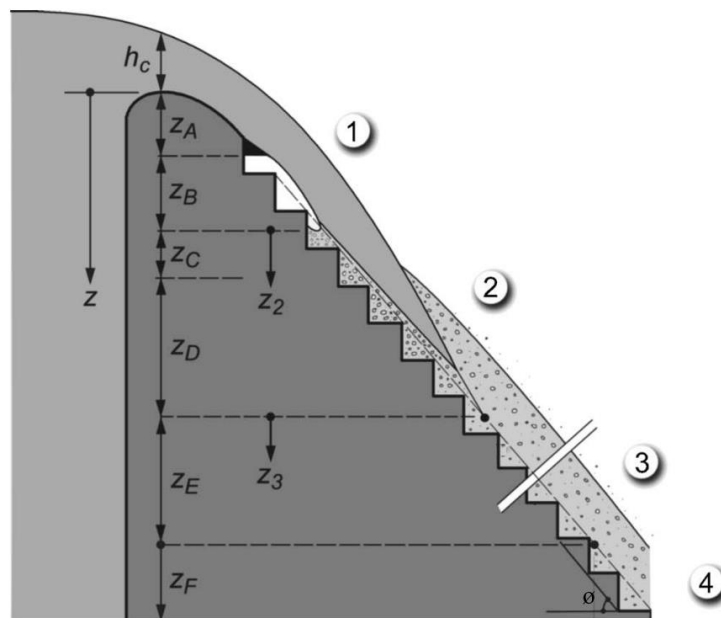


Figura 2.6. Regiões do escoamento em um vertedouro em degraus com defletor no início da calha e variáveis utilizadas nas equações apresentadas em Pfister, Hager e Minor (2006a).

Adaptado de: Pfister, Hager e Minor (2006a).

Na região 1, o aerador desvia o escoamento a partir do fundo da calha, atingindo-a, novamente na posição Z_B (distância vertical a partir do final do defletor, conforme Figura 2.6). Na região 2, ocorre uma rápida redução da concentração média de ar junto ao fundo da calha em degraus desde a posição Z_B até a posição Z_C , que ocorre para $\frac{Z_C}{h} = 1,5$. Após, ocorre uma redução de concentração mais suave desde a posição Z_C até a posição Z_D . Na região 3, há um crescimento na concentração de ar junto ao fundo (C_b), conforme uma função de tangente hiperbólica. Na região 4, a concentração de ar junto ao fundo se desenvolve em regime uniforme.

De forma contrária, Terrier, Pfister e Schleiss (2015) comentam que a concentração de ar junto ao fundo se mantém a jusante da zona de impacto do jato e não decresce rapidamente, o que sugere que um aerador apenas deve ser suficiente para vertedouros em degraus. Ao comparar dados próprios com dados de Pfister, Hager e Minor (2006a), Terrier (2016) justifica as diferenças encontradas para o desenvolvimento da concentração de ar junto ao fundo da calha (C_b) como sendo devido aos efeitos de escala, de forma que as menores dimensões dos defletores utilizados no modelo de Pfister, Hager e Minor (2006a) resultaram em uma menor turbulência e, conseqüentemente, menor entrada de ar no escoamento.

Priebe et al. (2021) avaliaram as características do escoamento e as pressões extremas em um modelo experimental com aeração induzida por pilares junto à crista do vertedouro. Os autores observaram que a presença dos pilares provoca uma descontinuidade do escoamento que favorece a incorporação de ar junto ao pseudofundo antes do ponto de início da aeração superficial. Além disso, a presença de pilares antecipa o ponto de início da aeração superficial. Os autores também observaram um aumento da magnitude das pressões extremas máximas e mínimas, em comparação ao sistema com aeração natural, para as maiores vazões testadas (para vazões de 0,20 m³/s/m a 0,33 m³/s/m, considerando-se um modelo operado em escala 1:10).

Ferla et al. (2021) analisaram pressões sobre os espelhos dos degraus e o coeficiente de entrada de ar através de um estudo experimental em modelo físico com uma calha em degraus com declividade 1V:0,75H, instalando um defletor em duas posições diferentes na calha. Os autores observaram que a instalação dos defletores não altera a magnitude das pressões extremas máximas e mínimas, no entanto, resulta a antecipação do início da aeração do escoamento. No entanto, a posição do defletor

influencia a quantidade de ar que entra no sistema, sendo maiores os coeficientes de entrada de ar para posições mais distantes da crista do vertedouro.

Utilizando o mesmo modelo físico de Ferla et al. (2021), Novakoski et al. (2021) analisaram pressões médias, coeficientes de entrada de ar e o comportamento do escoamento sobre um vertedouro em degraus com dois defletores diferentes, instalados no primeiro degrau da calha. A partir dos resultados encontrados, os autores observaram que uma alteração na geometria do defletor apenas influencia no ponto de impacto do jato, não tendo sido observadas mudanças significativas nas pressões médias, em comparação a um vertedouro com aeração natural. Além disso, tanto o coeficiente de entrada de ar quanto a posição de impacto do jato são maiores para o defletor mais extenso.

2.3 Simulação Numérica

Diversos trabalhos foram desenvolvidos com uma abordagem experimental, com modelos reduzidos, com o objetivo de compreender a hidrodinâmica do escoamento sobre vertedouros, com e sem aeração. No entanto, os custos envolvidos, assim como os possíveis erros devido aos critérios ou hipóteses simplificadoras, efeitos de escala, acurácia dos equipamentos de medição, entre outros, sugerem a aplicação de outra técnica, de uso conjunto com modelagem física, para melhor compreender a hidrodinâmica do escoamento.

Alguns trabalhos, como Chen, Dai e Liu (2002), Arantes (2007) e Aydin e Ozturk (2009, 2010), por exemplo, concluem que a modelagem computacional com ferramentas de CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*) apresenta grande potencial de aplicação na prática de engenharia em etapas iniciais de projetos e/ou em conjunto com modelos físicos. Ainda, Aydin e Ozturk (2010) acrescentam que estas análises com CFD, baseadas em modelos matemáticos relativamente simples, são comumente utilizadas em modelos aerodinâmicos, nucleares e industriais, entre outros.

Predominantemente, os escoamentos encontrados na prática da engenharia são turbulentos e, portanto, demandam um tratamento especial. Isso ocorre por que escoamentos turbulentos são altamente não permanentes e compostos por vórtices tridimensionais com diferentes tamanhos e quantidades de energia, cujos detalhes podem ser estudados com o auxílio de instrumentação ou através de soluções numéricas das equações governantes do escoamento (FERZIGER; PERIC, 2002). Simões (2012)

comenta que na simulação de escoamentos de fluidos, os cálculos relacionados aos campos turbulentos são extremamente mais complexos que os cálculos para regimes laminares, de forma que a simulação numérica do escoamento se torna mais difícil à medida que detalhes do escoamento são investigados. As técnicas de simulação numérica podem ser categorizadas, de forma geral:

- DNS (*Direct Numerical Simulation*), ou simulação numérica direta, corresponde ao nível mais alto de complexidade, onde o movimento não permanente é resolvido em todas as escalas do escoamento turbulento;
- LES (*Large Eddy Simulation*), ou simulação de grandes escalas, onde os pequenos vórtices são modelados enquanto os grandes vórtices são simulados. Para tanto, assume-se que a turbulência em pequenas escalas é isotrópica, comportando-se de forma estatisticamente previsível, independentemente do campo do escoamento turbulento;
- RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), ou equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, corresponde ao nível mais baixo de complexidade, com grande aplicação em problemas práticos da engenharia. Nesta técnica, são utilizados os modelos de turbulência para modelar os maiores vórtices nas diferentes escalas, embutindo aproximações ou funções empíricas para o fechamento matemático das equações do movimento não permanente.

Nos escoamentos turbulentos, as flutuações de transporte da quantidade de movimento, energia e massa podem ser de pequena escala e alta frequência, podendo ser computacionalmente dispendiosas para serem simuladas por cálculos diretos (DNS). Dessa forma, ao aplicar técnicas com as equações das médias de Reynolds para Navier-Stokes, surgem variáveis desconhecidas adicionais, que demandam modelos de turbulência para fechamento do sistema de equações (ARANTES, 2007; FERZIGER; PERIC, 2002).

A escolha do modelo de turbulência é importante para simular corretamente o desenvolvimento da camada limite (LOPES; LEANDRO; CARVALHO, 2018; QIAN *et al.*, 2009). No entanto, alguns trabalhos desenvolvidos especificamente para vertedouros em degraus têm mostrado que a escolha do modelo de turbulência tem pouca influência sobre os perfis de velocidade (BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; KOSITGITTIWONG; CHINNARASRI; JULIEN, 2013; QIAN *et al.*, 2009), nas

profundidades (BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ et al., 2016) e nos campos de pressão (BAI; ZHANG, 2017).

A Tabela 2.1 apresenta alguns trabalhos desenvolvidos com CFD que alicerçaram esta pesquisa.

Tabela 2.1. Resumo de alguns trabalhos que analisaram computacionalmente o escoamento em vertedouros em degraus ou com aeração induzida.

Estudo	Software	Modelo de Turbulência	Estrutura	Validação	Conclusões/Pontos Importantes
Chen, Dai e Liu (2002)	Não Informado	k- ϵ	Vertedouro com perfil WES e degraus de transição, 78,9 cm de altura, calha 1,0V:0,75H, 13 degraus, h=6 cm e 30 cm de largura.	Comparação visual entre resultados experimentais e numéricos de profundidades, velocidades e pressões	O modelo de turbulência k- ϵ , com VOF e uma malha não estruturada são capazes de simular o escoamento sobre vertedouros em degraus.
Tabbara, Chatila e Awwad (2005)	ADINA-F	k- ϵ	Vertedouro com perfil WES, 38 cm de altura, calha 1,0V:0,58H, altura do degrau variável.	Comparação visual entre resultados experimentais e numéricos de profundidades	Este foi o primeiro trabalho a utilizar um processo de alteração de malha na interface ar-água a cada intervalo de tempo.
Arantes (2007)	Ansys CFX	SSG Reynolds Stress	Canal em degraus, 1V:0,75H, h=12 cm, estudado por Olinger (2000 <i>apud</i> Arantes, 2007). Vertedouro em degraus estudado por Tozzi (1992)	Comparação visual entre resultados numéricos com dados experimentais obtidos da literatura de velocidades, pressão, posição do início da aeração, concentração de ar e dissipação de energia.	Apresenta diversas análises numéricas de estruturas distintas, a partir das quais o autor conclui pela aplicabilidade do software empregado às estruturas estudadas.
Arantes et al. (2010)	Ansys CFX	SSG Reynolds Stress	Aerador tipo chaminé com ranhura transversal ao fluxo no fundo de um canal	Comparação quantitativa entre os comprimentos dos jatos obtidos por vias experimental, numérica e teórica.	Os resultados obtidos por via numérica se ajustaram melhor àqueles apresentados por Kökpınar e Göğüs (2002)
Aydin e Ozturk (2009, 2010)	Fluent	k- ϵ	Aerador tipo chaminé com ranhura transversal ao fluxo no fundo de um vertedouro com calha lisa	Definição da malha pelo GCI e comparação da taxa de entrada de ar entre resultados numérico, experimental e teórico.	As taxas de entrada de ar (β) foram obtidas com quatro modelos de turbulência (k- ϵ , RNG k- ϵ , k- ω e RSM), mas, não resultaram diferenças importantes.

Tabela 2.1. Resumo de alguns trabalhos que analisaram computacionalmente o escoamento em vertedouros em degraus ou com aeração induzida.

Estudo	Software	Modelo de Turbulência	Estrutura	Validação	Conclusões/Pontos Importantes
Bombardelli, Meireles e Matos (2011)	FLOW-3D	k- ϵ RNG k- ϵ	Vertedouro com perfil WES, 2,9 m de altura, calha 1,0V:0,75H com 1,0 m de largura.	Compararam resultados experimentais e numéricos de vazão, profundidades e velocidades em um vertedouro em degraus com foco na região não aerada.	Observaram nas simulações uma zona junto ao pseudofundo onde a velocidade é praticamente constante ao longo da calha do vertedouro (não observado nos experimentos). Verificaram que o modelo k- ϵ oferece bons resultados em termos de profundidades e velocidades em relação ao RNG k- ϵ .
Simões (2012)	Anslys CFX	k- ϵ , RNG k- ϵ , SSG <i>Reynolds Stress, Zero Equation</i> , k- ω , BSL e k- ϵ EARMS.	Calha em degraus precedida de um conduto forçado. Vertedouros em degraus com declividades $\theta = 53,13^\circ, 45^\circ, 31^\circ$ e $11,3^\circ$, modelados em escala de protótipo.	Comparação de adimensionais relacionados às profundidades, resistência do escoamento, comprimentos de aeração, entre outros, com dados experimentais e formulações apresentadas na literatura.	O modelo k- ϵ é uma boa opção para simular a posição média da superfície livre do escoamento monofásico. As simulações desenvolvidas em escala de protótipo forneceram resultados compatíveis com dados e equações encontradas na literatura.
Lobosco (2013)	OpenFOAM	k- ϵ	Modelo CEDEX: degraus de transição com altura reduzida, com calha com declividade 1V:0,75H e 12 degraus.	Os resultados foram comparados com dados obtidos na bibliográfica (CHEN; DAI; LIU, 2002; GOMES, 2006)	A interface entre os fluidos foi tratada numericamente com uma DNS enquanto as demais partes do domínio foram tratadas por um modelo de turbulência k- ϵ . A análise numérica empregada para a interface ar-água se diferencia das aplicações tradicionais, onde ao se utilizar um modelo RANS não se considera a ruptura da interface entre ar e água e, conseqüentemente, as flutuações da interface são praticamente negligenciadas
Meireles, Bombardelli e Matos (2014)	FLOW-3D	k- ϵ	Estrutura idêntica àquela de Bombardelli, Meireles e Matos (2011)	Analisaram a posição do início da aeração a partir de dados de análises experimentais e numéricas. A malha foi definida a partir da comparação dos resultados com diferentes malhas.	Foram estudadas cinco metodologias diferentes para estabelecer a posição do início da aeração. As metodologias numéricas constaram em definir a posição onde: a espessura da camada limite (δ) supera a profundidade equivalente de água limpa (h_{90}); o valor U_{rms} (aprox. = k), supera os efeitos da tensão superficial e da gravidade, e; a energia

Tabela 2.1. Resumo de alguns trabalhos que analisaram computacionalmente o escoamento em vertedouros em degraus ou com aeração induzida.

Estudo	Software	Modelo de Turbulência	Estrutura	Validação	Conclusões/Pontos Importantes
					desestabilizadora supera a energia estabilizadora.
Araújo Filho e Ota (2016)	FLOW-3D	RNG k- ϵ	Vertedouro com calha lisa, da UHE Belo Monte, afogado por jusante, controlado por comportas e livre, simulado em escala de protótipo	Compararam, em escala de protótipo, dados numéricos e experimentais de profundidades, capacidade de descarga e pressões.	As maiores diferenças para pressões médias foram observadas na crista do vertedouro e a magnitude das diferenças nos coeficientes de descarga encontrados não ultrapassou $\pm 2,0\%$.
Teng e Yang (2016)	Ansys Fluent	Realizable k- ϵ	Vertedouro com calha lisa e um aerador do tipo chaminé com entradas de ar distribuídas junto ao fundo da calha	Verificaram a subpressão no ar no duto de aeração, a taxa de entrada de ar (β) e a concentração de ar. A definição da malha foi feita pelo GCI.	Encontraram erros relativos variando entre 2,8% e 4,9% para o coeficiente de descarga, de forma que o modelo computacional resultou maiores valores. Obtiveram valores de β inferiores àqueles estimados pela equação proposta por Kökpinar e Gögüs (2002). A partir desta análise, os autores modificaram a distribuição das aberturas para entrada de ar, resultando um aumento de 33% na quantidade de ar no sistema.
Toro et al. (2016)	OpenFOAM	k- ϵ RNG k- ϵ Lauder-Gibson RSM	Vertedouro com 2,0 m de altura, 0,5 m de largura, calha 1,0V:0,8H. A calha é composta por 37 degraus com $h = 5\text{cm}$.	Para verificar o erro de cada malha em relação aos resultados observados com PIV, foi calculado o NRMSE (Normalized Root-Mean-Square Error) para as velocidades e se chegou a valores da ordem de 6,8%.	Caracterizaram as estatísticas de turbulência na região não-aerada do escoamento.
Lopes, Leandro e Carvalho (2018)	OpenFOAM	SST k- ω	Canal em degraus, com declividade 1V:2H, 50 cm de largura e 28 degraus com $h = 6\text{cm}$.	Aplicaram uma análise estatística aos dados medidos de profundidades com intervalos de confiança e calcularam o GCI para velocidades e profundidades.	Não há uma isolinha global de fração de água (α) que prediga a superfície do escoamento. Dessa forma, os autores sugerem que seja utilizada uma fração de água $\alpha = 0,7$ para a zona não aerada e $\alpha = 0,1$ para a zona aerada.

Os trabalhos resumidos na Tabela 2.1 foram essenciais para a definição da metodologia e critérios adotados nesta pesquisa. Observa-se que o modelo de turbulência k- ϵ foi vastamente utilizado nos estudos, seguido por outros modelos de turbulência de duas equações (e.g., RNG k- ϵ , SST k- ω , Realizable k- ϵ) e, em menor quantidade, modelos de tensões de Reynolds.

Mesmo sendo um modelo de turbulência de duas equações relativamente simples, havendo variações desse modelo também com um histórico de aplicações com sucesso, como o Realizable $k-\varepsilon$ e o SST $k-\omega$, estudos recentes (AYDIN; ISIK; ULU, 2020; CARRILLO *et al.*, 2020; PEREIRA *et al.*, 2021; QIAN *et al.*, 2020; TORRES *et al.*, 2021) com aplicação de CFD a estruturas hidráulicas com escoamento bifásico têm apresentado bons resultados com a aplicação do modelo de turbulência $k-\varepsilon$. Dessa forma, ainda não há uma metodologia ou configuração numérica previamente definida como mais adequada para escoamentos em vertedouros em degraus.

3 COMBINATION OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACHES TO DETERMINE THE MAIN CHARACTERISTICS OF SKIMMING FLOW IN STEPPED SPILLWAYS

Combinação de Abordagens Experimental e Numérica para Determinar as Principais Características do Escoamento sobre Turbilhões em Vertedouros em Degraus

CAPÍTULO 3: COMBINATION OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL APPROACHES TO DETERMINE THE MAIN CHARACTERISTICS OF SKIMMING FLOW IN STEPPED SPILLWAYS

O artigo apresentado neste capítulo foi o primeiro produzido ao longo da pesquisa e é fruto das primeiras dificuldades encontradas. Comparando-se os primeiros resultados numéricos de pressões médias nos patamares e espelhos nos degraus com dados experimentais, observou-se nos gráficos que visualmente os resultados eram semelhantes. Contudo, em termos percentuais, havia diferenças importantes para a exata posição onde o valor numérico estava sendo obtido.

A partir disso, foram feitas diversas análises com diferentes malhas e diferentes modelos de turbulência, resultando na configuração utilizada no modelo computacional apresentado neste artigo (*e.g.*, Figure 3.5 e Figure 3.7). No entanto, devido ao fato de não se ter conseguido reproduzir exatamente os valores de pressão média obtidos experimentalmente nas posições específicas, considerou-se a possibilidade (explorada neste artigo) de haver efeitos de medição devido à posição da tomada de pressão (HELLER, 2011).

Este artigo foi desenvolvido com o software Ansys CFX, utilizando-se a técnica de modelagem RANS com modelo de turbulência $k-\epsilon$. Buscando-se modelar a interação entre as fases ar e água, adotou-se o modelo homogêneo, que corresponde ao modelo VOF (STENMARK, 2013), apresentado em Hirt e Nichols (1981). Com o objetivo de definir qual malha deveria ser aplicada ao modelo, utilizou-se o método do GCI (*Grid Convergence Index*), apresentado em Celik et al. (2008) e inicialmente proposto por Roache (1994).

Em paralelo aos testes de malha, validou-se o modelo com dados experimentais de pressão de Conterato, Marques e Alves (2015) e com valores obtidos na literatura (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; BOES; HAGER, 2003b; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; CHANSON, 1994a; MEIRELES *et al.*, 2012; TOZZI, 1992; ZHANG; CHANSON, 2016b) do expoente N de equações de potência utilizadas para ajustar os perfis de velocidade normalizados pela velocidade máxima.

Após a validação do modelo, foram obtidos dois resultados interessantes. Baseando-se em Lopes, Leandro e Carvalho (2018), foram utilizados dados experimentais de profundidades de Sanagiotto e Marques (2008) para definir quais são os valores de

fração de água (α) que melhor definem a superfície livre na região não aerada e na região aerada do escoamento sobre turbilhões no modelo VOF (ou homogêneo). No entanto, ao expandir a revisão bibliográfica, observou-se que mesmo que alguns trabalhos considerem que o modelo multifásico homogêneo é adequado para analisar a incorporação de ar no escoamento (ARANTES, 2007; ZHAN; ZHANG; GONG, 2016), outros trabalhos mostram que modelos não homogêneos são mais adequados (ALWON *et al.*, 2017, 2019). Assim, os valores propostos neste trabalho para representar a superfície livre nas diferentes regiões do escoamento ficaram limitados a problemas semelhantes ao analisado, que consistem em análises de vertedouros em degraus com calhas com declividade 1,0V:0,75H, em escala 1:10, com modelo multifásico homogêneo.

Outro resultado interessante constou na distribuição de pressões dentro dos degraus, ao longo dos patamares e espelhos. Os resultados obtidos corroboram com resultados experimentais apresentados por Sanagiotto (2003), Zhang, Chen e Wang (2012), Sánchez-Juny, Bladé e Dolz (2007) e Amador, Sánchez-Juny e Dolz (2009). Em parte, os perfis de pressão obtidos computacionalmente, em comparação com os perfis apresentados nestes trabalhos, explicaram as diferenças encontradas entre os resultados numéricos e os resultados experimentais de Conterato, Marques e Alves (2015).

Ao final, foram definidos parâmetros estatísticos para os valores instantâneos de pressão a partir de dados experimentais obtidos em Sanagiotto e Marques (2008), os quais foram utilizados para analisar as implicações das incertezas nos dados de pressão média obtidos em estudos experimentais. Assim, considerando-se que para a estimativa das solicitações mecânicas nas faces dos degraus, nas etapas de projeto, devem ser consideradas as pressões com 0,1% e 99,9% de probabilidade de serem excedidas e não pressões médias, e que os valores de desvio padrão e de coeficiente de distribuição probabilística tendem a valores relativamente constantes na região onde ocorrem as pressões máximas (nos patamares) e mínimas (nos espelhos), concluiu-se que incertezas na posição dos instrumentos, desde que respeitados os limites apresentados, não irão representar diferenças importantes nos valores de $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ utilizados.

Este capítulo se baseia no seguinte artigo, publicado na Revista Brasileira de Recursos Hídricos:

TASSINARI, Lucas Camargo da Silva; SANAGIOTTO, Daniela Guzzon; MARQUES, Marcelo Giulian; LAUFFER, Luísa Lüdtke; TRIERWEILER NETO, Edgar Fernando. Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, 2020.

Abstract

The traditional approach for the hydrodynamic characterization of the flow down stepped spillways is through physical modeling, which is susceptible to scale effects and has limitations related to experimental apparatus, laboratory space and the spatial discretization of data collection. Computational fluid dynamics (CFD) is an important tool for hydrodynamic analysis because, if used properly, it presents great potential for application in hydraulics. In this work, CFD was used to model the skimming flow down a stepped spillway to investigate the effects of possible pressure measurement errors due to uncertainties in the position of the sensors within the steps. The numerical model was validated through literature velocity profiles and pressure experimental data. The results showed that the best values of water fraction (α) to define free surface are $\alpha = 0.30$ in the nonaerated region and $\alpha = 0.10$ in the aerated region. Statistical parameters were calculated using experimental data to estimate extreme pressures. These parameters and the simulation results were used to determine that the extreme maximum and minimum pressures occur, respectively, in the region of $0.81 < x/l < 0.98$, in the horizontal faces, and in the region of $0.93 < y/h < 0.98$, in the vertical faces.

Keywords: stepped spillways, CFD, free surface, turbulence, pressure.

3.1 Introduction

When spillways are constructed in steps, part of the energy of the flow dissipates along the spillway itself, allowing to reduce the dimensions of the energy dissipation structures constructed downstream of the dams (CHEN; DAI; LIU, 2002; FRIZELL;

FRIZELL, 2015; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010; TABARI; TAVAKOLI, 2016), generating significant financial savings.

There are two approaches to estimate the characteristics of air–water two-phase flows down stepped structures: physical modeling and numerical simulation, and both approaches have uncertainties (PFISTER; HAGER, 2014). Physical modeling is susceptible to scale effects and has limitations related to the spatial discretization of data collection, instrumentation and available laboratory infrastructure (e.g., physical space and pumping capacity). Computational numerical modeling, therefore, emerges as an important tool for analyzing flows, providing greater flexibility to study hydraulic structures with different configurations. However, the quality of the results is sensitive to the turbulence model, the grid quality, the calibration and the validation of the results, among others.

Traditionally, the approach of hydrodynamic characterization of flow down stepped spillways is done through physical modeling (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; CHANSON, 1993; GOMES, 2006; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; TOZZI, 1992; ZHANG; CHANSON, 2016b, 2016a), from which it was possible to characterize the flow on different configurations of stepped spillways by analyzing average and instantaneous pressures, energy dissipation and aeration in structures with chutes of different slopes, such as: 1.0V:0.75H (e.g., MEIRELES et al., 2012; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008), 1.0V:0.8H (e.g., AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; SÁNCHEZ-JUNY; BLADÉ; DOLZ, 2007), 1.0V:1.0H (e.g., DAI PRÁ et al., 2012; SIMÕES et al., 2013; ZHANG; CHANSON, 2016b), 1.0V:2.0H (e.g., BUNG, 2011), among others.

From these works, it is concluded that, in general, the negative pressures appear on the vertical faces of the steps, with its upper end being the region where the negative pressures with largest magnitudes are expected (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; CHEN; DAI; LIU, 2002; LOBOSCO; SCHULZ, 2010; ZHANG; CHEN; WANG, 2012). The most important positive pressures appear on the horizontal face, in the region near the external edge of the step (DAI PRÁ *et al.*, 2012; SANAGIOTTO, 2003), or in relative positions between 75 and 80% of the total horizontal face length, as verified by Zhang, Chen and Wang (2012).

Zhang, Chen and Wang (2012) studied pressures along the chute in the nonaerated and gradually aerated regions of the flow down a 1.0V:2.0H stepped spillway model. At the horizontal faces, the authors observed a variation of the pressures in the form of an

“S,” so that the most extreme pressures are not exactly at the ends of horizontal faces, but at some distance from these points. In the vertical faces, negative pressures occur in a region very close to the outer step edge, and become more extreme as the flow rates increase.

Gomes (2006) studied the pressure coefficients along the steps as a function of the dimensionless longitudinal position S' , which is defined as:

$$S' = \frac{L - La}{ha} \quad 3.1$$

where L = longitudinal distance measured along the chute parallel to the pseudobottom; La = length until the inception point, both measured from the beginning of the crest of the spillway; and ha = depth in the inception point.

The root mean square pressure coefficient, defined by Equation 3.2, presented smooth growth for $S' \leq -7$, with a peak around $S' \approx 0$. At $S' \approx 4$, the process of attenuation of extreme pressures and pressure fluctuations initiate. As a consequence, the pressure coefficients values were more critical in the range of $0 \leq S' \leq 4$.

$$C_{\sigma_p} = \frac{\sigma_p}{\frac{u_m^2}{2 \cdot g}} \quad 3.2$$

where C_{σ_p} = root mean square pressure coefficient; σ_p = root mean square of pressure fluctuations; u_m = mean flow velocity and g = gravitational acceleration.

The flows found in engineering practice are predominantly turbulent and therefore require special treatment (FERZIGER; PERIC, 2002). Turbulent flows are highly unsteady and composed of three-dimensional vortices with different sizes and quantities of energy whose details can be studied with the aid of physical experiments or numerical solutions of the flow-governing equations (FERZIGER; PERIC, 2002; SIMÕES, 2012). The governing equations (conservation of mass, momentum and energy) are discretized and solved numerically for the domain of interest using computational fluid dynamics (CFD) tools.

In turbulent flows, the fluctuations of transport of mass, momentum and energy can be of small scale and high frequency, and may incur a high computational cost when simulated with direct numerical simulations (DNS).

Thus, instead of using the equations for instantaneous quantities, time-averaged values or manipulations can be used to remove small scales. However, as a result, additional unknown variables emerge, which require turbulence models to solve the governing equations and enable their closure. This is what is done in the Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) numerical simulation technique, in which all the unsteadiness are separated into mean values and fluctuations, which are modeled with turbulence models (ARANTES, 2007; FERZIGER; PERIC, 2002).

The correct selection of the turbulence model is important to simulate the boundary layer development properly (LOPES; LEANDRO; CARVALHO, 2018; QIAN *et al.*, 2009). However, some works developed specifically for stepped spillways have shown that the choice of turbulence model has little influence on velocity profiles above the pseudobottom (BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; KOSITGITTIWONG; CHINNARASRI; JULIEN, 2013; QIAN *et al.*, 2009), water depths (BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ *et al.*, 2016) and pressure fields (BAI; ZHANG, 2017).

To our knowledge, Chen, Dai and Liu (2002) were the first researchers to simulate flow down a stepped spillway with a numerical turbulence model. These authors used a numerical model with an unstructured mesh, the Volume of Fluid (VOF) method (HIRT; NICHOLS, 1981) to treat the free surface and the k – ε model (JONES; LAUNDER, 1972; LAUNDER; SPALDING, 1974) for the turbulence closure.

Since then, several other studies have used numerical simulation to evaluate flows along stepped spillways. Bombardelli, Meireles and Matos (2011) compared experimental and numerical results of discharge, depth values and velocity profiles in a stepped spillway with a focus on the nonaerated region, important for the flow down spillways in small dams or with large specific discharges. The simulations were performed with FLOW-3D software, with structured meshes, with free surface treatment with the TruVOF model and the turbulence models k – ε and RNG k – ε . In analyzing the results of the simulations with the different models of turbulence, the authors verified that the k – ε model offers good results in terms of depths and velocities, with differences of 1% for velocities and 0.5% for the discharges between the different models of turbulence.

Later, Meireles, Bombardelli e Matos (2014) analyzed the position of the inception point in skimming flow down stepped spillways, comparing experimental data (BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011) and numerical data obtained with FLOW-3D software, using five different methodologies to establish this position.

The experimental methodologies consisted of: (i) observing where the boundary layer intercepts the free surface and (ii) observing where the white coloration in the water appeared due to aeration. The numerical methodologies consisted of defining the position where: (iii) the boundary layer thickness (δ) exceeds the equivalent clear-water depth; (iv) the root mean square value of the instantaneous fluctuating wall-normal velocity (u_{rms}), approximated by the value of turbulent kinetic energy (k) close to the free surface, exceeds the effects of surface tension and gravity (CHANSON, 1993); and (v) destabilizing energies exceed stabilizing energies per unit volume (BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011).

Tabari and Tavakoli (2016) studied the effects of stepped spillway geometry in energy dissipation along the chute for different discharges, varying quantity, height and length of steps. They used the software FLOW-3D, with free surface treatment with the VOF method and turbulence modeling with the k - ϵ model. The numerical model validation was done for other geometries, among which that of Felder and Chanson (2011) can be mentioned, from where experimental data of air distribution downstream of the inception point were obtained. It should be pointed out that their validation can be questioned because the physical structure of Felder and Chanson (2011) has a chute with nonuniform step heights with a longitudinal slope of 1V:2H, different from the studied structure with uniform step heights with a slope of 1V:1H.

Toro et al. (2016) characterized the nonaerated region of skimming flow down stepped spillways with OpenFOAM software. The turbulence models used were k - ϵ , RNG k - ϵ and Launder-Gibson RSM and the free surface treatment was done using the VOF method. The authors verified that the numerical results are well adjusted to the experimental results obtained with particle image velocimetry (PIV) and that the velocity profiles, turbulent kinetic energy (k) and turbulent kinetic energy dissipation (ϵ) present a similar evolution along the chute. Lopes, Leandro and Carvalho (2018) sought to establish a procedure for defining the free surface along a stepped chute using the CFD method and the VOF method with the OpenFOAM software and SST k - ω turbulence model. The authors comment that the correct definition of the free surface of the air-water two-phase flows is not unanimous in the literature. According to Lopes, Leandro and Carvalho (2018), it is usual to define the free surface in experimental works by adopting the depth where there is an air concentration equal to 90% (BOES; HAGER, 2003b; BUNG, 2013; CHANSON, 1993; PFISTER; HAGER, 2010b, 2010a), whereas, in the works with numerical approaches with VOF models, or similar, the position of the

free surface is usually defined by the equilibrium between the volumes of water and air, that is, for a fraction of water (α) equal to 0.5 (ALBADAWI *et al.*, 2013; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; TORO *et al.*, 2016). In a smaller quantity, some works with a numerical approach consider the same usual criterion of experimental studies, defining the free surface as the depth where the air concentration is equal to 90% (KOSITGITTIWONG; CHINNARASRI; JULIEN, 2013; MEIRELES; BOMBARDELLI; MATOS, 2014). Lopes, Leandro and Carvalho (2018) concluded that there is no global isoline of water fraction (α) that predicts the surface of the flow. Thus, the authors suggest the use of $\alpha = 0.7$ for the nonaerated zone and $\alpha = 0.1$ for the aerated zone, resulting in a 2% error when compared with the experimental results. The consideration of $\alpha = 0.5$ should be done only for the nonaerated zone, where the authors obtained errors between 5 and 8%.

It is observed, therefore, that computational numerical modeling with CFD tools, if used correctly, presents great potential for application in engineering practice in the initial stages of projects and/or in conjunction with physical models (ARANTES, 2007; AYDIN; OZTURK, 2009; CHEN; DAI; LIU, 2002). (AYDIN; OZTURK, 2010) further comment that these CFD analyses, based on relatively simple mathematical models, are already commonly used in aerodynamic, nuclear, industrial and other models.

This paper, therefore, aims to answer the following scientific questions:

- Are the CFD tools that use RANS techniques suitable for modeling the air–water two-phase flow that occurs on stepped spillways? Are the mean values of pressure and velocity representative when compared with experimental data?

- In physical modeling, the pressure measurement in the steps is made at specific points, and may not necessarily register the extreme mean pressures (positive and negative) that occur in the horizontal and vertical faces of steps. Can CFD be used to investigate measurement effects due to uncertainties in meter position considering a full-scale prototype?

3.2 Materials and Methods

To answer the two questions, the methodology presented in this paper aims to validate the numerical model, to analyze the behavior of the mean pressures on horizontal and vertical faces of steps and to estimate how far these values distance themselves from the average maximum pressures (horizontal faces) and minimum (vertical faces) that

would be measured if, experimentally, the measurement of pressures were continuous along the steps. This methodology is divided into sections dealing with the experimental setup, the numerical modeling, the validation methodology of this numerical model and the data analysis.

3.2.1 *Experimental setup*

The physical hydraulic structure used in this work is described in Sanagiotto (2003), Sanagiotto and Marques (2008) and Gomes (2006) and is very similar to the structure used in other studies (CONTERATO, 2011, 2014; CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015; NOVAKOSKI *et al.*, 2017a, 2017b; OSMAR *et al.*, 2018), with small differences in the approach channel and the channel downstream of the steps.

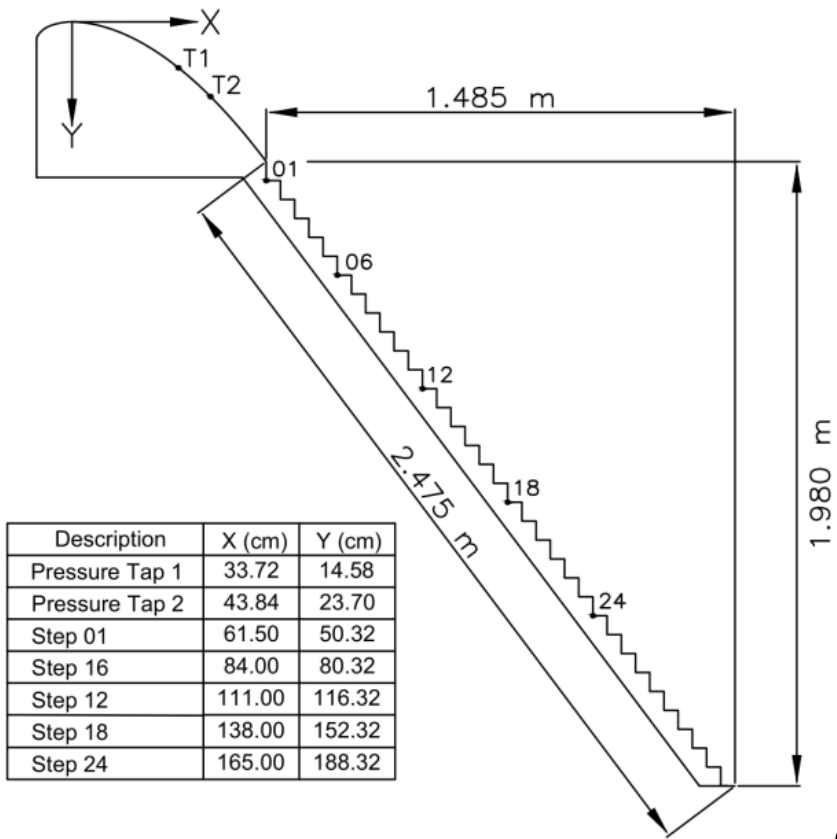
The hydraulic structure (Figure 3.1) is a physical model scaled 1:10 with a total drop height of 2.44 m and a chute 0.40 m wide with a slope of 1.0V:0.75H (53.13°). The chute is composed of 32 steps, 0.06 m height. The upstream end of the ogee crest is smooth, without variable size steps between the ogee and the chute. The design head is $H_d = 0.40$ m and the ogee profile is described by $Y = 1.08945.X^{1.85}$, with origin on the crest.

Data from Sanagiotto and Marques (2008) and Sanagiotto (2003) include specific discharges between 0.03 m³/s/m and 0.70 m³/s/m, corresponding to the skimming flow regime. These authors evaluated depths, velocities, average and instantaneous pressures and aeration inception points.

Depths were measured with a point gauge perpendicular to the pseudobottom and in the center of the chute. Mean velocities were measured with a Pitot tube coupled with a differential pressure transducer. Mean and instantaneous pressures were measured with transducers and piezometers at positions distant 0.375 cm, 1.625 cm, 2.875 cm and 4.125 cm from the outer edge at the horizontal faces and distant 0.50 cm, 2.15 cm, 3.80 cm and 5.45 cm from the outer edge in the vertical faces, totaling eight pressure taps on each measured step. Flow aeration evaluations were performed visually. The measurements of pressure, depth and velocity were performed at steps 01, 06, 12, 18 and 24, as shown in Figure 3.1a.b.



(a)



(b)

Figure 3.1. Physical model with steps 0.06 m height: (a) photo of the structure during a test and (b) sketch of the structure with coordinates of the pressure taps and external edges of monitored steps (adapted from Sanagiotto, 2003).

Different models of pressure transducers were used, with maximum errors of ± 9 mm and minimum of ± 2 mm. The differential transducer used in the velocity measurements had an error of ± 6 mm, resulting in errors in velocity measurements of the order of ± 0.35 m/s. The data were collected at a frequency of acquisition of 50 Hz over a 180 seconds interval. Of the eight pressure taps at steps, six were monitored with transducers and only two with piezometers (close to the inner corner of the step, one in vertical and the other on the horizontal face). For more details, see Sanagiotto (2003), Sanagiotto and Marques (2008) and Gomes (2006).

Conterato, Marques and Alves (2015) provided pressure data along the same chute used by Sanagiotto and Marques (2008) in all the 20 first steps with only one pressure tap on each vertical and horizontal face, distant 3 mm from the external edge of the steps. The transducers used to obtain this data have maximum errors of ± 9 mm (CONTERATO, 2011; GOMES, 2006).

3.2.2 Numerical modeling and governing equations

Three-dimensional flow simulations were performed using the Ansys CFX software, which uses the finite volume method (ANSYS INC., 2013a) and has a history of successful use for CFD simulations of various hydraulic structures (ARANTES, 2007; ARANTES *et al.*, 2010; DETTMER *et al.*, 2013; GABL; RIGHETTI, 2018; SANAGIOTTO *et al.*, 2019; SANAGIOTTO; ROSSI; BRAVO, 2019).

The equations of continuity and momentum solved by the software are

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad 3.3$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad 3.4$$

where ρ = fluid density; t = time; $u_{i,j}$ = velocity; p' = modified pressure, given by Equation 3.5; μ_{eff} = effective viscosity; S_M = some of the body forces (ANSYS INC., 2013a); p = pressure; and k = turbulence kinetic energy.

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad 3.5$$

The turbulence was modeled in the RANS technique with the turbulence model $k-\varepsilon$ (JONES; LAUNDER, 1972; LAUNDER; SPALDING, 1974), which has a long history of applications in studies with CFD related to stepped spillways (AYDIN; OZTURK, 2009; BAYON *et al.*, 2018; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; CHEN; DAI; LIU, 2002; LI *et al.*, 2018; LOBOSCO; SCHULZ, 2010; MEIRELES; BOMBARDELLI; MATOS, 2014; TABARI; TAVAKOLI, 2016; TABBARA; CHATILA; AWWAD, 2005; TORO *et al.*, 2016). This model is based on the concept of viscosity within the boundary layer, so that the effective viscosity (μ_{eff}) is the sum of the molecular viscosity (μ) and the turbulent viscosity (μ_t) of the fluid. It is assumed that the turbulent viscosity is related to the turbulent kinetic energy (k) and to the turbulent kinetic energy dissipation rate (ε) according to Equation 3.6, where C_μ is a dimensionless constant and equal to 0.09, in this study. The values of k and ε are obtained directly from the differential transport equations.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 3.6$$

The multiphase model adopted was the homogeneous model with a free surface at the interface. According to Stenmark (2013), the homogeneous model implemented in Ansys CFX corresponds to the VOF model, which solves a set of momentum equations in the domain, storing the volume of the two phases in each cell as a fraction (HIRT; NICHOLS, 1981). In Equations 3.7 and 3.8, the physical properties of density (ρ) and viscosity (μ) are obtained in each cell from the volume fractions of air (α_{air}) and water (α):

$$\rho = \alpha \cdot \rho_{\text{water}} + \alpha_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \quad 3.7$$

$$\mu = \alpha \cdot \mu_{\text{water}} + \alpha_{\text{air}} \cdot \mu_{\text{air}} \quad 3.8$$

Further details can be found at Ansys Inc. (2013).

3.2.3 Boundary conditions

The simulations were carried out for the steady flow regime, with mesh adaptation at the air–water interface and with a high-resolution advection scheme.

Boundary conditions were applied to all faces of the domain shown in Figure 3.2, as described below. This figure indicates the faces where the conditions inlet, outlet and opening were applied. A non-slip boundary condition was applied to other faces (chute, bottom, approach and restitution channels, and crest) considering a null roughness to all the walls.

The domain of the numerical model has a smaller width than the physical model. So, it was decided to consider the condition of symmetry in the walls of the structure, which forces the variables of field of flow to be mirror images with respect to the field of symmetry (ÇENGEL; CIMBALA, 2006). This simplification impairs the representation of anisotropic turbulence, but allows the reduction of computational effort and eliminates possible wall effects due to the smaller structure width (ARANTES, 2007).

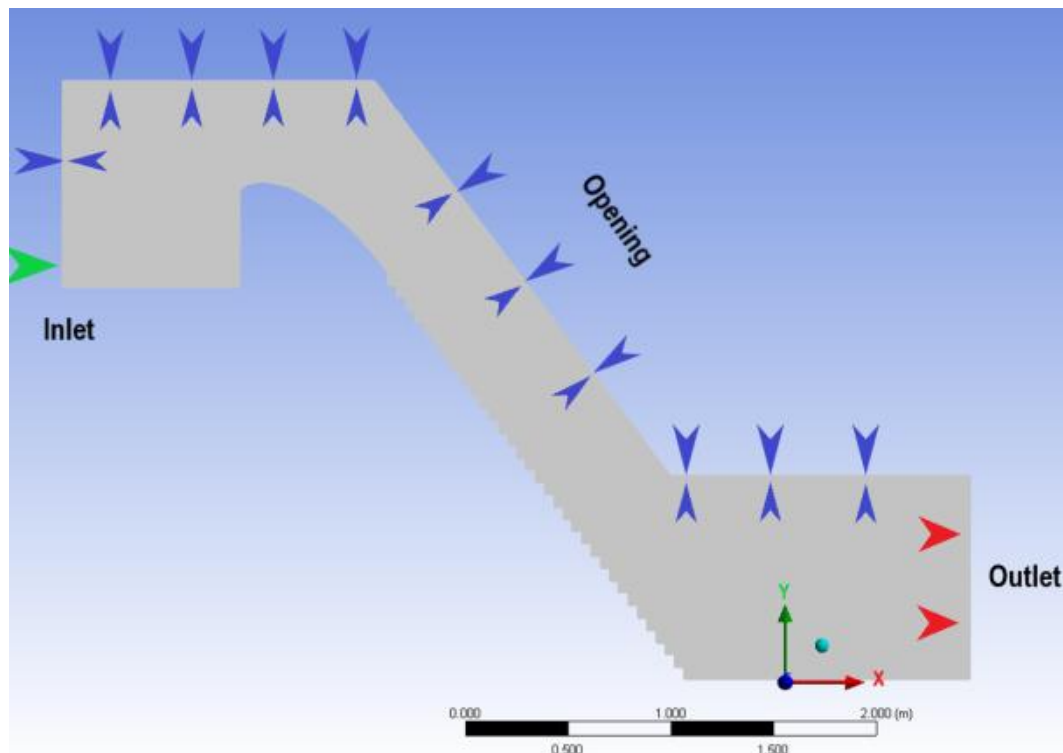


Figure 3.2. Domain and boundary conditions used in the numerical model.

For the inlet condition, a mass flow discharge was applied. A high turbulence intensity (10%) was applied in the inlet condition based on Ma et al. (2002), who, when

studying an urban river subject to flooding in a mountainous region, observed that the simulated velocities did not present graphically visible differences considering the turbulence intensity in the inlet and outlet conditions as 5%, 10% and 20%, impacting only the magnitude of the turbulent kinetic energy and the rate of dissipation of the flow and only in the region close to the inlet and outlet boundary conditions. In the outlet, atmospheric pressure was applied as a boundary condition. At the top, opening conditions were considered with a high intensity of turbulence (10%) and atmospheric pressure.

Simulated specific discharges were $0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ and $0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ on a model scale (1:10), equivalent to $6.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ and $9.5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ on full-scale prototype conditions. It was determined by experimental observations (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008) that the inception points are located on steps 14 and 21, respectively, for the simulated discharges.

3.2.4 Grid testing and model validation

The grid testing was made with the Grid Convergence Index (GCI) method, presented by Celik et al. (2008) and proposed initially by Roache (1994), which allows estimation of the uncertainties arising from the use of a given grid for any variable. After the grid definition, the model validation was developed by comparing experimental data and numerical results.

The GCI method was developed based on the Richardson extrapolation aiming to provide an objective asymptotic approximation to quantify the uncertainty of the grid convergence. This method has a history of application in studies with CFD simulations in spillway structures (AYDIN; OZTURK, 2009; BAI; PENG; ZHANG, 2017; BAYON *et al.*, 2018; LI; ZHANG; XU, 2018; LOPES; LEANDRO; CARVALHO, 2018; TENG; YANG, 2016; YANG; TENG; ZHANG, 2019).

In general terms, in an analysis of three meshes with different numbers of elements, if the uncertainties due to the grid convergence, quantified numerically as the GCI, are lower than the accuracy of the measurement of a variable, such as pressure or velocity, the intermediate mesh can be chosen. A more refined mesh would require more computational effort and the increase of precision would not be justified in comparison with measurement errors.

The GCI was calculated for mean pressures close to the external edges of the steps, distant 0.375 cm from these, in agreement with the experimental apparatus of Sanagiotto and Marques (2008). Three simulations were performed with the same contour and flow

conditions, with three unstructured meshes (Figure 3.3) with mesh adaptation at the air–water interface. The numbers of elements of the meshes at the beginning of the simulation were 3.7×10^5 (coarse grid), 1.1×10^6 (medium grid) and 3.1×10^6 (fine grid).

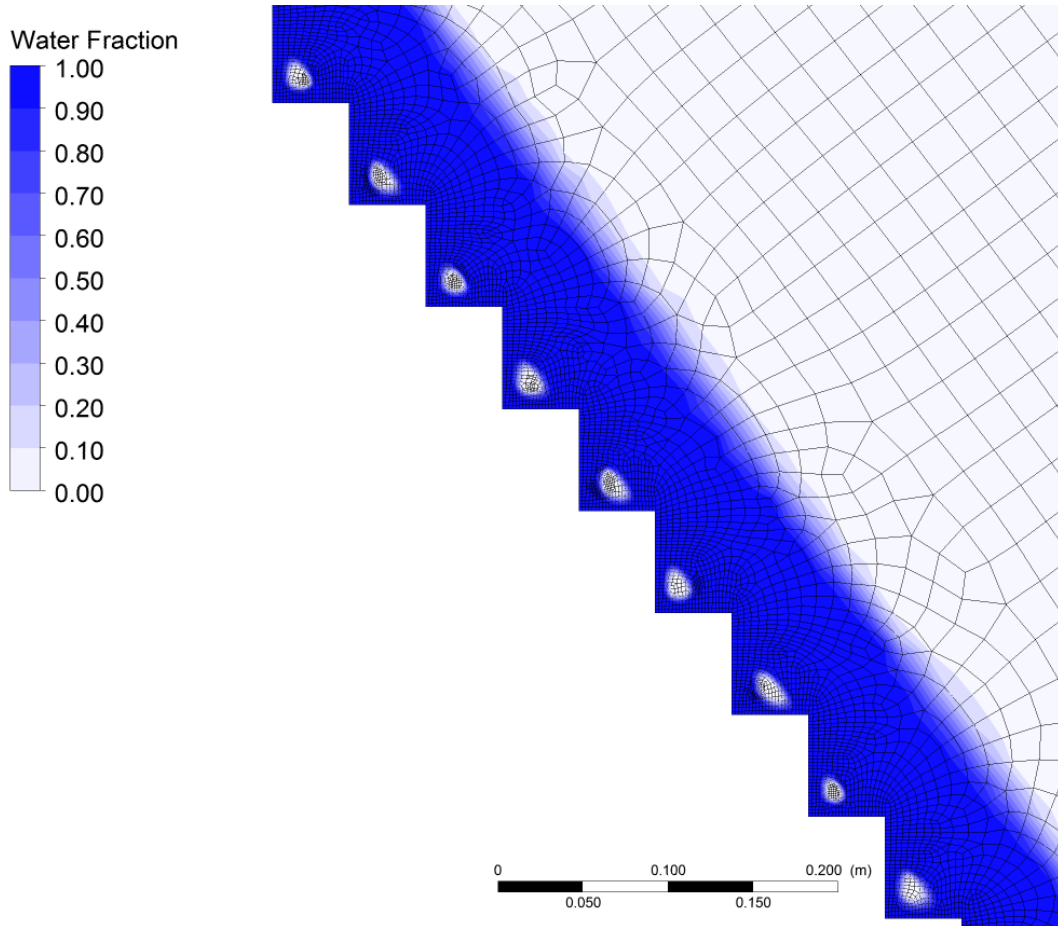


Figure 3.3. A medium grid in the region on the first steps of the stepped spillway and the water fraction (α) at the end of the simulation.

A widely used methodology for the validation of numerical models is the visual comparison between physical and numerical model data of depths (CHEN; DAI; LIU, 2002; TABBARA; CHATILA; AWWAD, 2005), velocities (ARANTES, 2007; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; CHEN; DAI; LIU, 2002) and pressures (ARANTES, 2007; CHEN; DAI; LIU, 2002) or even in visual comparison on a prototype scale of these variables (ARAUJO FILHO; OTA, 2016). In the present work, this validation was carried out from data of mean pressure (CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015) and velocity data found in the literature (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; BOES; HAGER, 2003b; MEIRELES *et al.*, 2012; TOZZI, 1992; ZHANG; CHANSON, 2016b).

3.2.5 Data analysis

To establish a procedure to determine the free surface of the skimming flow for spillways with slope of 1V:0.75H from CFD simulations using the VOF method, or similar, depth data were used (SANAGIOTTO, 2003) to establish values of the fraction of water (α) that describe the free surface of the flow, such as done by Lopes, Leandro and Carvalho (2018).

The velocities obtained numerically were used to adjust a power-law velocity profile expressed by Equation 3.9 for the boundary layer development in the nonaerated region. The adjustment coefficient ($1/N$) serves as a parameter of validation of the numerical model through comparison (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; MEIRELES *et al.*, 2012; ZHANG; CHANSON, 2016b). For the aerated region of the flow, the power law to be adjusted is expressed by Equation 3.10 (BOES; HAGER, 2003b; CHANSON, 1994a), where the dimensionless variable of the x-axis is related to the flow depth (h_{90}), and not to the thickness of the boundary layer (δ).

$$\frac{u}{u_{m\acute{a}x}} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/N} \quad 3.9$$

$$\frac{u}{u_{90}} = \left(\frac{y}{h_{90}}\right)^{1/N} \quad 3.10$$

where u = longitudinal velocity; y = normal distance to the pseudobottom; δ = boundary layer thickness; N = exponent; h_{90} = characteristic mixture (air–water) depth with local air concentration of $C = 0.90$; and u_{90} = mixture surface velocity (velocity at the depth h_{90}).

To analyze the effect of possible errors of measurement of extreme pressures commonly adopted in projects ($P_{0.1\%}$ and $P_{99.9\%}$), due to the uncertainties in the position of the transducer in the steps, experimental data of pressure measured with transducers by Sanagiotto and Marques (2008) were used in this study. The standard deviation values (σ_d) and statistical probability distribution coefficients $N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$ were calculated, respectively, using Equations 3.11 and 3.12, following the same methodology used in studies of extreme pressures in hydraulic jumps (NOVAKOSKI *et al.*, 2017a; TEIXEIRA, 2008).

$$N_{0.1\%} = (P - P_{0.1\%})/\sigma_d \quad 3.11$$

$$N_{99.9\%} = (P_{99.9\%} - P)/\sigma_d \quad 3.12$$

where $P_{\%}$ = pressure head with a certain probability of nonexceedance. These parameters were used to transform values of mean pressure heads (P), obtained numerically, into $P_{0.1\%}$ and $P_{99.9\%}$.

The effects of the uncertainties in the maximum and minimum mean pressures were analyzed at extreme pressures ($P_{0.1\%}$ and $P_{99.9\%}$), on a prototype scale, due to the position of the transducers and piezometers.

3.3 Model Validation

The model validation was carried out from data of mean pressure and velocity data found in the literature. However, to define the velocity profiles, it was necessary to establish a procedure to determine the free surface of the skimming flow, as shown in the following sections.

3.3.1 Grid testing and model validation through mean pressure

The calculated pressures in the two first steps showed to be very sensitive to the mesh size, well beyond the sensitivity observed in the rest of the chute. The possible cause is the abrupt change of the flow surface (BINDO; GAUTIER; LACROIX, 1993) because there are no transitional steps in the experimental model nor in the numerical model. Thus, for the mesh definition study, it was decided to disregard steps 1 and 2, understanding that from step 3 the uncertainties due to the mesh reduce significantly and assume a more homogeneous and adequate behavior for the proposed analysis.

The uncertainty due to the mesh in the values of mean pressure at the horizontal faces, considering the region close to the external edge of 18 consecutive steps (steps 3 to 20, due to the availability of experimental data) ranged from 0.61% to 7.06%, with an average value of 3.77%, lower than the uncertainty of 5.4% estimated for pressures in Bai, Peng and Zhang (2017) for similarly analyzed steps. For the pressures in the vertical

faces, the uncertainty in the average pressure due to the mesh, in the region near the external edge, ranged from 0.01% to 5.08%, with an average value of 1.87%.

Figure 3.4 shows the development of pressure head profiles at the horizontal faces along the chute, between steps 10 and 20, using the three meshes for the grid testing, and Figure 3.5 shows the results using only the medium grid and the pressure head values obtained experimentally (CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015) 3 mm from the external edge of each step for the model validation.

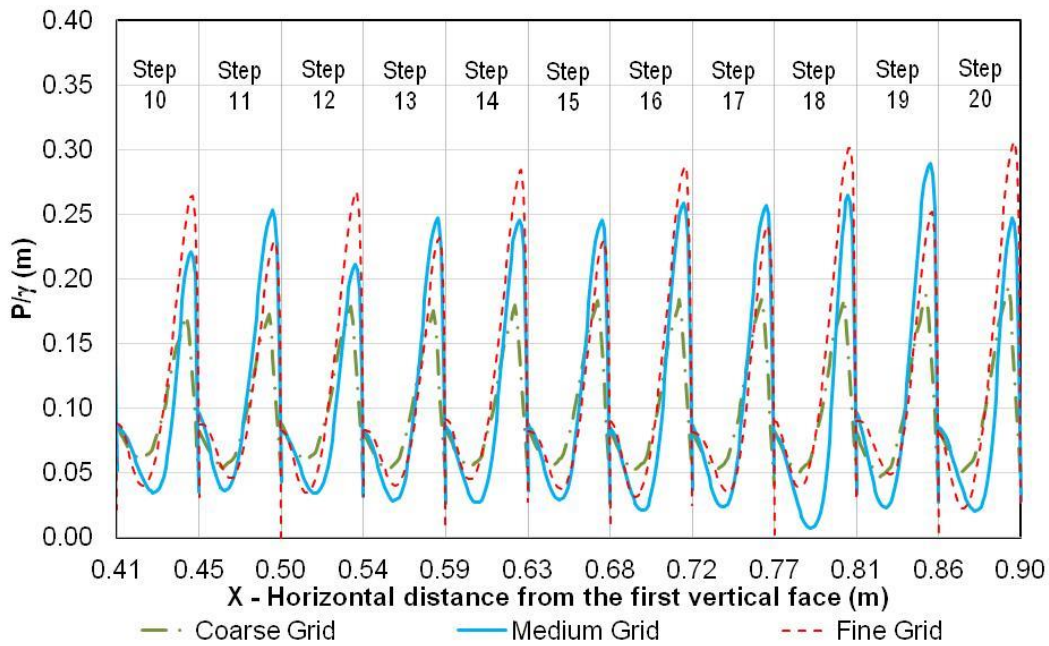


Figure 3.4. Pressure heads at the horizontal faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results for the grid testing, for the specific discharge $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

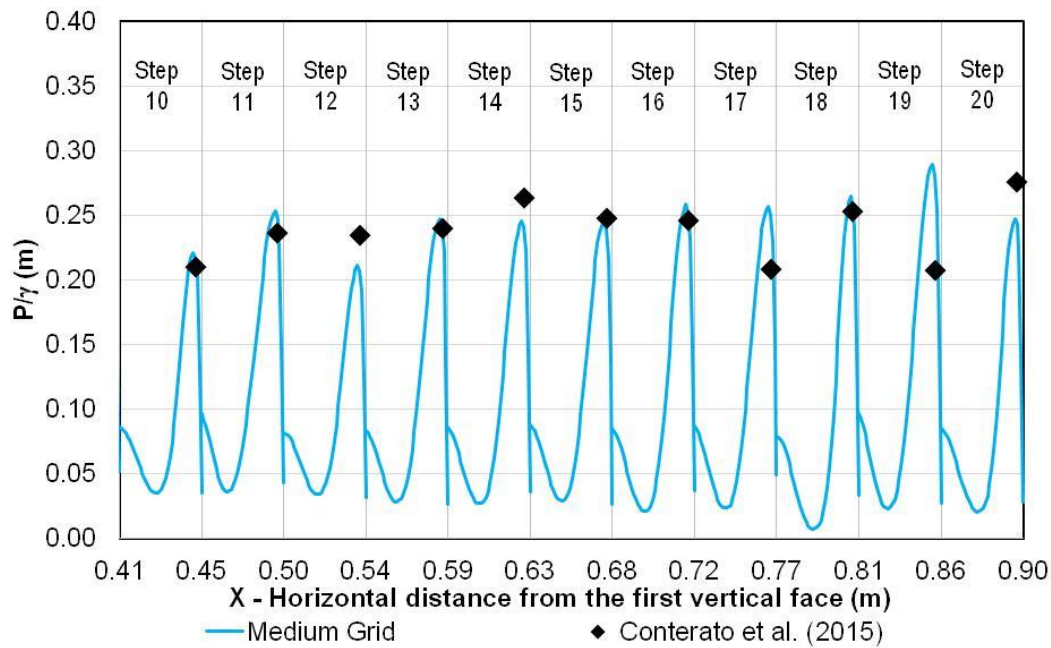


Figure 3.5. Pressure heads at the horizontal faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results with medium grid and experimental data for the model validation ($q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$); in the model scaled 1:10.

As shown in Figure 3.5, the maximum values obtained numerically for the intermediate mesh, for example, are either larger or smaller than the experimental values for different steps. It is also observed that the position of the experimental pressure tap (transducer) is slightly to the right of the position of the maximum pressure in some steps. Thus, it was considered that the numerical model is able to represent the experimentally obtained pressures in most of the steps, considering that small errors in the relative position of the transducer (x/l) could justify greater differences between the experimental pressures and the simulations' results.

When comparing the numerical and experimental data of pressure heads in the same relative position of the horizontal faces (at 3 mm of the outer corner of each step), a mean difference of 1.6% was obtained, with root mean square error (RMSE) equal to 0.03 m for steps 3 to 20.

Similarly, Figure 3.6 shows the development of pressure head profiles in the vertical faces along the chute, between steps 10 and 20, using the three meshes for the grid testing, and Figure 3.7 shows the results using only the medium grid and the experimental data (CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015), also obtained 3 mm from the outer corner of each step for the model validation.

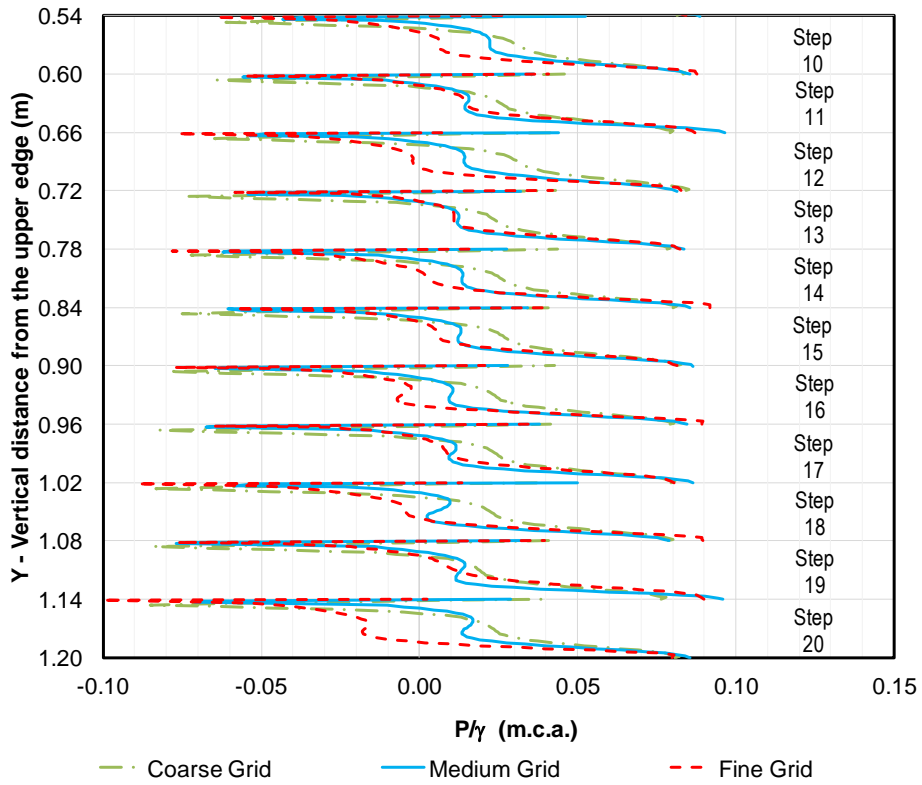


Figure 3.6. Pressure heads at the vertical faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results for the grid testing, for the specific discharge $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

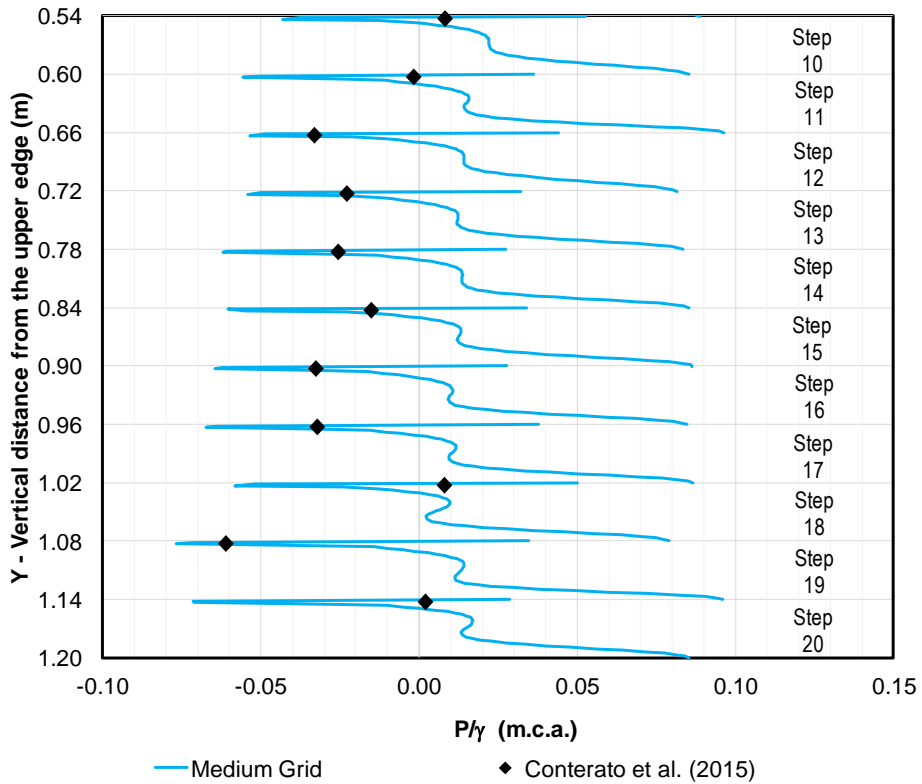


Figure 3.7. Pressure heads at the vertical faces along the chute, between steps 10 and 20: simulations' results with medium grid and experimental data for the model validation ($q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$); in the model scaled 1:10.

Compared with the results obtained for the horizontal faces, bigger differences in the vertical faces between the extreme pressure heads obtained numerically and experimentally were observed. However, it is observed that the profiles of pressure heads in the vertical faces are quite accentuated so that at small vertical distances in the vertical faces there is a significant increase in the magnitude of the pressures. In step 17, for example, considering the medium grid, in a space of 3 mm, the pressure head goes from 0 to -0.067 mH₂O (minimum profile value), so that more extreme pressures may not have been recorded in the experiments because the position of the transducer did not match where the most extreme pressure occurred.

Furthermore, considering the error of 0.009 mH₂O for transducers, more significant percentage errors in the vertical faces are expected because the magnitude of the pressure heads is lower than in the horizontal faces. When comparing the experimental data with the pressure heads obtained numerically in the same position in the vertical faces (at 3 mm of the outer corner of the step), there is an average difference equal to 5.8%, with RMSE = 0.04 m, considering steps from 3 to 20.

From the maximum errors of ± 0.009 m characteristic of the transducers, average errors of 3.84% for the pressures at the horizontal faces and 41.84% for the pressures in the vertical faces were calculated for the experimental data. Because the value of the mean pressures in the vertical faces is relatively low, the error resulted in a large value (41.84%). Because the pressure measurement error is greater than the uncertainty due to the grid convergence, quantified numerically as the GCI, it was decided to use the medium grid with 1.1×10^6 elements, considering an uncertainty due to the mesh size of 3.77% for the pressures at the horizontal faces and 1.87% for the pressures in the vertical faces.

3.3.2 Procedure for determining the free surface of the flow along the stepped spillway

For the determination of the free surface of the air–water two-phase flow, experimental data (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008) and numerical values of dimensionless depths (h/h_c) were compared along the chute (x/x_i), according to Figure 3.8, where x = horizontal distance from the vertical face of the first step and x_i = position of the inception point. The depths obtained numerically from the corner of each step and

perpendicular to the pseudobottom are presented for different water fractions (α), so that $\alpha = 0.1$ indicates the depth where there is 10% water and 90% air, for example, and $\alpha = 0.5$ indicates the depth where there is equilibrium between air and water along the section analyzed.

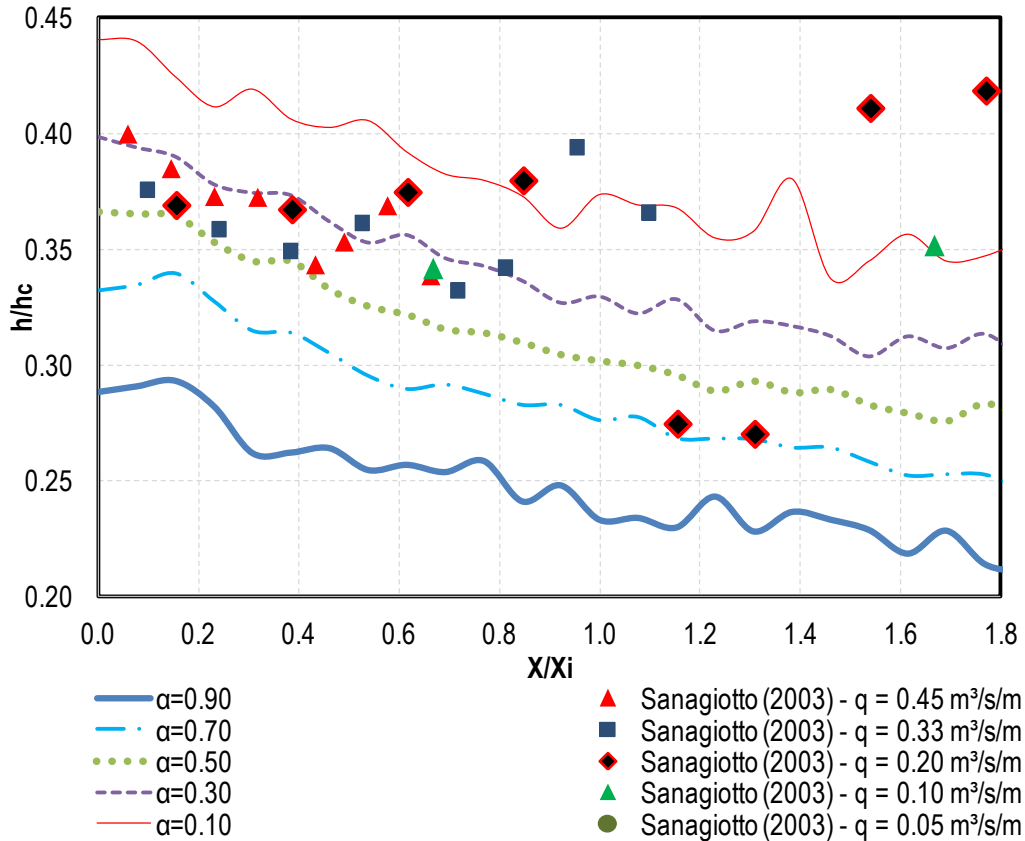


Figure 3.8. Mean depths obtained experimentally and isolines of mean depths obtained numerically for the specific discharge $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ for water fraction values from $\alpha = 0.90$ to $\alpha = 0.10$ along steps 01 to 25.

For the nonaerated region of the flow ($0 \leq x/x_i \leq 1$), the experimental data of depths are close to the isoline $\alpha = 0.30$. Considering the experimental depths for the specific discharge $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, the errors calculated for the isoline $\alpha = 0.30$ vary between 13% and 2%, with an average of 7%, which represents a mean error equal to 4 mm.

For the aerated region of the flow ($x/x_i > 1$), there are less experimental data for the evaluation of which isoline best represents the observed free surface. However, there is an indication that the water fraction is less than $\alpha = 0.30$ because there are two points exactly on the isoline $\alpha = 0.10$, two points above this value and two points near the isoline $\alpha = 0.70$. When considering the depths for the specific discharge $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, the

errors calculated for the isoline $\alpha = 0.10$ vary between 34% and 16%, with an average of 25%, which represents a mean error equal to 13 mm. Although these errors are significant, observing physical models of spillways in laboratories, an absolute error of 13 mm in the aerated region of the skimming flow can be accepted due to the great oscillation of the depths during the tests.

Different from the usual consideration in CFD simulations where the free surface is determined from the isoline where there is the balance between water and air $\alpha = 0.50$ (ALBADAWI *et al.*, 2013; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; TORO *et al.*, 2016) and based on the hypothesis of Lopes, Leandro and Carvalho (2018) that there is no global isoline of water fraction that predicts the free surface at all flows down stepped spillways, different isolines of α were determined for the aerated and nonaerated regions of the flow. So, for spillways with slopes of 1V:0.75H, it is recommended to use $\alpha = 0.30$ for the nonaerated region and $\alpha = 0.10$ for the aerated region.

Although greater differences were found between the experimental and numerical results for the aerated region, the use of $\alpha = 0.10$ has physical sense, so that many experimental studies in the aerated region consider the depth to be h_{90} (BOES; HAGER, 2003b; BUNG, 2013; FRIZELL; FRIZELL, 2015; MEIRELES; BOMBARDELLI; MATOS, 2014).

There are descriptions in the literature of homogeneous multiphase models being considered adequate to evaluate a series of skimming flow characteristics in stepped spillways, such as velocities, pressures and depths (BAI; PENG; ZHANG, 2017; BAI; ZHANG, 2017; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; KOSITGITTIWONG; CHINNARASRI; JULIEN, 2013; LOPES; LEANDRO; CARVALHO, 2018). However, when the analysis is associated with the air entrainment into the flow, the multiphase model configurations are still being discussed. There are papers that consider that the homogeneous multiphase model is adequate to analyze air incorporation (ARANTES, 2007; ZHAN; ZHANG; GONG, 2016) and other works have shown that there are more adequate models (ALWON *et al.*, 2017, 2019). Thus, the procedure proposed here for determining the free surface of the flow along the stepped spillway is limited to simulations with homogeneous multiphase models, such as described in the methodology of the present work.

3.3.3 Validation through velocity distribution

Velocity profiles normalized by u_{\max} inside the boundary layer in the nonaerated region (steps 3 to 14, for $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) obtained from numerical results were adjusted to a power law, according to Equation 3.9, with exponent $N = 3.9$ ($R^2 = 0.87$), as shown in Figure 3.9.

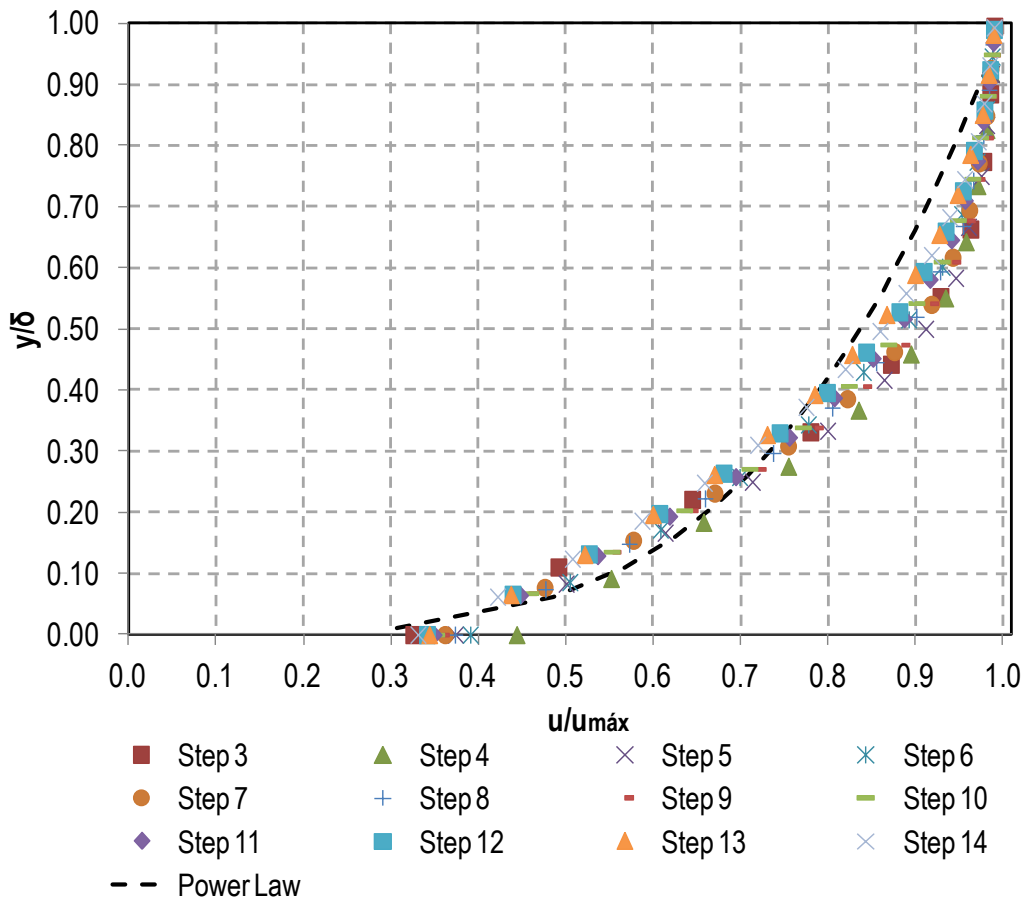


Figure 3.9. Velocity profiles from numerical results in the development of the boundary layer in the outer corners of steps 3 to 14 and profile adjusted with a power law with exponent $N = 3.9$ for a specific discharge $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

The value found for the exponent, $N = 3.9$, is closer to the exponent found in other studies performed for the nonaerated region with experimental approaches, where Zhang and Chanson (2016b) obtained the exponent $N = 4.5$ in a model with slope of 1.0V:1.0H, Meireles et al. (2012) obtained $N = 3.4$ for a stepped spillway with a slope of 1.0V:0.75H and Amador, Sánchez-Juny and Dolz (2009) obtained $N = 3.0$ for a similar structure with a slope of 1.0V:0.8H. From a numerical approach, similar to what is presented in the present work, Bombardelli, Meireles and Matos (2011) calculated an exponent $N = 5.4$

for the nonaerated region of the skimming flow down a stepped spillway with a slope of 1.0V:0.75H.

For the aerated region (steps 15 to 25, for $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$), velocity profiles were related to the characteristic depth h_{90} and normalized by u_{90} , according to Equation 3.10 and Figure 3.10. These profiles were adjusted to a power law with $N = 3.5$ and with an adjustment coefficient equal to 1.05, similar to the equation of Boes and Hager (2003a), who obtained an exponent $N = 4.3$. Equation 3.13 express the power-law velocity profile ($R^2 = 0.92$).

$$\frac{u}{u_{90}} = 1.05 \left(\frac{y}{h_{90}} \right)^{1/3.5} \quad 3.13$$

If the coefficient of adjustment is disregarded, the exponent becomes $N = 4.0$, as shown in Equation 3.14 ($R^2 = 0.89$). The value of $N = 4.0$ is equal to that suggested by Chanson (1994) for the data presented in Tozzi (1992) for a chute with a slope of 1.0V:0.75H.

$$\frac{u}{u_{90}} = \left(\frac{y}{h_{90}} \right)^{1/4.0} \quad 3.14$$

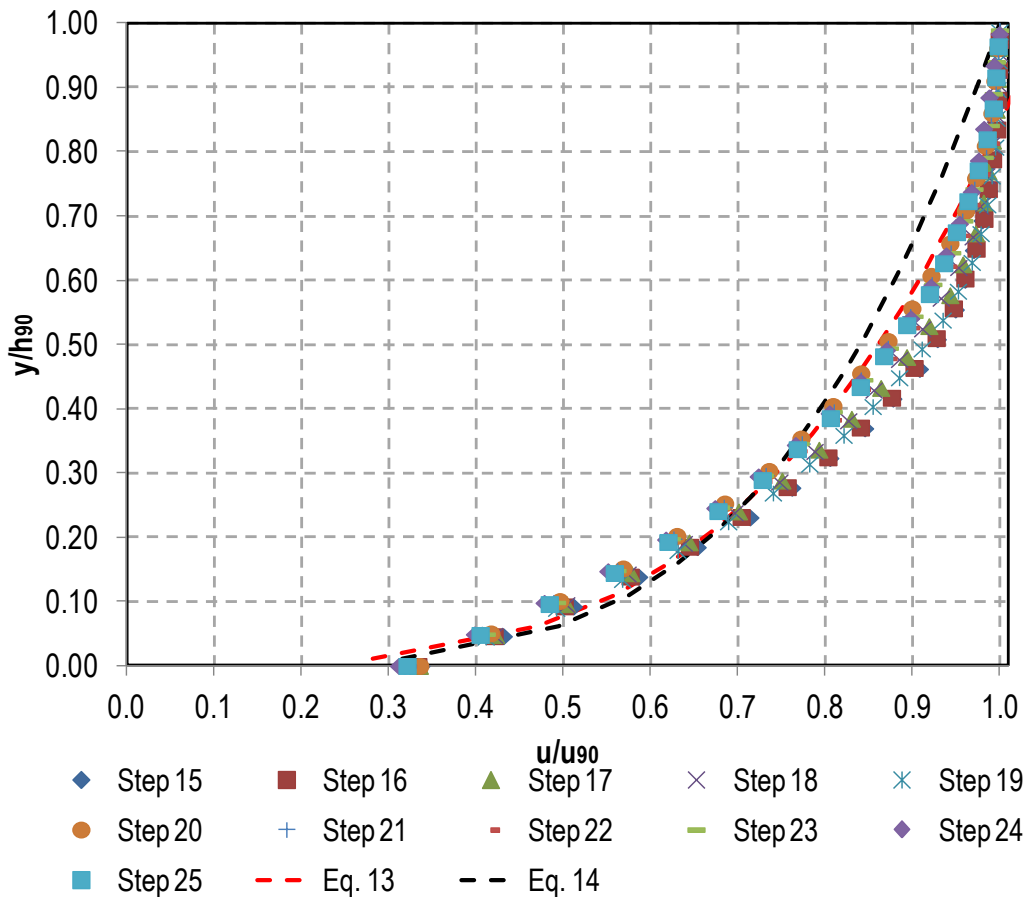


Figure 3.10. Velocity profiles from numerical results in the aerated region (steps 15 to 25, for $q = 0.20 \text{ m}^3/\text{s/m}$) in the outer corners and profiles adjusted with power laws.

3.4 Results and Discussions

3.4.1 Mean pressures on the surfaces of the steps

In the present study, numerical results of mean pressure profiles were normalized by maximum mean pressure along each horizontal face (Figure 3.11). The mean pressure profile (dashed line) was constructed only from numerical data as the mean of the normalized pressures of steps 3 to 21. It was observed that the relative position of the maximum mean pressure occurs between $x/l = 85\%$ and $x/l = 92\%$, where x = horizontal distance from the vertical face to a given point and l = length of the step. In this figure it was included literature experimental data obtained in horizontal faces of steps: Sanagiotto (2003) at steps 6, 12, 18 and 24, for $q = 0.33 \text{ m}^3/\text{s/m}$ and a chute with a slope of 1.0V:0.75H; Sánchez-Juny, Bladé and Dolz (2007) and Amador, Sánchez-Juny and Dolz (2009) for $q = 0.33 \text{ m}^3/\text{s/m}$ and a chute with a slope of 1.0V:0.8H, at the aerated region;

and Zhang, Chen and Wang (2012) for $q = 0.23 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ and a chute with a slope of 1.0V:2.0H, also in the aerated region.

It was considered that in the experimental data obtained from the literature (Figure 3.11), the position of the transducer or piezometer was able to measure the maximum pressure (i.e., it is possible to observe the point where $P/P_{\text{max}} = 1.0$ happens).

By analyzing the relative positions of the pressure points of the cited studies, it can be seen that the positions of the points closest to the outer corners of the horizontal faces vary from $x/l = 86\%$ (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009) to $x/l = 94\%$ (SÁNCHEZ-JUNY; BLADÉ; DOLZ, 2007). From the mean pressure profile (dashed line of Figure 3.11), the pressures at these positions could correspond to the dimensionless pressures $P/P_{\text{max}} = 0.98$ and $P/P_{\text{max}} = 0.93$, respectively.

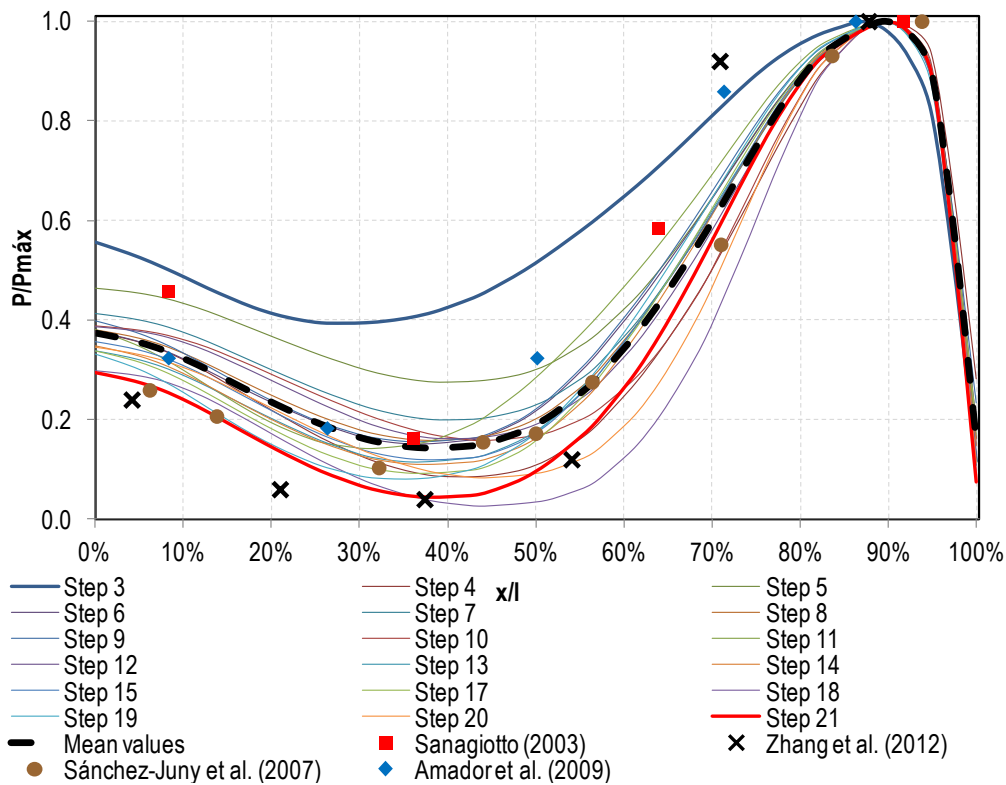


Figure 3.11. Nondimensional pressure profiles (P/P_{max}) for different relative positions (x/l) along the horizontal faces of steps in the nonaerated region (steps 3 to 21), the average mean pressure profile from numerical results with $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ and experimental data found in the literature.

In addition, pressure profiles were normalized by the minimum mean pressure along the vertical faces, as shown in Figure 3.12, where there are also experimental data presented in the literature (SANAGIOTTO, 2003; SÁNCHEZ-JUNY; BLADÉ; DOLZ,

2007). It was observed that the relative position of the minimum pressure occurs between $y/h = 94\%$ and $y/h = 98\%$. As indicated in Figure 3.12, the applied numerical model showed negative pressures in the vertical faces more extreme than those obtained experimentally in all the steps. Differences such as these, to a greater or lesser extent, have already been presented in other works, such as in Chen, Dai and Liu (2002) and Arantes (2007), where the authors validated numerical models and showed results with negative pressures from numerical results more extreme than those measured experimentally.

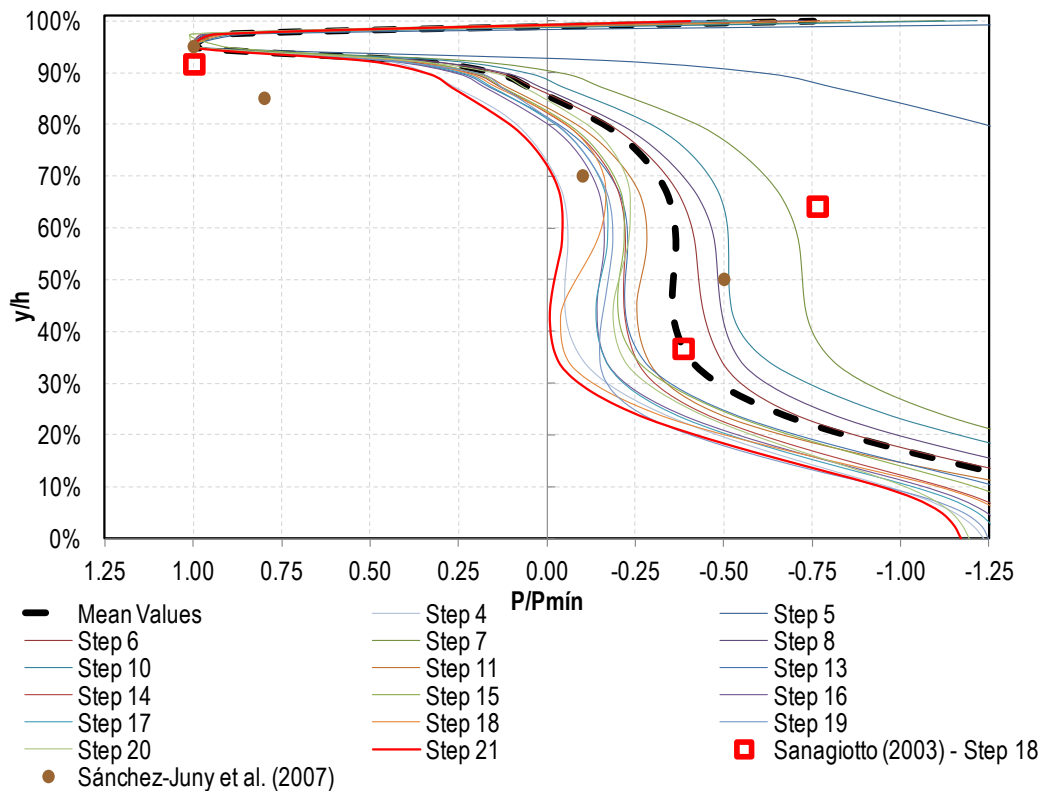


Figure 3.12. Nondimensional pressure profiles (P/P_{min}) for different relative position (y/h) along the vertical faces of steps in the nonaerated region (steps 4 to 21), the average mean pressure profile from numerical results with $q = 0.30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ and experimental data found in the literature.

Figure 3.12 shows that along most of the surface of the vertical faces there are no negative pressures and even positive pressures have small magnitude and are therefore subject to greater relative errors due to the accuracy of the measuring equipment.

Nonetheless, it is observed that the pressure gradients are bigger in the upper part of the vertical face, compared with that observed in the horizontal faces. For example, when the region of $0.85 < y/h < 0.95$ is analyzed, the pressure starts from a zero value

until it reaches its minimum value. This variation happens in 5 mm or 6 mm for a model with steps 5 cm height (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009) or 6 cm height (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; ZHANG; CHEN; WANG, 2012), respectively, which are small distances. As a result, it is difficult to state that the experimental records on the vertical faces of the steps represent the minimum pressures occurring at the top of the step because these recorded values are sensitive to the relative position of the transducers and piezometers.

3.4.2 Statistical parameters of pressures with different probabilities of being overcome on the surfaces of the steps

As a result of steady flow simulations, mean pressures were obtained. However, damage to hydraulic structures can occur due to pressures with greater magnitude and different probability of being exceeded, so that it becomes important to know the extreme pressures and not just the mean values. Pressures with a 0.1% probability of being exceeded by more negative values ($P_{0.1\%}$) (LOPARDO *et al.*, 2004) are important to evaluate possible cavitation damage in the vertical faces of the steps; and extreme positive pressures, for example, with a 99.9% probability of not being exceeded by more positive values ($P_{99.9\%}$) are used for analysis at the horizontal faces (GOMES, 2006).

Experimental data from Sanagiotto and Marques (2008) were used to estimate the statistical coefficients of probability distribution ($N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$) as described in Section 2.5 (equations 11 and 12). These statistical coefficients were used to predict extreme pressures ($P_{0.1\%}$ and $P_{99.9\%}$) through mean pressures (P) obtained in numerical simulations.

Figure 3.13 shows the statistical probability distribution coefficients for three positions in the vertical faces and three positions in the horizontal faces.

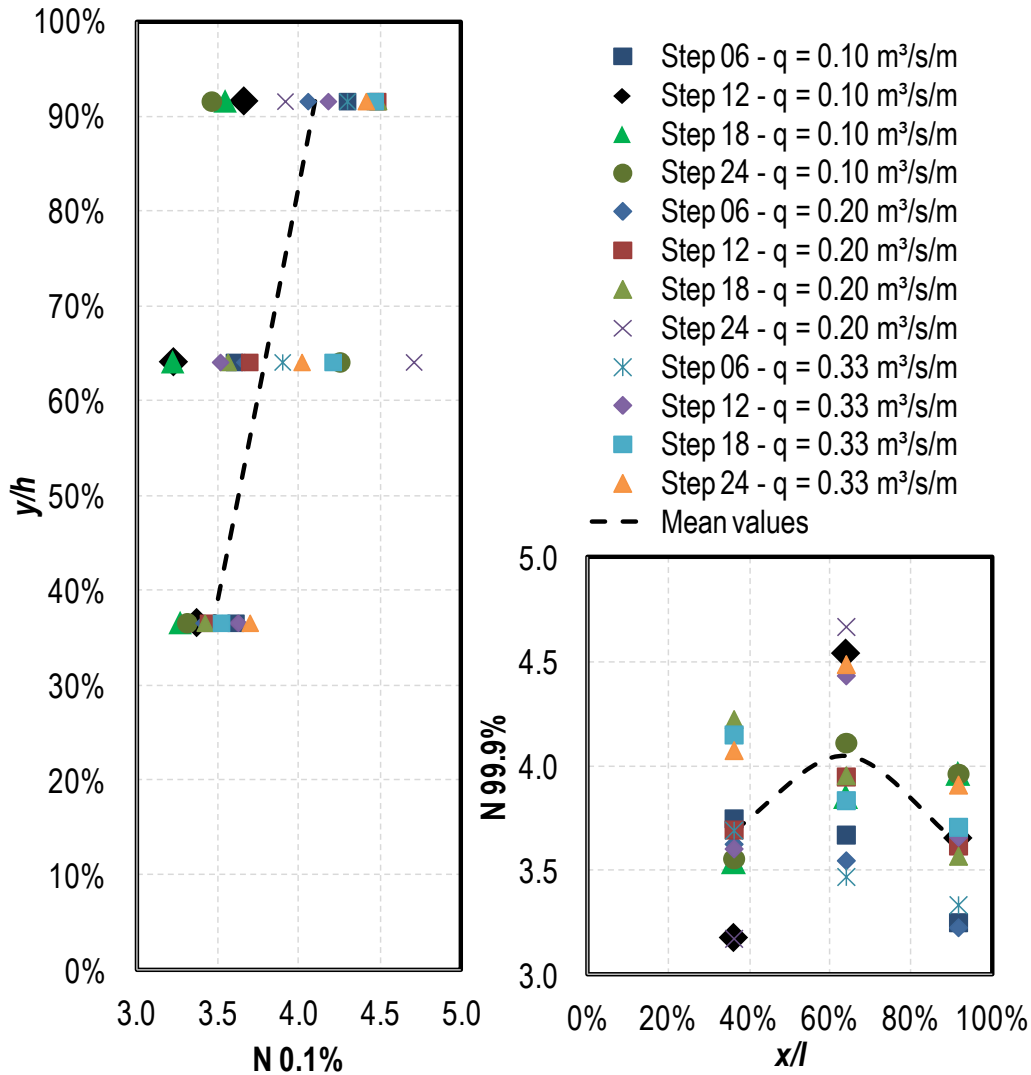


Figure 3.13. Probability distribution coefficients ($N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$) in steps 6, 12, 18 and 24 for different relative positions (a) in the vertical faces (y/h) and (b) in the horizontal faces (x/l), obtained from the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008).

In the vertical faces, at the pressure measured closest to the minimum pressure ($y/h = 92\%$), the values of $N_{0.1\%}$ ranged from 3.46 to 4.48, with an average value of 4.1. The variation of these values was higher in the intermediate position ($y/h = 64\%$) and smaller in the position closest to the internal edge of the step ($y/h = 37\%$).

On the horizontal faces of steps, the maximum values of $N_{99.9\%}$ were observed in the position closest to the center ($x/l = 64\%$), with a maximum value of 4.67. In the pressure measured nearest to the external edge of the step, where the most extreme medium pressures are expected, a maximum value of $N_{99.9\%}$ equal to 3.97 was obtained. From this, Table 3.1 presents suggested mean values, based on these results, for $N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$ for different relative positions of the vertical and horizontal faces, respectively.

Table 3.1. Mean values of probability distribution coefficients ($N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$) defined based on the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008).

Vertical face relative position (y/h)	$N_{0.1\%}$	Horizontal face relative position (x/l)	$N_{99.9\%}$
92%	4.1	92%	3.6
64%	3.8	64%	4.0
37%	3.5	36%	3.7

Analyzing the values of the standard deviation of the pressure data, it was decided to separate the results for the nonaerated and aerated regions searching for a smaller dispersion of these values.

Figure 3.14.a shows the values of standard deviation (σ_d) normalized by the critical depth (h_c) in the nonaerated region of the flow, whereas Figure 3.14.b presents these values for the aerated region, both along the vertical faces, for different relative positions (y/h).

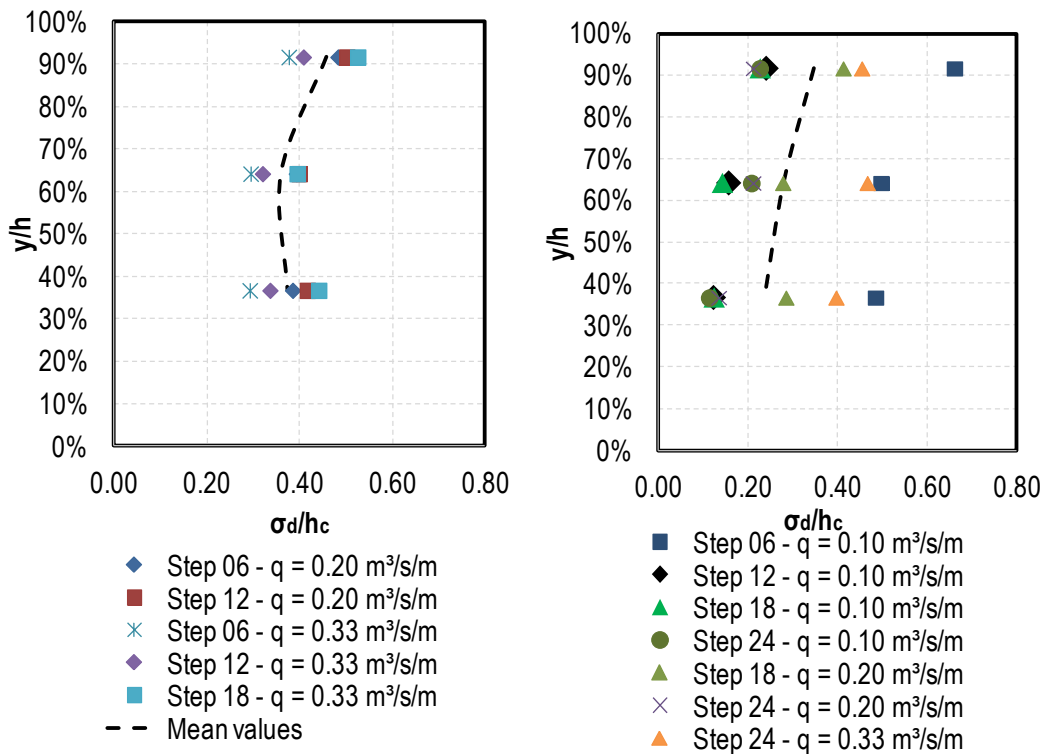


Figure 3.14. Standard deviation values for instantaneous pressures along the vertical faces obtained from the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008) in the (a) nonaerated region and (b) aerated region.

For the nonaerated region of the flow, where there is a special interest in the extreme pressures for the study of damage due to cavitation (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009), the results suggest the adoption of the value $\sigma_d/h_c = 0.50$ for the region near the outer corner on the step, where negative pressures occur. For the aerated region of the flow, the dispersion between the values of standard deviation is greater, preventing a unique value being used to obtain pressures with different probabilities from the mean pressures.

Similarly, Figure 3.15.a presents the normalized standard deviation values (σ_d/h_c) in the nonaerated region, while Figure 3.15.b presents these values in the aerated region, both along the horizontal faces for different relative positions (x/l).

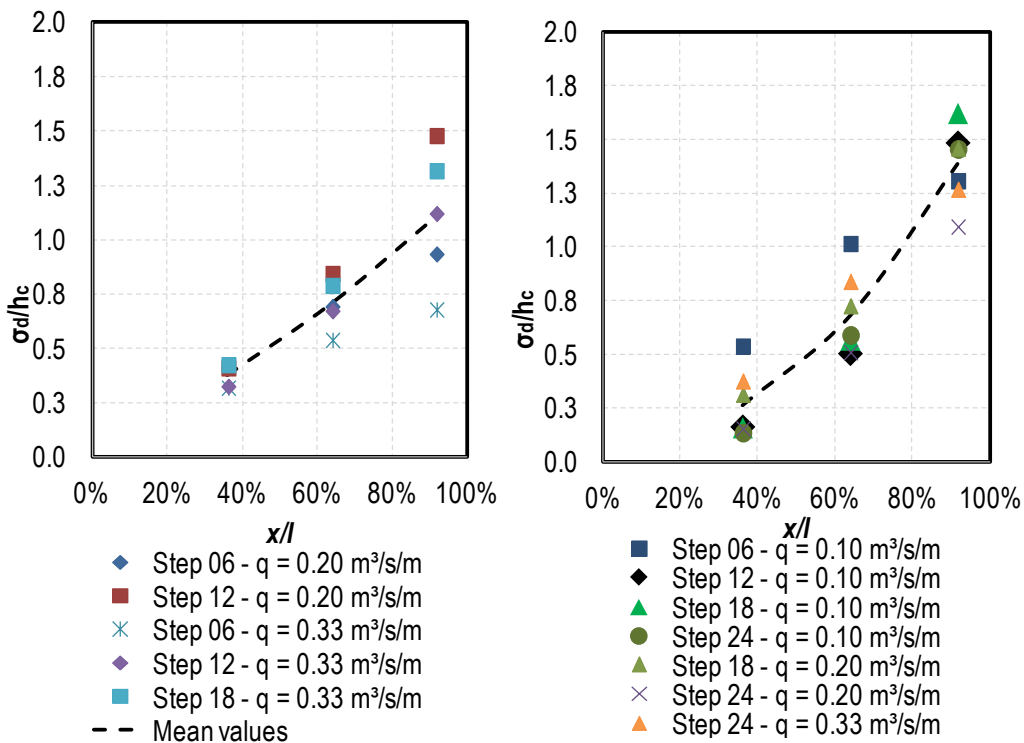


Figure 3.15. Standard deviation values for instantaneous pressures along the horizontal faces obtained from the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008) in the (a) nonaerated region and (b) aerated region.

In the pressure tap near the external edge of the step, where the most extreme pressures occur at the horizontal faces, the deviation value σ_d/h_c varies between 0.68 and 1.48, with an average of 1.1. In the aerated region, in the same region of the step, the value of the deviation σ_d/h_c varies between 1.09 and 1.62, with an average value equal to 1.4. Thus, similar to that observed for the standard deviation values in the vertical faces,

there is greater dispersion between the instantaneous pressures at the horizontal faces in the aerated region of the flow.

3.4.3 Analysis of uncertainties in pressure data and their implications

To analyze the uncertainties in the pressure data and their implications for the design of stepped spillways, the experimental pressure data of Sanagiotto and Marques (2008), Amador, Sánchez-Juny and Dolz (2009) and Sánchez-Juny, Bladé and Dolz (2007) were analyzed for $q = 0.33 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($h_c = 0.223 \text{ m}$).

Following hypotheses were considered:

- (i) The ratio of mean pressure and maximum mean pressure (P/P_{\max}) is distributed along the horizontal faces of the steps according to the profile shown in the dashed line in Figure 3.11 and the ratio of mean pressure and minimum mean pressure (P/P_{\min}) is distributed along the vertical faces according to the profile shown in the dashed line in Figure 3.12;
- (ii) The probability distribution coefficient $N_{0.1\%}$ for the region near the outer corner of the vertical faces is equal to 4.1, while the coefficient $N_{99.9\%}$ for the region close to the external corner of the horizontal faces is equal to 3.6;
- (iii) The normalized standard deviation values (σ_d/h_c) were considered differently for vertical and horizontal faces in the nonaerated region ($\sigma_d/h_c = 0.5$ and $\sigma_d/h_c = 1.1$, respectively) and aerated region ($\sigma_d/h_c = 0.4$ and $\sigma_d/h_c = 1.4$, respectively), for the pressure values close to the outer corner of the steps;
- (iv) The pressure data used in this uncertainty analysis were transposed to full-scale prototype conditions by considering the Froude law of similarity and a model scaled 1:10;
- (v) The values of extreme pressure were calculated according to Equations 3.11 and 3.12.

Table 3.2 and Table 3.3 present the calculated values of extreme and mean pressure for vertical and horizontal faces, respectively, for the region near the outer corner of the steps. The presented values are all on a full-scale prototype.

Table 3.2. Mean and extreme pressures in full-scale prototype conditions in the region near the external corner of vertical faces from data found in the literature.

Author*, analyzed region **	Mean pressure (mH ₂ O)	σ_d (mH ₂ O)	N _{0.1%}	P _{0.1%} (mH ₂ O)	Relative position (y/h)	Correction	Corrected	Corrected P _{0.1%} (mH ₂ O)	Ratio [9]/[5]
						at mean pressure (Figure 3.12)	mean pressure [2]/[7] (mH ₂ O)		
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
[a], VFAR	-0.07	0.893	4.1	-3.73	93.2%	0.59	-0.12	-3.78	1.01
[b], VFAR	-0.10	0.893	4.1	-3.76	95.0%	0.99	-0.10	-3.76	1.00
[c], VFAR	-0.23	2.455	4.1	-4.80	91.7%	0.22	-1.05	-5.62	1.17
[c], VFAR	-0.41	0.893	4.1	-4.07	91.7%	0.22	-1.86	-5.52	1.36

* [a] Amador, Sánchez-Juny, Dolz (2009); [b] Sánchez-Juny, Bladé e Dolz (2007); [c] Sanagiotta (2003).

** VFAR = vertical face in the aerated region; HFAR = horizontal face in the aerated region; VFNAR = vertical face in the nonaerated region; HFNAR = horizontal face in the nonaerated region.

Table 3.3. Mean and extreme pressures in full-scale prototype conditions in the region near the external corner of horizontal faces from data found in the literature.

Autor*, local analizado**	Mean pressure (mH ₂ O)	σ_d (mH ₂ O)	N _{99.9%}	P _{99.9%} (mH ₂ O)	Relative position (x/l)	Correction	Corrected	Corrected P _{99.9%} (mH ₂ O)	Ratio [9]/[5]
						at mean pressure (Figure 3.11)	mean pressure [2]/[7] (mH ₂ O)		
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]
[a], HFAR	2.49	3.124	3.6	13.73	86.3%	0.98	2.54	13.78	1.00
[b], HFAR	2.90	3.124	3.6	14.15	93.8%	0.93	3.12	14.37	1.02
[c], HFNAR	2.75	2.455	3.6	11.59	91.7%	0.98	2.81	11.64	1.00
[c], HFAR	2.59	3.124	3.6	13.84	91.7%	0.98	2.64	13.89	1.00

* [a] Amador, Sánchez-Juny, Dolz (2009); [b] Sánchez-Juny, Bladé e Dolz (2007); [c] Sanagiotta (2003).

** VFAR = vertical face in the aerated region; HFAR = horizontal face in the aerated region; VFNAR = vertical face in the nonaerated region; HFNAR = horizontal face in the nonaerated region.

In the first line of Table 3.2, analyzing the data of Amador, Sánchez-Juny and Dolz (2009) for a vertical face in the aerated region, where the minimum mean pressure experimentally obtained is $P = -0.07$ m.H₂O, an extreme pressure $P_{0.1\%} = -3.73$ mH₂O was calculated, from the assumptions considered and from Equation 11. Because the position of this pressure measurement is $y/h = 93.2\%$, the mean pressure can be corrected by the factor 0.59, from the dashed line of Figure 3.12, resulting in $P = -0.12$ mH₂O, which would result in a corrected extreme pressure $P_{0.1\%} = -3.78$ mH₂O. However, even though the mean experimental pressure obtained may be 59% of the maximum mean

pressure in the vertical face when estimating the extreme pressure $P_{0.1\%}$, no significant differences are observed due to the magnitude of the fluctuation pressure portion. So, the uncertainties in obtaining the mean pressures due to the position of the pressure measurement, in this case, would not result in important errors in the study of cavitation in the vertical faces of the steps in engineering projects.

The same analysis was performed for the vertical face of a step in the aerated region whose mean pressure data are presented in Sánchez-Juny, Bladé and Dolz (2007). Although the minimum mean pressure in the vertical faces could be corrected by the factor 0.93, due to its relative position and according to the normalized mean pressure profile (Figure 3.12), no significant differences were observed for the values of $P_{0.1\%}$ with and without the suggested correction. In relation to data presented in Sanagiotto (2003), differences found for the values of $P_{0.1\%}$ were more important. Because the relative position of the pressure measurement closest to the external edge of the step is $y/h = 91.7\%$, and therefore furthest from the region $0.94 < y/h < 0.98$, where the minimum mean pressures were numerically observed, the hypotheses considered suggest that the mean pressure should be corrected by the factor 0.22. This correction resulted in differences in values of $P_{0.1\%}$ equal to 17% and 36%, respectively, for step 18 in the nonaerated region and for step 24 in the aerated region. These differences are, on a full-scale prototype, equal to 0.82 mH₂O and 1.45 mH₂O, which may be important in a cavitation study.

This analysis suggests that when using minimum pressure data on vertical faces of stepped spillways with a slope of 1V:0.75H, attention should be paid to the relative position of the pressure measurement. It should be positioned in the region $0.93 < y/h < 0.98$, so that when using the value of $P_{0.1\%}$, uncertainties in the mean pressure values become less representative in this range.

As shown in Figure 3.11, the region at the horizontal face where $P/P_{\max} > 0.90$ is $0.81 < x/l < 0.98$, being usually the presence of piezometers and transducers in this region in experimental works on stepped chutes, as presented in Table 3.3. Thus, the uncertainties in the mean pressures due to the position of the pressure measurement are negligible when using values of $P_{99.9\%}$ for projects of stepped spillways.

3.5 Conclusions

In this work, CFD was used to model the air–water two-phase flow down a stepped spillway with a slope of 1.0V:0.75H. The choice of the mesh to be used in the simulations was made by calculating the GCI (CELIK et al., 2008) for mean pressures so that the uncertainties due to the grid convergence are lower than the accuracy of the measuring instruments.

It was considered that the computational model was able to adequately reproduce the mean pressures obtained experimentally (CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015) for the region near the outer corner of some steps so that some differences can possibly be explained due to the uncertainties about the relative positions of pressure gauges inside the steps. These uncertainties were the subject of a specific study, where mean profiles of pressures normalized by maximum pressure (P/P_{max}) for horizontal faces (Figure 3.11) and by minimum pressures (P/P_{min}) for vertical faces (Figure 3.12) were defined.

For the definition of the free surface of the flow, contrary to the criterion usually adopted in CFD studies (ALBADAWI et al., 2013; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ et al., 2016; TORO et al., 2016) where the free surface is defined as the depth where there is a balance between water and air ($\alpha = 0.5$), a study similar to Lopes, Leandro and Carvalho (2018) was made where it was sought to define different values of water fraction (α) for the nonaerated and the aerated regions of the skimming flow, based on the depths observed in Sanagiotto and Marques (2008). The values that better fit the observed depths were $\alpha = 0.30$ for the nonaerated region of the flow and $\alpha = 0.10$ for the aerated region for spillways with channels with slope 1V:0.75H. However, as there are reports in the literature that the homogeneous model cannot correctly represent the air entrainment into the skimming flow, in future research, the results related to the definition of the free surface should be reevaluated with different multiphase models and meshes.

The model validation was also performed from velocity profiles along the chute, normal to the pseudobottom and starting at the outer edge of the steps. Velocity profiles were adjusted to a power law, with different exponents N : one for the nonaerated region and the other for the aerated region, both in agreement with the literature.

Mean pressures resulting from computational simulations and extreme pressures with different probability of occurrence obtained through a numerical–experimental

approach were used to analyze uncertainties due to the relative position of the pressure gauges. To enable this analysis, the coefficients $N_{0.1\%}$ and $N_{99.9\%}$ and standard deviation values of the experimental data of Sanagiotto and Marques (2008) were calculated. With the use of these values, the mean pressures numerically obtained were used to estimate the extreme pressures ($P_{0.1\%}$ and $P_{99.9\%}$), which served as the criteria for the analysis of the effects in the experimental data of pressure due to the uncertainties in the position of piezometers and transducers.

From an analysis of the numerical results together with experimental data, it was determined that it is important that piezometers and transducers are located in the region of $0.81 < x/l < 0.98$ in horizontal faces and in the region of $0.93 < y/h < 0.98$ in vertical faces of steps. These results are initially valid for experimental studies in spillways with a slope of 1.0V:0.75H and a step height of 6 cm. If the criteria are respected, uncertainties due to the position of the instruments will not result in significant differences in the values of extreme pressures $P_{0.1\%}$ and $P_{99.9\%}$, even in full-scale prototype conditions.

Acknowledgments

This research was made possible through funding from R&D titled *Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Forçada (Pré-Aeração)* signed between DTEH.E/GST.E/FURNAS and FAURGS/IPH/UFRGS. This work has been partially supported by the Brazilian agency CAPES.

The authors would like to acknowledge the anonymous reviewers for the constructive comments that benefitted the manuscript.

References

ALBADAWI, A. et al. Influence of surface tension implementation in Volume of Fluid and coupled Volume of Fluid with Level Set methods for bubble growth and detachment. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 53, p. 11–28, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.01.005>>

ALWON, J. Van et al. Experimental and numerical modelling of aerated flows over stepped spillways. In: 37TH IAHR WORLD CONGRESS 2017, Kuala Lumpur, Malasya. **Anais...** Kuala Lumpur, Malasya: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2017.

ALWON, J. Van et al. Prediction of air entrainment in skimming flow over stepped spillways using numerical methods. In: 38TH IAHR WORLD CONGRESS 2019, Panama City, Panama. **Anais...** Panama City, Panama: IAHR, 2019.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 135, n. 12, p. 1092–1100, 2009. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000118>>

ANSYS INC. **Ansys CFX-Solver Theory Guide, Release 15.0**, Ansys, Inc., 2013.

ARANTES, E. J. **Caracterização do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus Via CFD**. 2007. PhD thesis, São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2007.

ARANTES, E. J. et al. Lower nappe aeration in smooth channels: Experimental data and numerical simulation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 82, n. 2, p. 521–537, 2010.

ARAÚJO FILHO, M. F.; OTA, J. F. Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, Brazil, v. 21, n. 2, p. 360–376, 2016.

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 826–836, 2009. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/L09-017>>

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Reply to Discussion by Chanson and Lubin on “Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators”. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 139–142, 2010. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/L09-168>>

BAI, Z. L.; PENG, Y.; ZHANG, J. M. Three-Dimensional Turbulence Simulation of Flow in a V-Shaped Stepped Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 9, p. 06017011, 2017. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001328>>

BAI, Z.; ZHANG, J. Comparison of Different Turbulence Models for Numerical Simulation of Pressure Distribution in V-Shaped Stepped Spillway. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], p. 9 p., 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/3537026>>

BAYON, A. et al. 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**, [s. l.], v. 19, p. 137–149, 2018. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570644316301952?via%3Dihub>>

BINDO, M.; GAUTIER, J.; LACROIX, F. The stepped spillway of M'Bali dam. **Water Power & Dam Construction**, [s. l.], p. 35–36, 1993.

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 129, n. 9, p. 661–670, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:9\(661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661))>

BOMBARDELLI, F. A.; MEIRELES, I.; MATOS, J. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 263–288, 2011.

BUNG, D. B. Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 639–648, 2011.

BUNG, D. B. Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 322–329, 2013.

CELIK, I. B. et al. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, [s. l.], v. 130, n. 7, p. 078001–078004, 2008. Disponível em: <<http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1434171>>

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications**. 1. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2006.

CHANSON, H. Stepped spillway flows and air entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 422–435, 1993. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/193-057>>

CHANSON, H. **Hydraulic Design of Stepped Cascade, Channels, Weirs and Spillways**. Oxford, England: Elsevier Science Ltd, 1994.

CHEN, Q.; DAI, G.; LIU, H. Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 128, n. 7, p. 683–688, 2002.

CONTERATO, E. **Escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Declividade 1V:0,75H: Caracterização das Pressões e Condições de Aeração**. 2011. Undergraduate thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2011.

CONTERATO, E. **Determinação de Critérios de Dimensionamento de Soleira Terminal em Bacia de Dissipação a Jusante de Vertedouro em Degraus**. 2014. Master thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2014.

CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; ALVES, A. A. M. Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, Brazil, v. 20, n. 1, p. 131–137, 2015.

DAI PRÁ, M. et al. Um Estudo sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. **Revista Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 17–28, 2012. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/rh/v33n1-2.html>>

DANESHFARAZ, R. et al. Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. **Advances and Applications in Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 805–822, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.17654/FM019040805>>

DETTMER, P. H. C. et al. Simulação Numérica da Capacidade de Descarga de um Vertedouro de Baixa Queda Afogado por Jusante. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves

FELDER, S.; CHANSON, H. Energy Dissipation down a Stepped Spillway with Nonuniform Step Heights. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 137, n. 11, p. 1543–1548, 2011.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3rd. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hing Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.

FRIZELL, K. W.; FRIZELL, K. H. **Guidelines for Hydraulic Design of Stepped Spillways**. **Hydraulic Laboratory Report HL-2015-06**, Bureau of Reclamation, 2015.

GABL, R.; RIGHETTI, M. Design criteria for a type of asymmetric orifice in a surge tank using CFD. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 397–410, 2018.

GOMES, J. F. **Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H**. 2006. PhD thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2006.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) methods for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, [s. l.], v. 39, p. 201–225, 1981.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 301–314, 1972.

KOSITGITTIWONG, D.; CHINNARASRI, C.; JULIEN, P. Y. Numerical simulation of flow velocity profiles along a stepped spillway. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 227, n. 4, p. 327–335, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0954408912472172>>

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 269–289, 1974.

LI, D. et al. Case Study on Application of the Step with Non-Uniform Heights at the Bottom Using a Numerical and Experimental Model. **Water**, Basel, Switzerland, v. 10, n. 1762, p. 19, 2018.

LI, S.; ZHANG, J.; XU, W. Numerical investigation of air–water flow properties over steep flat and pooled stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], p. 1–14, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2017.1286393>>

LOBOSCO, R. J.; SCHULZ, H. E. Análise Computacional do Escoamento em Estruturas de Vertedouros em Degraus. **Mecânica Computacional**, [s. l.], v. XXIX, p. 3593–3600, 2010.

LOPARDO, R. A. et al. Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basin. In: (Farhad Yazdandoost, & Jalal Attari, Eds.) PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRAULICS OF DAMS AND RIVER STRUCTURES 2004, Tehran, Iran. **Anais...** Tehran, Iran: A. A. Balkema Publishers, 2004.

LOPES, P.; LEANDRO, J.; CARVALHO, R. F. Numerical procedure for free-surface detection using a Volume-of-Fluid model. **Journal of Hydro-Environment Research**, [s. l.], v. 21, p. 43–51, 2018.

MA, L. et al. Computational fluid dynamics and the physical modelling of an upland urban river. **Geomorphology**, [s. l.], v. 44, n. 3–4, p. 375–391, 2002.

MEIRELES, I. et al. Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 138, n. 10, p. 870–877, 2012.

MEIRELES, I. C.; BOMBARDELLI, F. A.; MATOS, J. Air entrainment onset in skimming flows on steep stepped spillways: An analysis. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 375–385, 2014.

NOVAKOSKI, C. K. et al. Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, Brazil, v. 22, n. e22, p. 8, 2017. a. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716034>>

NOVAKOSKI, C. K. et al. Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, Brazil, v. 22, n. e42, p. 8, 2017. b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0117160035>>

OSMAR, F. M. et al. Analysis of the longitudinal distribution of pressures near the ends of the vertical and horizontal faces in stepped spillway of slope 1V:0.75H. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, Brazil, v. 23, n. e4, p. 11, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0318170057>>

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 6, p. 352–359, 2010. a.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. II: Hydraulic Design. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 6, p. 360–367, 2010. b.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. History and Significance of the Morton Number in Hydraulic Engineering. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 140, n. 5, p. 02514001, 2014. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000870>>

QIAN, Z. et al. Numerical simulation and analysis of water flow over stepped spillways. **Science in China, Series E: Technological Sciences**, [s. l.], v. 52, n. 7, p. 1958–1965, 2009.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. **Journal of Fluids Engineering**, [s. l.], v. 116, n. 3, p. 405, 1994. Disponível em: <<http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1427780>>

SANAGIOTTO, D. G. **Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. 2003. Master thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2003.

SANAGIOTTO, D. G. et al. Three-dimensional numerical simulation of flow in vertical slot fishways: validation of the model and characterization of the flow. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, Porto Alegre, Brazil, v. 24, n. 20, p. 14, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312019000100217&lng=en&tlng=en>

SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. Características do escoamento em vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, Brazil, v. 13, n. 4, p. 17–31, 2008.

SANAGIOTTO, D. G.; ROSSI, J. B.; BRAVO, J. M. Applications of computational fluid dynamics in the design and rehabilitation of nonstandard vertical slot fishways. **Water**, Basel, Switzerland, v. 11, n. 199, p. 22, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w11020199>>

SÁNCHEZ-JUNY, M.; BLADÉ, E.; DOLZ, J. Pressures on a stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 505–511, 2007.

SIMÕES, A. L. A. **Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas**. 2012. PhD thesis, São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2012.

SIMÕES, A. L. A. et al. Free-surface Profiles and Turbulence Characteristics in Skimming Flows along Stepped Chutes. **Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 1–12, 2013.

SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. de M. Stepped and smooth spillways: Resistance effects on stilling basin lengths. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 329–337, 2010.

STENMARK, E. **On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software**. 2013. Master thesis, Göteborg, Sweden, 2013.

TABARI, M. M. R.; TAVAKOLI, S. Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 1215–1224, 2016.

TABBARA, M.; CHATILA, J.; AWWAD, R. Computational simulation of flow over stepped spillways. **Computers and Structures**, [s. l.], v. 83, p. 2215–2224, 2005.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2008. PhD thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2008.

TENG, P.; YANG, J. CFD modeling of two-phase flow of a spillway chute aerator of large width. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 163–177, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/23249676.2015.1124030>>

TORO, J. P. et al. Characterization of turbulence statistics on the non-aerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 1195–1221, 2016.

TOZZI, M. J. **Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus**. 1992. PhD thesis, São Paulo, Brazil. (in Portuguese), 1992.

YANG, J.; TENG, P.; ZHANG, H. Experiments and CFD modeling of high-velocity two-phase flows in a large chute aerator facility. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 48–66, 2019.

ZHAN, J.; ZHANG, J.; GONG, Y. Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 139–142, 2016.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. II: Pressure and Velocity Fields. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 142, n. 7, p. 04016015, 2016. a. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001138>>

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. I: Physical Modeling and Boundary Layer Development. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 142, n. 7, p. 04016015, 2016. b. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001138>>

ZHANG, J.; CHEN, J.; WANG, Y. Experimental study on time-averaged pressures in stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 236–240, 2012.

**4 INVESTIGAÇÃO DE EFEITOS DE ESCALA NO ESCOAMENTO
DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS
UTILIZANDO-SE UMA ABORDAGEM COM SEMELHANÇA DINÂMICA
COM CFD**

Scale Effects Investigation of Skimming Flow Over Stepped Spillways Using
a Dynamic Similarity Approach with CFD

CAPÍTULO 4: INVESTIGAÇÃO DE EFEITOS DE ESCALA NO ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS UTILIZANDO-SE UMA ABORDAGEM COM SEMELHANÇA DINÂMICA COM CFD

Este artigo foi desenvolvido, de certa forma, paralelamente ao primeiro artigo. Durante a validação do modelo computacional, apresentado no primeiro artigo e utilizado neste, foram feitas investigações profundas na modelagem física que deu origem aos dados experimentais utilizados. Durante essa investigação, surgiu o seguinte questionamento: como seriam os resultados dos modelos físicos caso fosse possível utilizar outros fluidos que permitissem operar modelos com igualdade de outros adimensionais, simultaneamente?

Um dos principais artigos utilizados como referência para este trabalho foi Heller (2011). Ao final desse artigo, o autor apresenta algumas direções para pesquisas futuras. Dentre estas direções, o autor questiona qual seria o impacto nos resultados de modelo com gravidade alterada e comenta que simulações numéricas possuem a vantagem de que erros de medição não aumentam com a redução da escala, podendo, portanto, ser uma ferramenta útil para alterar a escala de parâmetros relevantes, permitindo-se analisar isoladamente fenômenos hidráulicos.

Nesse contexto, esse artigo foi desenvolvido com o objetivo de investigar os efeitos de escala, buscando-se isolar algumas simplificações necessárias à modelagem física, permitindo-se analisar individualmente as consequências de desconsiderar o efeito de um ou mais adimensionais. Não foi possível, neste artigo, discutir critérios de projetos de engenharia ou segurança nos dados experimentais obtidos. Esse artigo está apresentado com o intuito de sugerir uma metodologia para estudo de efeitos de escala e discutir resultados obtidos em termos de pressões médias.

Uma versão bastante preliminar deste artigo está apresentada em Tassinari et al. (2018).

Este capítulo se baseia no seguinte artigo, ainda não submetido:

TASSINARI, Lucas Camargo da Silva; SANAGIOTTO, Daniela Guzzon; LAUFFER, Luísa Lüdtke; MARQUES, Marcelo Giulian. Investigação de Efeitos de Escala no escoamento Deslizante sobre Turbilhões em Vertedouros em Degraus Utilizando-se uma Abordagem com Semelhança Dinâmica com CFD.

Resumo

Através de estudos em modelos hidráulicos físicos desenvolvidos ao longo dos anos, foi possível caracterizar o escoamento hidrodinâmico em vertedouros em degraus. Devido às suas características, é usual utilizar semelhança no número de Froude para operar os experimentos destas estruturas. No entanto, ao utilizar água no modelo reduzido e no protótipo, são criados erros denominados efeitos de escala. Utilizando-se técnicas de modelagem computacional, este artigo investiga os efeitos de escala no escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus utilizando-se uma única geometria com diferentes escalas. Inicialmente, foram feitas simulações em escala de protótipo (1:1) e em escalas reduzidas 1:10 e 1:100 com água, considerando-se semelhança de Froude. Após, foram desenvolvidas simulações com fluidos hipotéticos, que possibilitaram considerar simultaneamente semelhanças de Froude, Reynolds, Weber e Euler. Os resultados demonstraram que os efeitos de escala podem resultar diferenças significativas nas pressões médias. Ao comparar os resultados obtidos em escala de protótipo com os resultados obtidos com água na escala 1:10, foram observadas diferenças máximas nas pressões iguais a 72% nos patamares e 68% nos espelhos dos degraus. Ao considerar os fluidos hipotéticos, chegou-se a diferenças absolutas menores, mostrando que a alteração nas características dos fluidos para se ter semelhança em outras forças além da gravitacional possui grande potencial no estudo dos efeitos de escala com modelagem computacional, como auxílio à modelagem física. Esta técnica poderá auxiliar na compreensão da significância de simplificações necessárias à modelagem física e dos cuidados necessários à interpretação de dados experimentais.

Palavras-chave: modelos hidráulicos; escoamento bifásico; modelos RANS; efeitos de escala, vertedouro em degraus.

4.1 Introdução

As rugosidades nas superfícies dos vertedouros em degraus aceleram o desenvolvimento da camada limite em comparação com os vertedouros com calha lisa, antecipando o início da aeração do escoamento (FRIZELL; FRIZELL, 2015; GOMES, 2006; ZHANG; CHANSON, 2016a). Dessa forma, quando as calhas dos vertedouros são construídas em degraus, parte da energia do escoamento é dissipada ao longo da própria calha, permitindo reduzir as dimensões das estruturas de dissipação de energia a jusante do barramento e gerando significativa economia (CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002; CHEN; DAI; LIU, 2002; FRIZELL; FRIZELL, 2015; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010; TABARI; TAVAKOLI, 2016).

Tradicionalmente, a abordagem de caracterização hidrodinâmica costuma ser por modelagem física, pois usualmente a dúvida inicial sempre surge de uma observação física. Assim, a partir de estudos experimentais, desenvolvidos ao longo dos anos, foi possível caracterizar o escoamento sobre diferentes configurações de vertedouros em degraus a partir da análise de pressões (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; GOMES, 2006; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SÁNCHEZ-JUNY; BLADÉ; DOLZ, 2007; ZHANG; CHEN; WANG, 2012), velocidades (BOES; HAGER, 2003; MEIRELES et al., 2012; TOZZI, 1992; ZHANG; CHANSON, 2016), lâminas d'água (BUNG, 2011, 2013; CHANSON, 1993, 1994b), concentrações de ar (BOES; HAGER, 2003; BUNG, 2011; CHAMANI; RAJARATNAM, 1999; CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002; MATOS, 1990; MEIRELES et al., 2012), estatísticas de turbulência (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2006; CHANSON; TOOMBES, 2002; SIMÕES et al., 2013) e dissipação de energia (BOES; HAGER, 2003b; CHAMANI; RAJARATNAM, 1999; CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002; STEPHENSON, 1991).

De forma geral, identificou-se que a região não aerada do escoamento na calha escalonada apresenta as máximas pressões extremas, sendo a aeração do escoamento benéfica no sentido de redução desses valores (GOMES, 2006). Estudos experimentais abordaram o problema da cavitação na calha em degraus a partir da análise de velocidades e pressões instantâneas, sendo propostas velocidades médias máximas iguais a 15 m/s (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009), 17 m/s (GOMES, 2006) e 20 m/s (BOES; HAGER, 2003b) e vazões específicas máximas entre 11,5 m³/s/m (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009) e 25 m³/s/m (BOES; HAGER, 2003b) como critérios para evitar a ocorrência de cavitação na zona não aerada no escoamento.

Para estes estudos experimentais, devido à característica turbulenta do escoamento e à importância das forças gravitacionais e de inércia, utiliza-se a lei de semelhança de Froude, a qual exige igualdade no número de Froude. Contudo, ao utilizar o fluido água para os modelos físicos reduzidos, não são transpostos os efeitos de viscosidade, de tensão superficial, de concentração de ar e de turbulência observados no protótipo (MATOS, 1990), acarretando números de Reynolds (CHANSON, 2009) e de Weber (PFISTER; CHANSON, 2014) nos modelos reduzidos muito inferiores àqueles do protótipo e, portanto, erros na modelagem (PFISTER; HAGER, 2010a; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008), conhecidos como efeitos de escala (FELDER; CHANSON, 2017; PFISTER; CHANSON, 2014).

Heller (2011) apresenta uma revisão bibliográfica sobre critérios de escala e abordagens para minimizar diferenças entre protótipo e modelos reduzidos, devido aos efeitos do modelo, efeitos de escala e efeitos de medição. Os efeitos do modelo estão relacionados à incapacidade de o modelo representar os processos que ocorrem no protótipo devido a imprecisões geométricas dos modelos e às propriedades dos fluidos utilizados nos experimentos, enquanto os efeitos de medição estão relacionados ao fato de não serem utilizadas as mesmas técnicas de medição das variáveis físicas no protótipo e no modelo.

Um modelo reduzido será considerado igual ao seu protótipo se for garantida a semelhança total entre ambos (HELLER, 2011), a qual é possibilitada apenas se ocorrer simultaneamente (HELLER, 2011; KOBUS, 1980; NOVAK *et al.*, 2010): semelhança geométrica, a qual requer razão constante entre as dimensões de protótipo e modelo; semelhança cinemática, a qual requer semelhança geométrica e cinemática, com razões constantes entre modelo e protótipo para velocidade, tempo, aceleração e vazão para qualquer instante de tempo para pontos homólogos, e; semelhança dinâmica, a qual requer, além de semelhança geométrica e cinemática, que todas as relações entre forças para os dois sistemas sejam idênticas.

Assim, os efeitos de escala ocorrem devido à impossibilidade de que as relações de força sejam idênticas entre modelo e protótipo, onde todos os parâmetros estão em escala, quando há semelhança total. Isso obriga a que se tenha igualdade em todos os adimensionais, como os números de Froude, Reynolds, Weber, Euler, Mach, Strouhal, entre outros.

Para minimizar os efeitos de escala em modelos que adotem a semelhança de Froude, deve-se escolher uma escala geométrica mínima que garanta escoamento no

modelo dentro do regime turbulento rugoso, tal como se observa em protótipos da maioria das estruturas hidráulicas. Para escoamentos aerados, como é o caso de vertedouros em degraus, é usual em estudos em modelos reduzidos que se adotem escalas maiores que 1:15, sendo frequente a escala geométrica 1:10 (HELLER, 2011; TERRIER, 2016; ZINDOVIC *et al.*, 2014), respeitando-se o limite inferior recomendado de 0,02 m para a altura dos degraus (CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002).

Boes e Hager (2003) definiram uma escala geométrica mínima de 1:15, considerando-se degraus em escala de protótipo com altura igual a 0,60 m. Assim, em modelos operados com a lei de semelhança de Froude, devem ser garantidos valores mínimos para os números de Reynolds $R = 10^5$ e de Weber $W^{0,5} = 100$ ^[3], de forma que a viscosidade e a tensão superficial se tornam negligenciáveis em comparação às forças gravitacionais e de inércia. O limite para o número de Reynolds $R = 10^5$ é o mesmo sugerido por Amador (2005).

Pfister e Chanson (2014) abordam os efeitos de escala em modelos físicos bifásicos ar-água, definindo valores mínimos de números de Weber e Reynolds, relacionados aos números de Froude e de Morton, de forma que os efeitos da tensão superficial e das forças viscosas não são totalmente desprezados. Aplicando-se um limite inferior para o número de Weber com $W^{0,5} = 140$, e com base no número de Morton, que é um adimensional que depende apenas das características do sistema (aceleração da gravidade, viscosidades absoluta e cinemática e tensão superficial), Pfister e Chanson (2014) apresentam uma relação entre os números de Reynolds e de Froude. A partir desta relação, sendo usuais números de Froude entre 5 e 15 para escoamentos aerados sobre vertedouros, e para garantir uma correta reprodução das concentrações de ar no modelo reduzido, é necessário ter números mínimos de Reynolds nos modelos variando entre $1,5 \times 10^5$ e $3,0 \times 10^5$ para $W^{0,5} > 140$ (PFISTER; CHANSON, 2014). Estes valores de número de Reynolds possuem a mesma ordem de grandeza que o valor mínimo $R = 10^5$ recomendado por Kells e Smith (1991) para que a entrada de ar não seja afetada pelos efeitos de escala em modelos físicos conduzido pela lei de semelhança de Froude. Ao utilizar modelos físicos pequenos, com escalas inferiores a 1:30, a entrada e o transporte de ar no fluido serão subestimados, pois, os efeitos da tensão superficial e das forças

³ O trabalho de Boes e Hager (2003) indica a necessidade de que $We = 100$. No entanto, os autores consideraram que $W = V/(\sigma/(\rho \cdot L))^{0,5}$, que é um formato do número de Weber diferente daquele utilizado no presente trabalho, indicado na Equação 4.7.

viscosas passam a ser super-representados no modelo, dado que o fluido utilizado é água, tanto no protótipo quanto no modelo (PFISTER; CHANSON, 2014).

Contudo, mesmo em modelos grandes, com escalas iguais a 1:2 ou 1:3, parâmetros como o tamanho das bolhas ou as escalas de turbulência podem ser afetados por efeitos de escala (FELDER; CHANSON, 2017; PFISTER; CHANSON, 2014). Experimentos baseados na semelhança do número de Weber poderiam proporcionar melhores relações de escalas quanto ao tamanho das bolhas, mas como a força da gravidade e as forças viscosas são mais importantes nos processos físicos relacionados ao escoamento sobre vertedouros em degraus, esse critério não é aplicável (FELDER; CHANSON, 2017).

Teixeira et al. (2012) estudaram os possíveis efeitos de escala na previsão de pressões médias junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico a partir de dados experimentais com modelos em escala 1:100; 1:50 e 1:32 e dados de protótipo. Com isso, constataram que os valores de pressão média medidos nos modelos tendem a resultar maiores que os dados do protótipo, provavelmente devido à aeração ser menor nos modelos do que no protótipo, permitindo supor que quanto menor for a escala, menor será a aeração do escoamento.

Müller (2019) analisou a dissipação de energia em fossas de erosão com uma abordagem teórica, introduzindo um mecanismo de dissipação de energia termodinâmica devido à contração e expansão de bolhas de ar no jato. Conforme o autor, a taxa de aeração aumenta quase linearmente com a velocidade do jato e a compressibilidade do ar possui um comportamento não linear. Dessa forma, a dissipação de energia aumenta exponencialmente com a pressão e a velocidade do jato, o que deve ter consequências significativas na interpretação de dados de modelos.

Ao longo dos anos, modelos matemáticos têm sido propostos e aperfeiçoados para escoamentos turbulentos. A partir da pesquisa realizada, considerou-se que Chen, Dai e Liu (2002) foram os primeiros pesquisadores a simular o escoamento sobre um vertedouro com calha em degraus com um modelo de turbulência. Neste trabalho, os autores utilizaram um modelo computacional com uma malha não estruturada, o método VOF – *Volume of Fluid* (HIRT; NICHOLS, 1981) para tratar a superfície livre do escoamento bifásico ar-água e o modelo de turbulência k- ϵ (LAUNDER; SPALDING, 1974) para fechamento do sistema de equações.

Bombardelli, Meireles e Matos (2011) compararam resultados experimentais e numéricos de vazão, profundidades e velocidades em um vertedouro em degraus com foco na região não aerada, com os modelos de turbulência k- ϵ e RNG k- ϵ . Por fim, os

autores verificaram que o modelo k- ϵ oferece bons resultados em termos de profundidades e velocidades.

Lopes, Leandro e Carvalho (2018) buscaram estabelecer um procedimento para a definição da superfície livre ao longo de uma calha em degraus a partir do uso de CFD (Computational Fluid Dynamic) e o método VOF e concluíram que não há uma isolinha global de fração de água (α) que prediga a superfície do escoamento. Assim, esses autores estabeleceram um valor de α para a região não aerada e outro para a região aerada do escoamento para um vertedouro.

Torres et al. (2018) analisaram os efeitos de escala em um vertedouro tipo labirinto, aplicando-se CFD ao protótipo e a um modelo com escala 1:25. Em ambos os casos, conforme os objetivos do trabalho, considerou-se o escoamento de água sobre a estrutura hidráulica. No estudo de malha, foi aplicado o GCI (CELIK *et al.*, 2008) para definir a malha a ser considerada na escala de protótipo e, após, aplicou-se uma escala adequada ao tamanho das células para o modelo em escala 1:25, mantendo-se número de elementos semelhante. As simulações desenvolvidas demonstraram que as maiores diferenças entre os valores de profundidades e velocidades para os modelos ocorrem para as menores vazões, devido à superestimativa dos efeitos viscosos e de tensão superficial em modelos interpretados com semelhança de Froude (CHANSON, 2009; HELLER, 2011; NOVAK *et al.*, 2010).

Conforme comentado anteriormente, em hidráulica experimental, devido à impossibilidade de se promover semelhança total entre protótipo e modelo, em função de os fluidos água e ar estarem presentes em ambos os casos, incidem os efeitos de escala. Contudo, em modelagem computacional, é possível alterar as características dos fluidos, de forma a se ter semelhança em outros adimensionais. Este trabalho busca, portanto, responder à seguinte questão científica: a modelagem computacional pode ser utilizada no estudo dos efeitos de escala permitindo medir as consequências de falta de semelhança de alguns adimensionais, em termos de valores médios de pressão, em escoamentos sobre vertedouros em degraus?

Dessa forma, a partir de técnicas de modelagem computacional, este trabalho investiga os efeitos de escala e de modelo no escoamento turbulento sobre vertedouros em degraus a partir da análise computacional de pressões médias considerando-se fluidos hipotéticos, garantindo semelhança total à modelagem. A ideia central deste artigo não é estimar os efeitos de escala, ou estabelecer critérios para utilização de modelos experimentais ou numéricos.

Neste artigo, objetiva-se apresentar uma abordagem computacional que pode ser aplicada ao estudo dos efeitos de escala, aplicando-se semelhança total às análises, permitindo-se verificar possíveis efeitos de diferentes descon siderações de semelhança de alguns adimensionais na operação de modelos hidráulicos. Resultados ainda preliminares deste estudo foram apresentados em Tassinari et al. (2018).

4.2 Metodologia

Neste item de metodologia do trabalho, estão apresentados o escopo da pesquisa e descrições do modelo computacional utilizado, das simulações efetuadas, das condições de contorno e da discretização da malha. Ao final, apresenta-se um item onde está descrita e justificada a metodologia de análise dos resultados.

4.2.1 Escopo da Pesquisa

Para este trabalho, considerou-se como referência um vertedouro em degraus com as seguintes características: calha com declividade 1V:0,75H e degraus com altura (h) igual a 60 cm e comprimento (l) igual a 45 cm. O perfil Creager utilizado no protótipo é apresentado em Sanagiotto e Marques (2008), Conterato, Marques e Alves (2015) e Tassinari et al. (2020) e é descrito pela relação $Y = 0,15389 \times X^{1,85}$, definida com carga de projeto em escala de protótipo igual a 4,00 m. Esta estrutura de referência apresenta dimensões correspondentes a uma estrutura em escala real, hipotética, que foi considerada como protótipo nesse estudo.

Os resultados de todas as simulações (em escala de protótipo e em escalas reduzidas) foram transpostos para a escala de protótipo, sendo esta a referência para análise dos efeitos de modelo e de escala. Todos os resultados apresentados foram obtidos através de simulações numéricas, com o objetivo de avaliar os efeitos de escala sem considerar os efeitos de medição mencionados por Heller (2011), entendendo-se que caso fossem feitas comparações entre resultados experimentais e resultados do modelo computacional, as diferenças encontradas poderiam ser decorrentes de efeitos de escala, de medição ou de modelo.

Além da escala de protótipo, outras duas escalas foram escolhidas por diferentes motivos: a escala 1:10 é recomendada em modelos que envolvem fenômenos de entrada de ar (CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002; HELLER, 2011; TERRIER, 2016) e a

escala 1:100 é a escala limite adotada, considerando-se que para as características de protótipo do presente estudo, esta escala resulta em uma estrutura com dimensões tão pequenas que dificilmente se poderia utilizar para um estudo experimental, resultando degraus com altura igual a 0,006 m, inferior ao limite recomendado de 0,02 m (CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002).

4.2.2 Modelo numérico

Foram realizadas simulações de escoamentos tridimensionais utilizando o software Ansys CFX, o qual utiliza o método dos volumes finitos (Ansys Inc. 2013) e tem um histórico de uso com êxito em diversas estruturas hidráulicas (ARANTES, 2007; ARANTES *et al.*, 2010; CARRILLO *et al.*, 2020; GABL; RIGHETTI, 2018; PEREIRA *et al.*, 2021; QIAN *et al.*, 2017, 2020; SALEH; HUSAIN, 2019; SANAGIOTTO *et al.*, 2019; SANAGIOTTO; ROSSI; BRAVO, 2019; SIMÕES, 2012). A turbulência foi modelada a partir das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS), com o modelo de turbulência k- ϵ (JONES; LAUNDER, 1972; LAUNDER; SPALDING, 1974), que possui histórico de aplicações em trabalhos de simulação numérica de escoamentos sobre vertedouros em degraus (ARANTES, 2007; BAYON *et al.*, 2018; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; CHEN; DAI; LIU, 2002; LI *et al.*, 2018; LOBOSCO; SCHULZ, 2010; PEREIRA *et al.*, 2021; TABARI; TAVAKOLI, 2016; TORO *et al.*, 2016) e outras estruturas hidráulicas com características semelhantes (AYDIN; ISIK; ULU, 2020; AYDIN; OZTURK, 2009; CARRILLO *et al.*, 2020; QIAN *et al.*, 2020; SANAGIOTTO *et al.*, 2019; SANAGIOTTO; ROSSI; BRAVO, 2019; TORRES *et al.*, 2021).

O modelo multifásico adotado foi o homogêneo, que equivale ao VOF (STENMARK, 2013). Este modelo resolve um conjunto de equações de quantidade de movimento no domínio, armazenando o volume das duas fases em cada célula na forma de uma fração (HIRT; NICHOLS, 1981). Foi utilizado um modelo de superfície livre na interface e coeficiente de tensão superficial variável em função do fluido considerado em cada simulação, conforme justificado a seguir.

Embora muitos trabalhos tenham utilizado o modelo VOF, ou equivalente, para analisar o escoamento sobre turbilhões em vertedouros em degraus (BAI; PENG; ZHANG, 2017; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; KOSITGITTIWONG; CHINNARASRI; JULIEN, 2013; LOPES; LEANDRO;

CARVALHO, 2018), quando a análise está associada à incorporação de ar ao escoamento, alguns trabalhos mais recentes têm demonstrado que este modelo não é adequado (ALWON *et al.*, 2017, 2019; ALWON, 2019). Dessa forma, ao se utilizar esta abordagem, deve-se ter maior parcimônia ao analisar os resultados na região aerada do escoamento.

4.2.3 Condições simuladas

Em modelos experimentais em escala reduzida não é possível obter semelhança total para o escoamento sobre um vertedouro, pois os fluidos água e ar são os mesmos no modelo e no protótipo (CHANSON, 2009; FELDER; CHANSON, 2017; HELLER, 2011; KOBUS, 1980; NOVAK *et al.*, 2010; PFISTER; CHANSON, 2014). Entretanto, computacionalmente, é possível alterar as características do fluido de forma a se ter semelhança em outros adimensionais a partir da consideração de um fluido hipotético, levando em conta, além dos efeitos gravitacionais, os efeitos de viscosidade e da tensão superficial.

Os fluidos considerados nesse trabalho são chamados hipotéticos por apresentarem valores de viscosidade absoluta, massa específica e tensão superficial ar-fluido que simultaneamente não são encontrados em fluidos na natureza.

A partir do número de Froude (F), apresentado na Eq. 4.1, considerando-se uma escala geométrica (λ) e que a aceleração da gravidade (g) é a mesma tanto para o modelo quanto para o protótipo, temos que a escala de velocidades (λ_V) é aquela apresentada na Eq. 4.2, sendo L a variável de comprimento.

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad 4.1$$

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda} \quad 4.2$$

De forma a proporcionar semelhança nos efeitos das forças viscosas, definiu-se a escala de viscosidade cinemática (λ_ν) a partir da igualdade do número de Reynolds (R) do protótipo com aquele do modelo. A Eq. 4.3 apresenta o número de Reynolds e a Eq. 4.4 a escala de viscosidade cinemática, sendo ν a viscosidade cinemática.

$$R = \frac{V \cdot L}{v} \quad 4.3$$

$$\lambda_v = \lambda^{3/2} \quad 4.4$$

Utilizando-se o número de Euler (**E**), definido na Eq. 4.5, chegou-se a uma escala de variação de pressão ($\lambda_{\Delta P}$) em função da escala geométrica e da escala de massa específica (λ_ρ), conforme apresentado na Eq. 4.6, sendo ΔP a pressão e ρ a massa específica.

$$E = \frac{\Delta P}{\rho V^2} \quad 4.5$$

$$\lambda_{\Delta P} = \lambda_\rho \cdot \lambda \quad 4.6$$

A partir do número de Weber (**W**), definido na Eq. 4.7, chegou-se a uma escala de tensão superficial (λ_σ) em função da escala geométrica e da escala de massa específica, apresentada na Eq. 4.8, sendo σ a tensão superficial.

$$W = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot L}{\sigma} \quad 4.7$$

$$\lambda_\sigma = \lambda_\rho \cdot \lambda^2 \quad 4.8$$

Portanto, nesta análise, sem que fosse especificada uma escala de massa específica, não seria possível definir as escalas de pressão e tensão superficial. Assim, considerou-se que a massa específica dos fluidos hipotéticos é igual à da água a 25°C ($\rho = 997 \text{ kg/m}^3$), sendo esta a temperatura padrão do software utilizado neste trabalho. Dessa forma, têm-se as escalas de pressão e de tensão superficial conforme apresentado nas Eqs. 4.9 e 4.10.

$$\lambda_{\Delta P} = \lambda \quad 4.9$$

$$\lambda_\sigma = \lambda^2 \quad 4.10$$

Optou-se por manter a massa específica fixa para todas as simulações buscando-se avaliar os resultados de pressão na forma de carga de pressão (P/γ), com unidade em m.c.a. No entanto, como reflexo dessa escolha, os números de Froude e de Euler passaram a depender, ambos, de velocidade e profundidade do escoamento. Assim, em todas as simulações foram garantidas as semelhanças de Froude e de Euler.

Neste contexto, foram realizadas simulações com CFD utilizando-se água escoando sobre uma geometria de vertedouro nas diferentes escalas, respeitando a lei de semelhança de Froude, e fluidos hipotéticos para as escalas reduzidas (1:10 e 1:100), com semelhança total nos adimensionais Froude, Reynolds, Euler e Weber. Em todas as simulações, foram consideradas vazões equivalentes à vazão de 10,0 m³/s/m em escala de protótipo.

Isso resultou em cinco condições iniciais simuladas, sendo 3 condições com água para cada uma das escalas e 2 condições com fluidos hipotéticos, com características definidas em função da escala geométrica.

Adicionalmente, foram feitas outras duas simulações para a escala 1:100 considerando-se simultaneamente a igualdade dos números de Froude, Euler e de Reynolds, apenas, e, após, a igualdade dos números de Froude, Euler e de Weber. A partir disso, buscou-se explicar quais são as semelhanças entre adimensionais mais importantes aos efeitos de escala para pressões médias, em um escoamento aerado turbulento.

A Tabela 4.1 apresenta as condições simuladas, assim como as características da água e dos fluidos hipotéticos utilizados em cada simulação. Os valores apresentados para os números de Reynolds e Weber se referem às características do escoamento sobre a crista do vertedouro.

Tabela 4.1. Características dos fluidos e adimensionais considerados nas simulações.

Código da condição testada: Escala+ semelhança	Escala	Fluido	Critério de semelhança*	Viscosidade cinemática (ν) [m ² /s]	Viscosidade absoluta (μ) [kg/(m.s)]	Tensão superficial ar-fluido (σ) [N/m]	Número de Reynolds	Número de Weber
$\lambda 1$ F	1:1	Água	-	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	0,07230	$1,1 \times 10^7$	635943
$\lambda 10$ F	1:10	Água	F, E	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	0,07230	$3,6 \times 10^5$	6359
$\lambda 100$ F	1:100	Água	F, E	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	0,07230	$1,1 \times 10^4$	64
$\lambda 10$ FERW	1:10	hipotético	F, E, R, W	$2,8 \times 10^{-8}$	$2,8 \times 10^{-5}$	0,00072	$1,1 \times 10^7$	635943
$\lambda 100$ FERW	1:100	hipotético	F, E, R, W	$8,9 \times 10^{-10}$	$8,9 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^7$	635943
$\lambda 100$ FEW	1:100	hipotético	F, E, W	$8,9 \times 10^{-7}$	$8,9 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^4$	635943
$\lambda 100$ FER	1:100	hipotético	F, E, R	$8,9 \times 10^{-10}$	$8,9 \times 10^{-7}$	0,07230	$1,1 \times 10^7$	64

*F = número de Froude, E = número de Euler, R = número de Reynolds, W = número de Weber

Considerou-se que como não há diferenças entre as geometrias das diferentes escalas e imprecisões nas medições de pressão, as diferenças encontradas nas simulações ocorrem devido aos efeitos de escala e aos efeitos de modelo relacionados às propriedades dos fluidos, conforme classificação apresentada por Heller (2011).

4.2.4 Condições de Contorno e Discretização

As condições de contorno utilizadas foram:

- Entrada: foi utilizada uma vazão específica como condição de contorno de entrada igual a $10,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, em escala de protótipo, o que equivale a uma lâmina crítica $h_c = 2,17 \text{ m}$ e a uma velocidade crítica $V_c = 4,61 \text{ m/s}$;
- Saída: na abertura de saída foi considerada pressão atmosférica;
- Calha e degraus: foram considerados sólidos lisos com condição de não deslizamento;
- Topo: considerou-se abertura com pressão atmosférica e fluxo apenas de ar;
- Paredes: foi considerada a condição de simetria, eliminando os efeitos de parede que poderiam ocorrer.

Comenta-se que nas simulações apenas os fluidos foram alterados para garantir a semelhança dinâmica, não tendo sido desenvolvidas investigações de efeitos de escala devido a parâmetros do modelo de turbulência e rugosidade dos sólidos. A temperatura dos fluidos foi considerada constante e igual em todas as simulações, uma vez que esta

variável pode afetar significativamente a incorporação de ar (MORTENSEN; BARFUSS; JOHNSON, 2011).

A geometria utilizada neste estudo, em escala 1:10, é a mesma utilizada anteriormente, em Tassinari et al. (2020), que validaram o modelo computacional utilizado com dados experimentais e parâmetros obtidos na literatura. Tassinari et al. (2020) analisaram as incertezas decorrentes do detalhamento das malhas com base no Índice de Convergência de Malha (GCI), apresentado por Celik et al., (2008) e proposto inicialmente por Roache (1994), e verificaram que a incerteza média para as pressões médias ao longo da calha do vertedouro, nos patamares, na região próxima à borda externa, é igual a 3,8%, enquanto para os espelhos, também na região próxima à borda externa, é a igual a 1,9%. A partir dessa análise, optou-se por utilizar os resultados da malha intermediária, com $1,1 \times 10^6$ elementos.

Como foram utilizadas escalas geométricas diferentes, buscando-se reduzir possíveis diferenças nos resultados devido às malhas, aplicou-se um fator de escala às malhas de forma a se manter um número de elementos semelhante para as três escalas (TORRES, 2018; TORRES *et al.*, 2018), com $1,4 \times 10^6$ elementos, semelhante ao que foi utilizado em Tassinari et al. (2020) para uma estrutura semelhante àquela utilizada nesse artigo para uma escala 1:10.

4.2.5 Análise dos resultados

A comparação entre os resultados foi feita analisando-se as cargas de pressões nos patamares e espelhos de alguns degraus, já transpostos para a escala do protótipo. Todas as simulações foram feitas para a vazão específica de $10 \text{ m}^3/(\text{s.m})$, que corresponde ao regime *skimming flow* (CHAMANI; RAJARATNAM, 1999; CHANSON, 1994b; PEGRAM; OFFICER; MOTTRAM, 1999).

Com o objetivo de eliminar possíveis diferenças decorrentes de processos de medição e, dessa forma, intrínsecos ao processo de modelagem física, não foram apresentados resultados experimentais junto aos resultados da modelagem computacional. Contudo, com base nos resultados apresentados em trabalho anterior (TASSINARI *et al.*, 2020), considerou-se que o modelo computacional está adequado ao estudo. Assim, tomou-se como referência para as análises apresentadas os resultados da simulação numérica obtidos para a escala de protótipo, definidos como os mais adequados.

4.3 Resultados e Discussão

Os resultados obtidos nesse trabalho, independente das condições analisadas, apresentam um comportamento de distribuições de carga de pressão nos degraus de acordo com o esperado, com base em outros trabalhos (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; CHEN; DAI; LIU, 2002; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SÁNCHEZ-JUNY; BLADÉ; DOLZ, 2007; TASSINARI *et al.*, 2020; ZHANG; CHEN; WANG, 2012). Ou seja, nos espelhos dos degraus há um extremo de pressão negativa próximo à quina do degrau, enquanto nos patamares há um extremo de pressão positiva também próximo à quina.

As figuras a seguir apresentam o desenvolvimento das cargas de pressão nos espelhos dos degraus 6 (Figura 4.1), 12 (Figura 4.2), 18 (Figura 4.3) e 24 (Figura 4.4), considerando-se que os degraus estão numerados de cima para baixo. A aeração para as condições simuladas ocorreria nas proximidades do degrau 22 (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008). O degrau 24, portanto, está situado no início da região aerada, enquanto os degraus 6, 12 e 18 estão situados na região não aerada. A Figura 4.1 apresenta um esquema explicativo das posições y , h , l e x . As escalas geométricas aplicadas estão apresentadas nas legendas das figuras na forma $\lambda=1$ para a escala de protótipo e $\lambda=10$ e $\lambda=100$ para as escalas 1:10 e 1:100, respectivamente. Os índices F, R, E e W indicam a consideração de semelhança dos adimensionais Froude, Reynolds, Euler e Weber, respectivamente, conforme Tabela 4.1.

Após, são apresentadas figuras com o desenvolvimento das cargas de pressão nos patamares dos degraus 6 (Figura 4.5), 12 (Figura 4.6), 18 (Figura 4.7) e 24 (Figura 4.8).

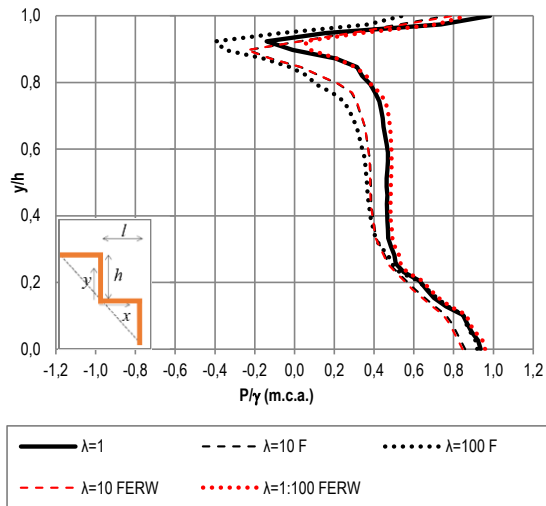


Figura 4.1. Cargas de pressão no espelho do degrau 06. Região não aerada.

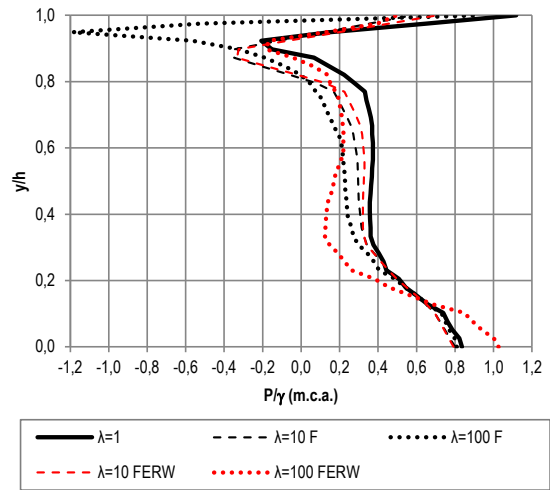


Figura 4.2. Cargas de pressão no espelho do degrau 12. Região não aerada.

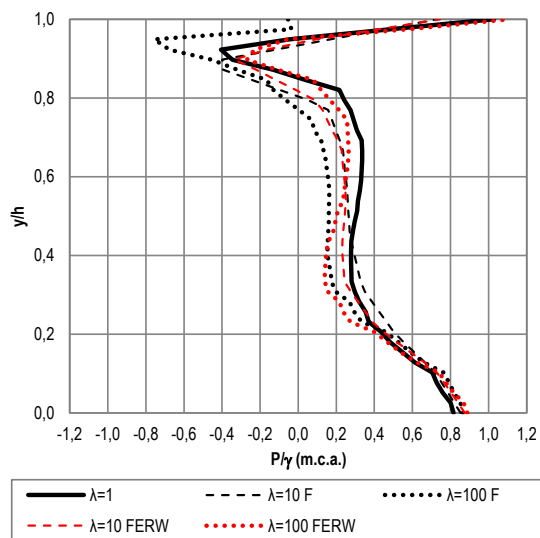


Figura 4.3. Cargas de pressão no espelho do degrau 18. Região não aerada.

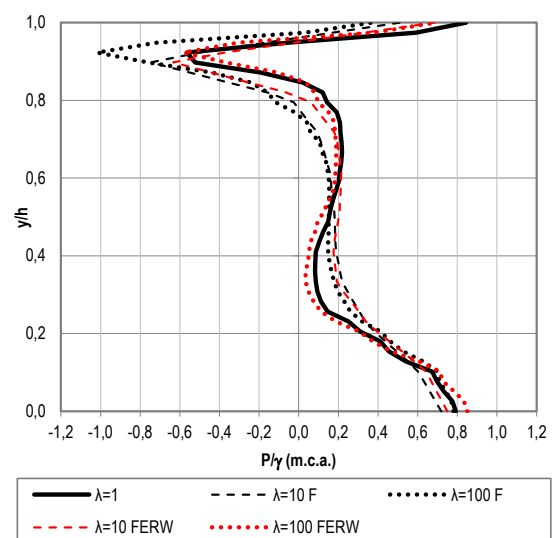


Figura 4.4. Cargas de pressão no espelho do degrau 24. Região aerada.

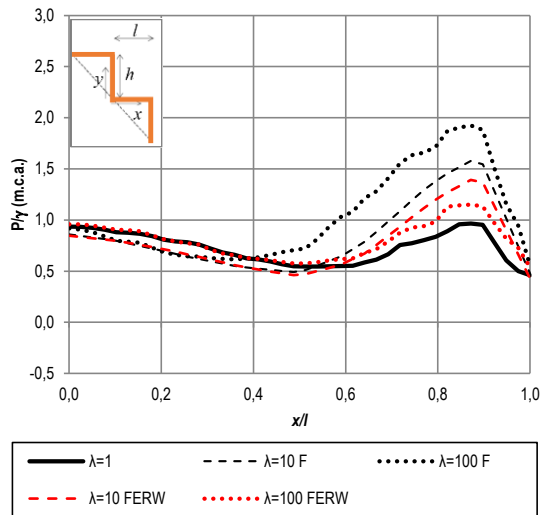


Figura 4.5. Cargas de pressão no patamar do degrau 06. Região não aerada.

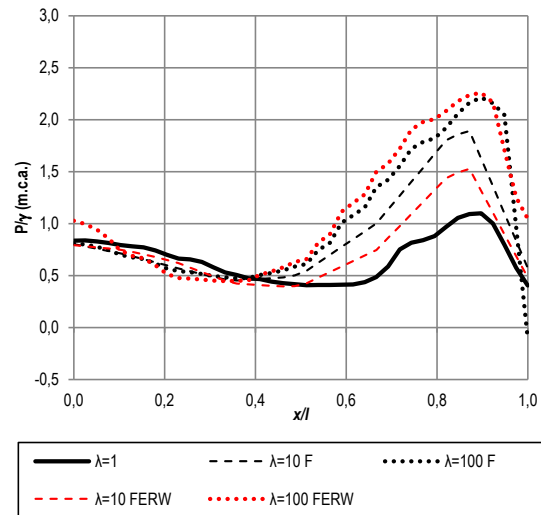


Figura 4.6. Cargas de pressão no patamar do degrau 12. Região não aerada.

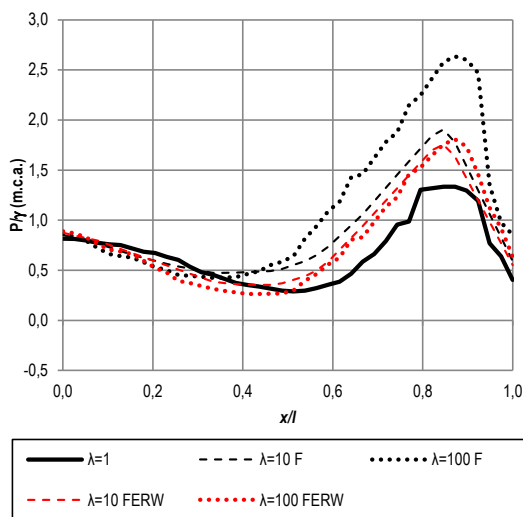


Figura 4.7. Cargas de pressão no patamar do degrau 18. Região não aerada.

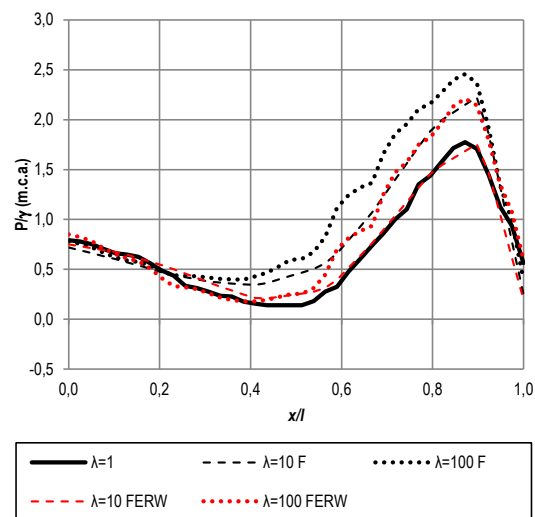


Figura 4.8. Cargas de pressão no patamar do degrau 24. Região aerada.

Analisando-se, inicialmente, os resultados das simulações com água para as diferentes escalas ($\lambda=1$, $\lambda=10$ e $\lambda=100$), observa-se que quanto menor é a escala considerada, maior é a magnitude da pressão negativa que ocorre na parte superior do espelho, na região $0,85 < y/h < 0,90$, e maior é a pressão positiva que ocorre próximo à quina do patamar ($0,80 < x/l < 0,90$). Isso ilustra a hipótese de que, mesmo em um escoamento turbulento e aerado, que é o caso do escoamento sobre vertedouros em degraus, há efeitos de escala em modelos de Froude.

Nas simulações com água, nas escalas 1:1, 1:10 e 1:100, os valores calculados para número de Reynolds, considerando-se as variáveis hidráulicas obtidas na crista do vertedouro, com escoamento crítico, são, respectivamente $1,1 \times 10^7$, $3,6 \times 10^5$ e $1,1 \times 10^4$. Os valores calculados para o número de Weber, na forma $W^{0,5}$ são, respectivamente, 797, 80 e 8. Esses valores indicam que a aplicação da escala 1:10 é adequada para representar os efeitos das forças viscosas ($R > 10^5$), mas é esperado algum efeito de escala na representação dos efeitos da tensão superficial ($W^{0,5} < 100$), conforme critérios apresentados por Boes e Hager (2003) e por Kells e Smith (1991).

O comportamento sistemático observado nos resultados permite inferir que como um efeito da redução do tamanho do modelo, os resultados de pressões máximas (nos patamares) e mínimas (nos espelhos dos degraus) serão mais severos (tendo-se como referência os resultados da simulação em escala de protótipo, com $\lambda=1$). Para a escala 1:10, as diferenças máximas de pressão média encontradas em escala de protótipo para os espelhos são da ordem de 0,14 m.c.a. (68%) e de 0,79 m.c.a. para os patamares (72%), enquanto para a escala 1:100, as diferenças máximas de pressão média encontradas para os espelhos são da ordem de 0,98 m.c.a. (470%) e de 1,30 m.c.a. para os patamares (98%).

Esse comportamento sistemático, onde se tem uma tendência de aumento da severidade da pressão média inversamente proporcional à escala, assemelha-se ao observado por Teixeira et al. (2012), ao estudarem efeitos de escala em pressões médias em ressaltos hidráulicos. Os autores justificaram tal comportamento devido à aeração ser menor nos modelos do que no protótipo. Adicionalmente, comenta-se que no caso do modelo com escala 1:100, a entrada e o transporte de ar no fluido seriam significativamente subestimados, uma vez que os efeitos da tensão superficial e das forças viscosas passam a ser super representados no modelo (PFISTER; CHANSON, 2014).

Analisando-se os resultados das simulações com os fluidos hipotéticos, onde as suas características de tensão superficial fluido-ar e viscosidade absoluta foram alteradas de forma a se ter também semelhança frente aos números de Weber e Reynolds, as diferenças entre as pressões médias reduziram. Nas figuras apresentadas anteriormente, observa-se uma aproximação entre as pressões máximas extremas nos modelos reduzidos e as pressões no protótipo (consideradas como referência para as análises efetuadas), principalmente nos espelhos dos degraus. Nos patamares, de forma geral, houve uma melhora significativa nos resultados para a escala 1:10.

Com o objetivo de compreender os efeitos da falta de semelhança dos adimensionais Reynolds e Weber, apresentam-se, na Figura 4.9 e na Figura 4.10, os

resultados das simulações em protótipo e em escala 1:100 para o degrau 18. Nestas figuras, as linhas constituem os valores de pressão média para as simulações considerando-se água ($\lambda=100$ F), fluido hipotético com semelhança dinâmica ($\lambda=100$ FERW), fluido hipotético sem semelhança apenas do número de Reynolds ($\lambda=100$ FEW) e fluido hipotético sem semelhança apenas do número de Weber ($\lambda=100$ FER).

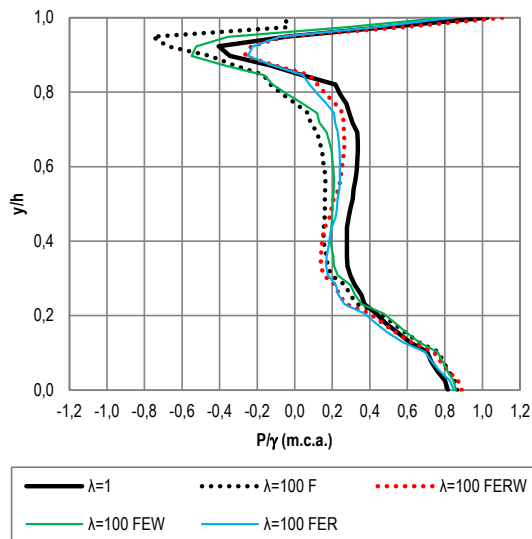


Figura 4.9. Cargas de pressão no espelho do degrau 18. Simulações sem semelhança dinâmica. Região não aerada.

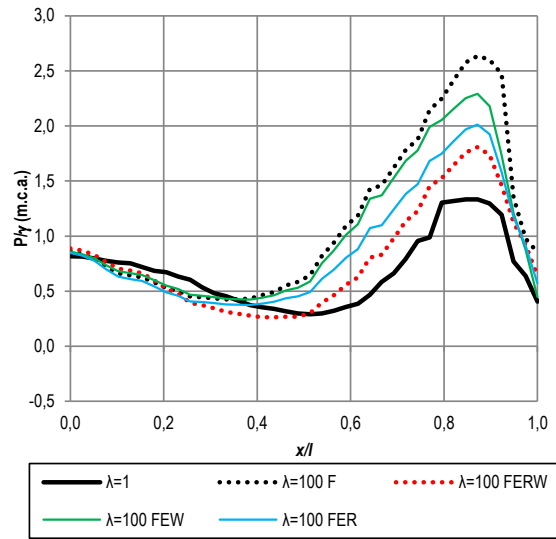


Figura 4.10. Cargas de pressão no patamar do degrau 18. Simulações sem semelhança dinâmica. Região não aerada.

A partir de uma análise qualitativa dessas figuras, observa-se que a não semelhança do número de Weber não resulta piora significativa dos resultados, diferentemente do que se observa para a não semelhança do número de Reynolds, onde os resultados se aproximam mais daqueles obtidos na simulação com água em modelo reduzido. Esse resultado ilustra que os efeitos das forças viscosas são fisicamente mais importantes nos valores de pressão média do que os efeitos da tensão superficial, corroborando com trabalhos como Pfister e Chanson (2014), Heller (2011), entre outros.

Resultados semelhantes foram encontrados para o degrau 24, no início da região aerada do escoamento (Figure 4.11 e Figure 4.12). No entanto, por estar na região aerada, por mais que os resultados sejam aparentemente coerentes, estes devem ser analisados com parcimônia devido à metodologia aplicada, pois estudos mostram que o modelo VOF pode não ser adequado quando a análise está associada à incorporação de ar no escoamento (ALWON *et al.*, 2017, 2019; ALWON, 2019).

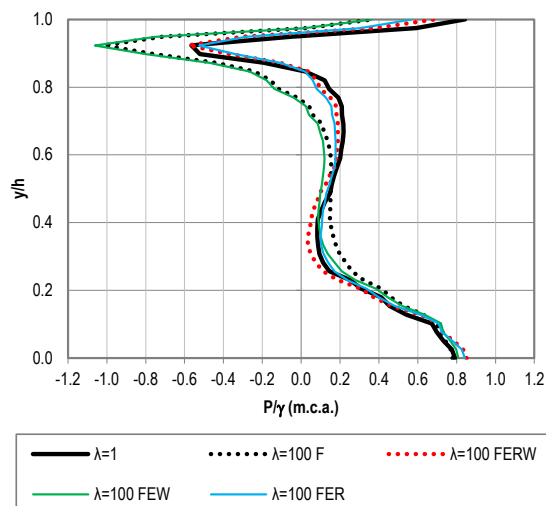


Figure 4.11. Cargas de pressão no espelho do degrau 24. Simulações sem semelhança dinâmica. Região aerada.

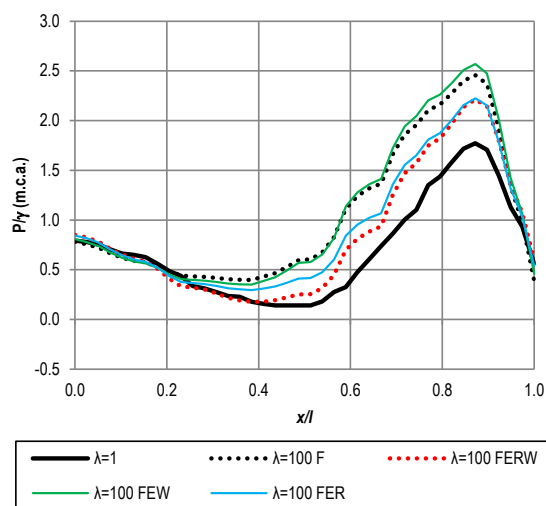


Figure 4.12. Cargas de pressão no patamar do degrau 24. Simulações sem semelhança dinâmica. Região aerada.

Não se espera, neste artigo, sugerir que sejam feitas simulações em escalas reduzidas e fluidos hipotéticos em substituição às simulações com CFD em escala de protótipo. No entanto, os resultados apresentados sugerem que a consideração de fluidos hipotéticos com semelhança dinâmica pode ser utilizada como uma ferramenta para compreender os efeitos de escala e os efeitos de modelo devido a não semelhança de alguns adimensionais e para estimar a magnitude desses efeitos em termos de pressões médias.

4.4 Conclusões

No caso específico de vertedouros em degraus, devido à característica turbulenta do escoamento e à importância das forças gravitacionais e de inércia, os modelos físicos são operados utilizando-se a lei de semelhança de Froude, a qual exige igualdade no número de Froude. Contudo, ao utilizar o fluido água para os modelos físicos reduzidos, não são transpostos os efeitos de viscosidade, de tensão superficial, de concentração de ar e de turbulência observados no protótipo (MATOS, 1990), resultando efeitos de escala (FELDER; CHANSON, 2017; PFISTER; CHANSON, 2014).

Nesse trabalho, buscou-se investigar os efeitos de escala com CFD, utilizando-se fluidos hipotéticos, com características que conjuntamente constituem fluidos que não são encontrados na natureza. A partir da revisão bibliográfica efetuada, esta é a primeira pesquisa que os autores têm conhecimento que utiliza uma abordagem com fluidos

hipotéticos e semelhança dinâmica para estudar estruturas hidráulicas, usualmente analisadas em modelos reduzidos operados utilizando-se a lei de semelhança de Froude.

Os resultados obtidos para o escoamento *skimming flow* sobre um vertedouro em degraus, com uma vazão em escala de protótipo de $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, mostraram que os efeitos de escala que surgem em modelos experimentais podem resultar diferenças de pressões médias consideráveis. Foram observadas diferenças de até 1,3 m.c.a. (98%) entre modelo com escala 1:100 e protótipo e diferenças de até 0,79 mc.a. (72%) quando analisados os resultados do modelo com escala 1:10.

Os resultados obtidos nesse estudo corroboram com a conclusão de Teixeira et al. (2012), que analisaram efeitos de escala em ressaltos hidráulicos. Os dados de pressão média nos degraus provenientes de estudos em modelos físicos reduzidos podem ser utilizados em projetos de engenharia dessas estruturas, uma vez que estes valores se mostraram mais severos nos modelos reduzidos do que no protótipo, semelhante ao observado por Teixeira et al. (2012).

Ao considerar os fluidos hipotéticos, chegou-se a diferenças absolutas menores, o que mostra que a alteração nas características dos fluidos para se ter semelhança em outras forças além da gravitacional possui grande potencial, na modelagem computacional, resultando valores mais próximos daqueles obtidos ao simular o protótipo, mesmo que os fluidos hipotéticos considerados não existam na natureza.

Ao buscar a compreensão do efeito da não semelhança dos números de Reynolds e de Weber, individualmente, verificou-se grande importância na semelhança de Reynolds para que o escoamento com o fluido hipotético resulte pressões mais próximas àquelas do protótipo. Nesta mesma análise, ao desconsiderar a semelhança do número de Weber, para as condições simuladas, as pressões médias foram bastante semelhantes àquelas obtidas ao simular com um fluido com semelhança dinâmica, mostrando que os efeitos de escala nas pressões médias para o escoamento no vertedouro em degraus decorrem principalmente da não semelhança do número de Reynolds.

Este artigo não tem como objetivo sugerir que sejam feitas simulações em escalas reduzidas e fluidos hipotéticos em substituição às simulações com CFD em escala de protótipo, mas apresentar uma nova abordagem para estudar efeitos de escala em estruturas hidráulicas. Aparentemente, esta metodologia possui potencial de ser aplicada em estudos de efeitos de escala de diferentes estruturas hidráulicas, buscando-se compreender a significância de simplificações necessárias à modelagem física e cuidados necessários à interpretação de dados experimentais.

Contudo, ressalta-se que embora a capacidade computacional tenha permitido o uso de CFD para avaliação da hidrodinâmica do escoamento em estruturas hidráulicas, os resultados fornecidos por tais ferramentas ainda requerem dados de protótipo ou de modelos físicos para sua validação. Assim, os autores acreditam que ambas as abordagens, experimental e computacional, têm importante papel no estudo da hidrodinâmica dos escoamentos, sendo essenciais estudos que integrem ambas as abordagens.

Referências bibliográficas

ALWON, J. van *et al.* Experimental and numerical modelling of aerated flows over stepped spillways. *In:* , 2017, Kuala Lumpur, Malaysia. **International 37th IAHR World Congress**. Kuala Lumpur, Malaysia: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2017. p. 12. Disponível em: <http://eprints.whiterose.ac.uk/122417/>.

ALWON, J. C. van. **Numerical and Physical Modelling of Aerated Skimming Flows over Stepped Spillways**. 2019. 1–398 f. PhD thesis, Leeds, UK, 2019.

ALWON, J. van *et al.* Prediction of air entrainment in skimming flow over stepped spillways using numerical methods. *In:* , 2019, Panama City, Panama. **International 38th IAHR World Congress**. Panama City, Panama: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2019. p. 11.

AMADOR, A. T. **Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado**. 2005. 244 f. - Universitat Politècnica de Catalunya, PhD Thesis. Barcelona, Spain, 2005.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Characterization of the nonaerated flow region in a stepped spillway by PIV. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 128, n. 6, p. 1266–1273, 2006.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 135, n. 12, p. 1092–1100, 2009.

ARANTES, E. J. **Caracterização do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus via CFD**. 2007. 204 f. PhD Thesis. São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2007.

ARANTES, E. J. *et al.* Lower nappe aeration in smooth channels: experimental data and numerical simulation. **Anais da Academia Brasileira de Ciencias**, [s. l.], v. 82, n. 2, p. 521–537, 2010. Disponível em: www.scielo.br/aabc.

AYDIN, M. C.; ISIK, E.; ULU, A. E. Numerical modeling of spillway aerators in high-head dams. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 10, n. 42, p. 1–9, 2020.

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 826–836, 2009.

BAI, Z. L.; PENG, Y.; ZHANG, J. M. Three-Dimensional Turbulence Simulation of Flow in a V-Shaped Stepped Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 9, p. 1–10, 2017.

BAYON, A. *et al.* 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**, [s. l.], v. 19, p. 137–149, 2018.

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. **J. Hydraul. Eng.**, [s. l.], v. 129, n. 9, p. 661–670, 2003.

BOMBARDELLI, F. A.; MEIRELES, I.; MATOS, J. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 263–288, 2011.

BUNG, D. B. Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 639–648, 2011.

BUNG, D. B. Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 322–329, 2013.

CARRILLO, J. M. *et al.* Experimental and Numerical Analysis of Two-Phase Flows in Plunge Pools. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 146, n. 6, p. 1–11, 2020.

CELIK, I. B. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 130, n. 7, p. 0780011–078001, 2008.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 4, p. 361–368, 1999.

CHANSON, H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 445–460, 1994.

CHANSON, H. Stepped spillway flows and air entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 422–435, 1993.

CHANSON, H. Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 125–142, 2009.

CHANSON, H.; TOOMBES, L. Air-water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 28, p. 1737–1761, 2002. Disponível em: <http://www.uq.edu.au/~hchans>.

CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. Flow Resistance in Skimming Flows and its Modelling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 809–819, 2002.

CHEN, Q.; DAI, G.; LIU, H. Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 128, n. 7, p. 683–388, 2002.

CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; ALVES, A. A. M. Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 131–137, 2015.

DANESHFARAZ, R. *et al.* Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. **Advances and Applications in Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 805–822, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17654/FM019040805>.

FELDER, S.; CHANSON, H. Scale effects in microscopic air-water flow properties in high-velocity free-surface flows. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [s. l.], v. 83, p. 19–36, 2017.

FRIZELL, K. W.; FRIZELL, K. H. **Guidelines for Hydraulic Design of Stepped Spillways. Hydraulic Laboratory Report HL-2015-06**. Denver, CO: [s. n.], 2015.

GABL, R.; RIGHETTI, M. Design criteria for a type of asymmetric orifice in a surge tank using CFD. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 397–410, 2018.

GOMES, J. F. **Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros**. 2006. PhD Thesis. Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2006.

HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 293–306, 2011.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. **Journal of Computational Physics**, [s. l.], v. 39, p. 201–225, 1981.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence. **Int. J. Heat Mass Transfer**, [s. l.], v. 15, p. 301–314, 1972.

KELLS, J. A.; SMITH, C. D. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. **Canadian Journal of Civil Eng.**, [s. l.], v. 18, p. 358–377, 1991. Disponível em: www.nrcresearchpress.com.

KOBUS, H. **Hydraulic Modelling - German Association for Water Resources - Bulletin 7**. Parey, Hamburg: German Association for Water Resources and Land Im, 1980.

KOSITGITTIWONG, D.; CHINNARASRI, C.; JULIEN, P. Y. Numerical simulation of flow velocity profiles along a stepped spillway. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 227, n. 4, p. 327–335, 2013.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 269–289, 1974.

LI, D. *et al.* Case study on application of the step with non-uniform heights at the bottom using a numerical and experimental model. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 1762, p. 1–19, 2018.

LOBOSCO, R. J.; SCHULZ, H. E. Análise Computacional do Escoamento em Estruturas de Vertedouros em Degraus. *In:* , 2010, Buenos Aires. (E. Dvorkin, M. Goldschmit, & M. Storti, Org.) **Mecánica Computacional Vol XXIX**. Buenos Aires: Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2010. p. 3593–3600.

LOPES, P.; LEANDRO, J.; CARVALHO, R. F. Numerical procedure for free-surface detection using a Volume-of-Fluid model. **Journal of Hydro-Environment Research**, [s. l.], v. 21, p. 43–51, 2018.

MATOS, J. S. G. **Arejamento como Medida de Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas**. 1990. Master thesis, Lisboa, Portugal (in Portuguese), 1990.

MEIRELES, I. *et al.* Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 138, n. 10, p. 870–877, 2012.

MORTENSEN, J. D.; BARFUSS, S. L.; JOHNSON, M. C. Scale effects of air entrained by hydraulic jumps within closed conduits. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. 90–95, 2011.

MÜLLER, G. Energy dissipation through entrained air compression in plunging jets. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], p. 1–7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1609105>. Acesso at: 31 Jan. 2022.

NOVAK, P. *et al.* **Hydraulic Modelling - An Introduction: Principles, Methods and Applications**. Firsted. New York, NY: Spon Press, 2010.

PEGRAM, G. G. S.; OFFICER, A. K.; MOTTRAM, S. R. Hydraulics of Skimming Flow on Modeled Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 5, p. 500–510, 1999.

PEREIRA, L. de J. *et al.* Proposição de um Defletor Côncavo a Jusante de Vertedouro em Degraus com 1V:0,75H: estudo numérico. *In:* , 2021, Belo Horizonte, Brazil. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, Brazil: ABRhídrico - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2021. p. 1–11.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. **Journal of Hydrodynamics**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 291–298, 2014.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 6, p. 352–359, 2010.

QIAN, Y. *et al.* Air Movement Induced by Water Flow with a Hydraulic Jump in Changing Slope Pipes. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 4, p. 1–11, 2017.

QIAN, Y. *et al.* Numerical and Experimental Study on Mitigation of Storm Geysers in Edmonton, Alberta, Canada. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 146, n. 3, p. 1–13, 2020.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. **Journal of Fluids Engineering (ASME)**, [s. l.], v. 116, p. 405–413, 1994. Disponível em: <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/>.

SALEH, S. M.; HUSAIN, S. M. Validation of the Computational ANSYS-CFX code for Free Surface Flow: Skimming Flow over Non-Uniform Step Size Stepped

Spillways. **ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences**, [s. l.], v. 31, n. s3, p. 361–367, 2019. Disponível em: <https://zancojournals.su.edu.krd/index.php/JPAS>.

SANAGIOTTO, D. G. *et al.* Three-dimensional numerical simulation of flow in vertical slot fishways: Validation of the model and characterization of the flow. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 24, n. e20, p. 1–14, 2019.

SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. Características do escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 17–31, 2008.

SANAGIOTTO, D. G.; ROSSI, J. B.; BRAVO, J. M. Applications of computational fluid dynamics in the design and rehabilitation of nonstandard vertical slot fishways. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 199, p. 1–22, 2019.

SÁNCHEZ-JUNY, M.; BLADÉ, E.; DOLZ, J. Pressures on a stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 505–511, 2007.

SIMÕES, A. L. A. **Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas**. 2012. 559 f. PhD Thesis. São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2012.

SIMÕES, A. L. A. *et al.* Free-surface Profiles and Turbulence Characteristics in Skimming Flows along Stepped Chutes. **Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 1–12, 2013.

SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. de M. Stepped and smooth spillways: Resistance effects on stilling basin lengths. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 329–337, 2010.

STENMARK, E. **On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software**. 2013. 75 f. Master thesis, Göteborg, Sweden, 2013.

STEPHENSON, D. Energy dissipation down Stepped Spillways. **Water Power & Dam Construction**, [s. l.], v. 43, n. 9, p. 27–30, 1991.

TABARI, M. M. R.; TAVAKOLI, S. Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 1215–1224, 2016.

TASSINARI, L. C. da S. *et al.* Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 25, n. e3, p. 1–17, 2020.

TASSINARI, L. C. da S. *et al.* Efeitos de Escala em Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus: investigação numérica e computacional. *In:* , 2018, Buenos

Aires, Argentina. **Proceedings of XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica**. Buenos Aires, Argentina: IAHR, 2018. p. 3023–3034.

TEIXEIRA, D. *et al.* Efeito de Escala nos Valores de Pressão Média junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico Submerso. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 87–100, 2012.

TERRIER, S. **Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features**. 2016. 1–339 f. PhD thesis, Lausanne, Switzerland, 2016.

TORO, J. P. *et al.* Characterization of turbulence statistics on the non-aerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 1195–1221, 2016.

TORRES, C. *et al.* Application of Three-Dimensional CFD VOF to Characterize Free-Surface Flow over Trapezoidal Labyrinth Weir and Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 147, n. 3, p. 1–19, 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001852](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001852). Acesso at: 30 Jan. 2022.

TORRES, C. *et al.* Determination of scale effects for a scaled physical model of a labyrinth weir using CFD. *In:* , 2018. **7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, ISHS 2018**. [S. l.]: Utah State University, 2018. p. 606–616.

TORRES, C. **Numerical Modelling of Hydraulic Free Surface Flows and Scale Effects Associated with Physical Modelling**. 2018. 305 f. PhD thesis, Leeds, UK, 2018.

TOZZI, M. J. **Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus**. 1992. PhD Thesis. São Paulo, Brazil. (in Portuguese), 1992.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. I: Physical Modeling and Boundary Layer Development. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 142, n. 7, p. 04016015, 2016a.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. II: Pressure and Velocity Fields. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 142, n. 7, p. 04016016, 2016b.

ZHANG, J.; CHEN, J.; WANG, Y. Experimental study on time-averaged pressures in stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 236–240, 2012.

ZINDOVIC, B. *et al.* Stepped spillway flow-comparison of numerical and scale models. **FME Transactions**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 218–223, 2014.

**5 ANÁLISE DE INCERTEZAS NA AVALIAÇÃO DA DISSIPÇÃO DE
ENERGIA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO
NATURAL E COM AERADORES: UMA ABORDAGEM COM CFD**

Uncertainties Analysis in the Assessment of Energy Dissipation Over Stepped Spillways with Self-Aeration and with Aerators: a CFD approach

CAPÍTULO 5: ANÁLISE DE INCERTEZAS NA AVALIAÇÃO DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL E COM AERADORES: UMA ABORDAGEM COM CFD

Este último artigo foi desenvolvido a partir de uma demanda do projeto de P&D firmado entre o Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de FURNAS (LAHE), o Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Fundação de Apoio à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FAURGS), denominado “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Forçada”. A demanda constava em modelar computacionalmente uma estrutura física construída no LOH, denominada LOH II, a partir da qual seriam desenvolvidos estudos com dados de pressão com aeração natural e aeração induzida por defletor.

Além disso, este artigo buscou compreender a dissipação de energia ao longo da calha em degraus, sendo esta informação necessária ao projeto do vertedouro e, principalmente, ao projeto das estruturas de dissipação de energia a jusante deste. Ao longo da revisão bibliográfica desenvolvida para a tese, foram diversos os artigos que discutiram a dissipação de energia e forneceram dados, gráficos ou equações para a sua estimativa. No entanto, muitos trabalhos experimentais consideraram particularidades metodológicas, principalmente no que diz respeito à definição da superfície livre e à obtenção de profundidades e velocidades, seja por via direta ou por via indireta, onde parte-se da profundidade ao fim do ressalto hidráulico. Dessa forma, surgiu a dúvida de como que essas particularidades afetam os resultados e, principalmente, como os resultados em termos de dissipação de energia afetam o dimensionamento de bacias de dissipação de energia na prática dos escritórios de engenharia.

Este artigo contou com dados e, principalmente, discussões e dúvidas dos estudos experimentais que foram feitos dentro do projeto de P&D (CANELLAS, 2020; FERLA *et al.*, 2021; MATOS *et al.*, 2022; NOVAKOSKI, 2021; TASSINARI *et al.*, 2020) e trabalhos anteriores (CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015; DAI PRÁ *et al.*, 2012; SANAGIOTTO, 2003; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008).

Este capítulo se baseia no seguinte artigo, ainda não submetido:

TASSINARI, Lucas Camargo da Silva; SANAGIOTTO, Daniela Guzzon; FRAGA, Isadora Melo. Análise de Incertezas na Avaliação da Dissipação de Energia em Vertedouros em Degraus com Aeração Natural e com Aeradores: uma abordagem com CFD.

Resumo

A utilização de vertedouros em degraus como estrutura de descarga de barragens possui a vantagem de que parte da energia é dissipada ao longo dos degraus, resultando em uma economia às obras a jusante da estrutura, como bacias de dissipação por ressalto hidráulico, por exemplo. Dessa forma, faz-se necessário conhecer a dissipação de energia ao longo da calha para o dimensionamento destas estruturas. Nesse artigo, foram utilizadas ferramentas de fluidodinâmica computacional para estudar os efeitos no dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico das incertezas na estimativa da dissipação de energia em estudos experimentais. Adicionalmente, analisou-se o impacto de utilizar um aerador do tipo defletor para a dissipação de energia em um vertedouro em degraus. Foram encontradas diferenças significativas em valores de dissipação de energia relativa em função da metodologia considerada. No entanto, para um caso específico que foi analisado, isso não refletiu diferenças importantes nas dimensões da bacia de dissipação de energia, sendo mais importantes as diferenças encontradas nas velocidades de entrada na bacia e nas profundidades ao final do ressalto hidráulico. Ao analisar o efeito da indução de ar no escoamento, foram observadas diferenças nos valores de dissipação de energia nulas a pequenas para as vazões analisadas.

Palavras-chave: dissipação de energia, aeradores, RANS, aeração natural, vertedouro em degraus.

5.1 Introdução e Objetivos

Para proporcionar o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico, foram necessárias barragens para a regularização de vazões dos rios ou para aumentar os níveis de água em determinados pontos de captação de água, proporcionando níveis adequados de segurança hídrica para abastecimento de água, geração de energia elétrica e, em menor proporção, para transporte. Além disso, devido à ocupação das margens dos rios, populações passaram a sofrer com inundações ribeirinhas e, conseqüentemente, barragens foram posicionadas com o objetivo de amortecer cheias e proteger populações contra os seus efeitos.

Em todos os casos, são necessárias estruturas de proteção das barragens contra cheias denominadas vertedouros. Tradicionalmente, os vertedouros conduziam suas águas por superfícies lisas, buscando-se, sempre, um perfeito acabamento das superfícies em concreto, com o objetivo de reduzir problemas com cavitação (KELLS; SMITH, 1991; VOLKART, 1983). No entanto, a partir do emprego de concreto compactado com rolo (CCR), com maior facilidade construtiva e, portanto, menor custo global para a obra em comparação com soluções com concreto convencional, tornou-se comum a utilização de vertedouros de soleira livre com calha em degraus, com diferentes alturas de degraus e declividades longitudinais. Além das facilidades construtivas, essa solução permite economia nas estruturas de dissipação de energia, uma vez que parte da energia se dissipa ao longo da calha em degraus (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010).

Dessa forma, pode-se dizer que nos últimos 45 anos, foram diversas as pesquisas desenvolvidas com o intuito de compreender o comportamento hidrodinâmico do escoamento sobre vertedouros em degraus buscando-se o projeto e execução de obras seguras, adequadas às particularidades de cada local (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2006; ARANTES, 2007; BOES; HAGER, 2003b; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; CHAMANI; RAJARATNAM, 1999; CHANSON, 1993; CHANSON; TOOMBES, 2002; CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002; CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015; DAI PRÁ *et al.*, 2012; FRIZELL, 2006; GOMES, 2006; MATOS *et al.*, 2022; MATOS, 1990; MEIRELES, 2011; NOVAKOSKI *et al.*, 2017b; RUFF; WARD, 2002; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SIMÕES, 2008; STEPHENSON, 1991; TOZZI, 1992), sendo Essery e Horner (1978 apud RUFF; WARD, 2002) o primeiro trabalho a investigar a hidráulica de vertedouros em degraus.

Nesse sentido, surge a seguinte questão: qual o conhecimento necessário para projetar vertedouros em degraus?

Em termos estruturais, é importante garantir que as estruturas projetadas possuam resistência suficiente às solicitações empregadas. Nesse sentido, torna-se importante compreender o desenvolvimento de pressões ao longo dos degraus, abordada em detalhes em diversos trabalhos (e.g., AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; BOES; HAGER, 2003b; CHANSON, 1993, 1994b; MATOS et al., 2022; TOZZI, 1992), e qual é a região onde ocorre a aeração do escoamento junto ao pseudofundo, a partir do qual a superfície em concreto passa a contar com maior proteção devido à presença de ar junto à superfície (BUNG, 2011; FRIZELL; RENNA; MATOS, 2013; MATOS, 1990; MEIRELES *et al.*, 2012; POVH *et al.*, 2004; WOOD; ACKERS; LOVELESS, 1983; ZHANG; CHANSON, 2016a).

Em termos hidráulicos, com o objetivo de definir as alturas dos muros que contêm o escoamento, é necessário conhecer as profundidades do escoamento. Meireles et al. (2012), Bung (2011) e Sanagiotto (2003) são exemplos de estudos que apresentam equações empíricas e metodologias para a estimativa das profundidades ao longo da calha em degraus. Além de profundidades, é essencial ao projeto hidráulico o conhecimento do desenvolvimento de velocidades (BOES; HAGER, 2003b; MEIRELES *et al.*, 2012; ZHANG; CHANSON, 2016b) e dissipação de energia ao longo da calha em degraus (CHANSON, 1993; FELDER; CHANSON, 2011; FRIZELL; FRIZELL, 2015; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010), pois, além das velocidades serem variáveis importantes ao estudo de ocorrência de cavitação, o cálculo da energia no pé do vertedouro é necessário ao dimensionamento das estruturas de dissipação de energia, que correspondem, em muitos casos, a estruturas de custos importantes ao empreendimento (CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010). Salienta-se que a redução dos seus custos compõe uma das principais vantagens em se utilizar vertedouros em degraus. Nesse sentido, diversos estudos (e.g., AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; BOES; HAGER, 2003b; GOMES, 2006; MATOS et al., 2022) buscaram definir velocidades admissíveis em calhas em degraus, que variam entre 15 e 20 m/s e correspondem a variações entre 11,5 e 25 m³/s/m de vazão específica.

Nos últimos anos, pesquisadores vêm estudando maneiras de aumentar as vazões específicas de projeto máximas a serem utilizadas nos projetos e operação de vertedouros a partir da inserção de dispositivos de aeração, como defletores e ranhuras (FERLA *et al.*,

2021; FUHRHOP; SCHULZ; WITTENBERG, 2014; KÖKPINAR; GÖĞÜŞ, 2002; NOVAKOSKI, 2021; NOVAKOSKI *et al.*, 2021; PFISTER; HAGER, 2010b, 2010a; PFISTER; HAGER; MINOR, 2006a; TERRIER, 2016; TERRIER; PFISTER; SCHLEISS, 2015; ZAMORA *et al.*, 2008) e pilares (KOEN; BOSMAN; BASSON, 2019; PRIEBE *et al.*, 2021). Além disso, há uma busca por compreender as estatísticas de turbulência no escoamento bifásico ar-água (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2006; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; TORO *et al.*, 2016) e como exatamente ocorre a interação entre as fases, efetuando-se uma análise pormenorizada do ar dentro do escoamento (FELDER; CHANSON, 2009, 2017; MATOS, 1999; MEIRELES *et al.*, 2012; TERRIER, 2016).

No entanto, foram executados diversos vertedouros em degraus quando não se dispunha de pesquisas como as citadas ao longo deste texto, como é o caso do vertedouro da barragem de New Croton, nos EUA (TOZZI, 2010), e do vertedouro da barragem Gold Creek, na Austrália (CHANSON; BUNG; MATOS, 2015). Sabendo-se que o projeto dessas estruturas não contou com o embasamento teórico dos trabalhos supracitados, como estas estruturas estão se comportando? De fato, a rotina de projetos hidráulicos de vertedouros em degraus nos escritórios de engenharia, nas últimas décadas, demandou todo esse conhecimento desenvolvido ao longo das últimas quatro décadas?

Em pesquisa efetuada no início de 2022 ao Cadastro Nacional de Barragens – CNB do Comitê Brasileiro de Barragens - CBDB⁴, havia um total de 848 barragens cadastradas. Dessas, considerando-se as barragens em alvenaria de pedra e em concreto, chega-se a um total de 179 barramentos (21% do total cadastrado), com alturas distribuídas conforme Figura 5.1. A quantidade de barragens cadastradas é relativamente pequena frente ao universo de barragens brasileiras. Contudo, é provável que as barragens não cadastradas possuam altura relativamente baixa e tenham sido executadas em terra, com a finalidade de abastecimento de pequenas comunidades e municípios ou para irrigação.

⁴ Disponível para associados em <https://cadastrdebarragens.pti.org.br/>. Acesso em 25/01/2022, às 13:00.

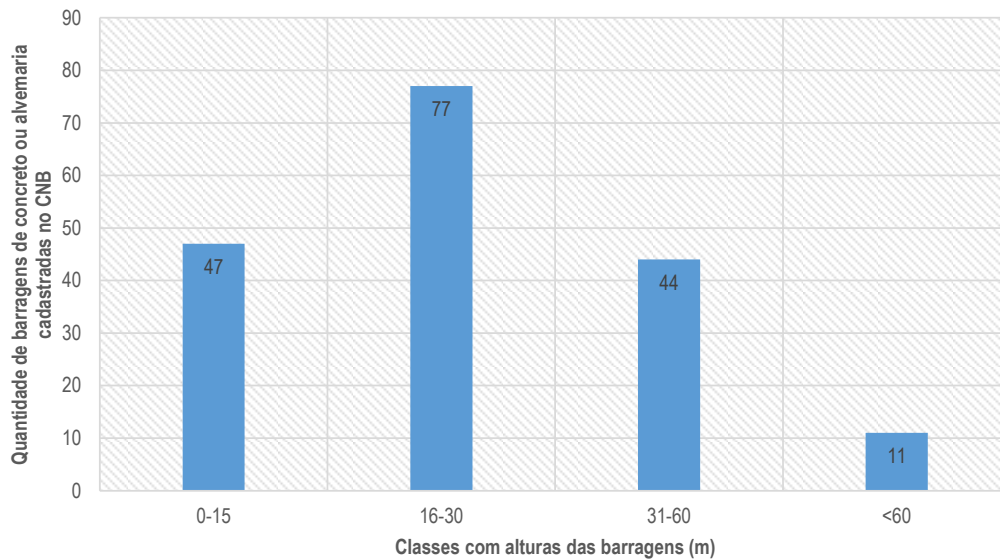


Figura 5.1. Alturas de barragens de concreto e alvenaria que constam no Cadastro Nacional de Barragens do CBDB.

A Figura 5.1 mostra que 94% das barragens em concreto ou alvenaria cadastradas no CNB possuem altura inferior a 60 m e 69% possuem altura inferior a 30 m. A Tabela 5.1 engloba um levantamento de barragens com vertedouros em degraus apresentado em Simões (2008), dados obtidos no CNB/CBDB e em documentações técnicas de algumas barragens e dados secundários encontrados na literatura. Esta tabela sintetiza as características de algumas estruturas brasileiras, que se julgou serem representativas do contexto nacional.

Tabela 5.1. Características de algumas barragens com vertedouros em degraus localizadas no território brasileiro.

Nome da Barragem	Ano de início de operação	Estado	Tipo da barragem principal¹	Altura da barragem
Gameleiras	1991	Minas Gerais	Concreto Gravidade, em CC	29,0
Cova da Mandioca	1994	Bahia	Concreto Gravidade, em CC	35,0
Juba I	1995	Mato Grosso	Concreto Gravidade, em CCR	13,0
Juba II	1995	Mato Grosso	-	8,0
Val de Serra	1972	Rio Grande do Sul	Concreto Gravidade, em CC	15,0
Bertarello	1999	Rio Grande do Sul	Concreto Gravidade, em CCR	29,0
Jucazinho	1998	Pernambuco	Concreto Gravidade, em CC	62,0
Rio do Peixe	1989	São Paulo	Terra	25,0
Belo Jardim	1986	Pernambuco	Concreto Gravidade, em CC	56,0
Pedras Altas	2001	Bahia	Terra/Enrocamento ²	24,2 ³
Dona Francisca	2001	Rio Grande do Sul	Concreto Gravidade, em CC	50,5
João Leite ³	2009	Goiás	Concreto Gravidade, em CCR	52,0
PCH Esmeralda ⁴	2006	Rio Grande do Sul	Concreto Gravidade, em CCR	18,8
Porcos	2020	Ceará	Concreto Gravidade, em CCR	22,5 ⁵

¹CC = Concreto Convencional; CCR = Concreto Compactado com Rolo.

²Dados obtidos em Conceição e Fontes (2019).

³Dados obtidos de documentação técnica do empreendimento (SANEAMENTO DE GOIÁS - SANEAGO, 2000).

⁴Dados obtidos de documentação técnica do empreendimento (TRACTEBEL ENGINEERING, 2020).

⁵Esse valor corresponde à altura do vertedouro, desde a crista até a chegada na bacia de dissipação, diferentemente da informação de altura apresentada para as outras barragens (CONSÓRCIO HIDROCONSULT - MWH BRASIL, 2012).

Ao analisar as características desses barramentos e vertedouros, percebe-se que, de forma geral, são vertedouros com alturas até 60 m e sem controle por comportas, sendo incomum o uso de controle por comportas em vertedouros em degraus em todo o mundo (FRIZELL; FRIZELL, 2015).

As capacidades dos vertedouros não são informações facilmente obtidas em sistemas de informações nacionais. Em virtude disso, foram obtidas as vazões específicas

de apenas 05 dentre essas estruturas: o vertedouro da Barragem Jucazinho possui vazão específica de projeto $q = 32,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (NEVES; RODRIGUES; CABRAL, 2021); o vertedouro da barragem Dona Francisca possui vazão específica de projeto $q = 32,0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (MATOS *et al.*, 2022); o vertedouro da Barragem do Ribeirão João Leite possui vazão específica de projeto $q = 9,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (SANEAMENTO DE GOIÁS - SANEAGO, 2000); o vertedouro da PCH Esmeralda possui vazão específica de projeto $q = 15,9 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (TRACTEBEL ENGINEERING, 2020), e; o vertedouro da Barragem dos Porcos possui vazão específica de projeto $q = 5,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (CONSÓRCIO HIDROCONSULT - MWH BRASIL, 2012).

Observa-se, com isso, que alguns vertedouros foram dimensionados para vazões específicas acima dos limites apresentados na literatura. No entanto, deve-se levar em consideração a característica predominante de escoamento livre no emprego de vertedouros em degraus no Brasil, sem controle por comportas, estando as calhas dos vertedouros sujeitas a grandes solicitações por períodos relativamente pequenos ao longo da sua vida útil. Os efeitos disso em relação aos danos por cavitação são imprevisíveis, uma vez que a severidade do dano depende da solicitação e do tempo em que a estrutura é solicitada (FALVEY, 1990). Matos et al. (2022) comentam que, apesar de o vertedouro da barragem Dona Francisca ter sido dimensionado para uma vazão específica de $32 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, alguns degraus apresentaram danos após eventos de cheia ocorridos em dezembro de 2010, quando o vertedouro ficou sujeito a vazões específicas da ordem de $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ por aproximadamente 7 e 14 horas, respectivamente.

Analisando-se as características destes vertedouros, entende-se que foram necessários conceitos hidráulicos importantes para determinar o comportamento da linha d'água ao longo da calha e como a dissipação de energia ocorre, com o objetivo de dimensionar a estrutura de dissipação. No entanto, em nenhum caso foram consideradas estruturas de aeração induzida. Não se pretende com esse comentário reduzir a importância dos estudos recentes relacionados ao conhecimento da turbulência no escoamento, da incorporação de ar ou da possibilidade de aumentar a segurança dos vertedouros a partir da inserção de ar no escoamento. A ideia central deste artigo consta em sugerir que ainda devem ser investidos esforços em melhor compreender características relativamente básicas do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus, mais especificamente no que diz respeito ao desenvolvimento das velocidades e, conseqüentemente, da dissipação de energia, que é de suma

importância para o dimensionamento das estruturas de dissipação de energia a jusante das calhas em degraus.

Existem principalmente duas maneiras de estudar o escoamento em estruturas hidráulicas: com uma abordagem física ou com uma abordagem computacional, e ambas possuem incertezas (PFISTER; HAGER, 2014). A abordagem física está sujeita aos efeitos de escala e possui limitações relacionadas às metodologias empregadas, à discretização espacial da obtenção de dados e à instrumentação e infraestrutura disponíveis. Nesse sentido, a modelagem computacional surge como uma ferramenta importante para analisar os escoamentos, proporcionando maior flexibilidade para estudar estruturas hidráulicas com diferentes configurações. No entanto, a qualidade dos resultados depende da abordagem matemática, do modelo de turbulência, da malha e dos processos de calibração e validação do modelo utilizado.

Todos os trabalhos citados ao longo deste texto, até aqui, intencionalmente, utilizaram-se de abordagem física para obter os resultados. Estes resultados foram e são utilizados em projetos de vertedouros em degraus. Nesse sentido, surgem algumas dúvidas:

- Como são tratados os erros e limitações dos resultados destes trabalhos na prática de projeto de engenharia hidráulica?
- De fato, é possível sempre estar dentro dos limites de aplicação das equações e modelos?
- A literatura fornece dados de dissipação de energia a partir de estudos experimentais, que necessitam realizar simplificações para a definição da dissipação de energia, seja definindo a profundidade do escoamento no pé do vertedouro (h_1) por uma medição indireta da profundidade no final do ressalto hidráulico (h_2), seja desconsiderando a variação de velocidades ao longo do perfil ($\alpha_c = 1,0$). Como que são considerados os efeitos de simplificações metodológicas utilizadas nos trabalhos referenciados nos projetos?

Não é uma tarefa simples responder a todas essas perguntas em uma única pesquisa, sendo mais difícil ainda responder a todas essas perguntas em um único artigo. Nesse sentido, esse artigo tem como objetivo responder às seguintes questões científicas: quais são os possíveis impactos no dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico devido às simplificações utilizadas nos estudos experimentais de

dissipação de energia em vertedouros em degraus? Havendo indução de ar por um defletor e câmara de ar na região próxima à crista do vertedouro, a dissipação de energia ao longo da calha em degraus é alterada?

O presente artigo utiliza uma abordagem com fluidodinâmica computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamic*) para estimar a dissipação de energia ao longo da calha em degraus, aplicando-se diferentes tratamentos matemáticos aos dados de velocidade. Com isso, buscou-se avaliar as consequências, no dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico, de possíveis variações metodológicas em trabalhos clássicos que estudaram dissipação de energia. Ao final, discute-se a inserção de ar no escoamento a partir de um defletor no primeiro degrau do vertedouro e seu efeito no dimensionamento da bacia de dissipação.

5.2 Metodologia

Neste item de metodologia do trabalho, estão apresentadas as instalações experimentais modeladas e descrições do modelo computacional utilizado, das simulações efetuadas, das condições de contorno e da discretização da malha. Ao final, apresenta-se um item onde está descrita e justificada a metodologia de análise dos resultados.

5.2.1 Instalações Experimentais

O modelo computacional desenvolvido nesse trabalho se baseou no modelo físico LOH II, localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), em Porto Alegre. As instalações experimentais estão descritas em detalhe em Novakoski (2021) e os resultados obtidos neste modelo constam em publicações recentes (CANELLAS, 2020; FERLA *et al.*, 2021; MATOS *et al.*, 2022; NOVAKOSKI *et al.*, 2021).

O modelo IPH II consiste em um vertedouro em degraus com altura total igual a 4,07 m e largura da calha igual a 0,50 m, com 52 degraus com altura igual a 0,06 m e declividade da calha 1V:0,75H (Figura 5.2). Esta estrutura é em metal, possui uma ogiva Creager, sem degraus de altura variável para transição, e suas paredes são em acrílico, o que permite a visualização do escoamento. A estrutura também possui a possibilidade de agregar um defletor, localizado entre a ogiva e o primeiro degrau, em conjunto com um

sistema de fornecimento de ar por uma câmara de ar, instalada no espelho do primeiro degrau (Figura 5.3). Dessa forma, é possível operar o modelo tanto com aeração natural quanto com aeração induzida.



Figura 5.2. Instalações do Modelo LOH II. Cortesia de Carolina Novakoski.

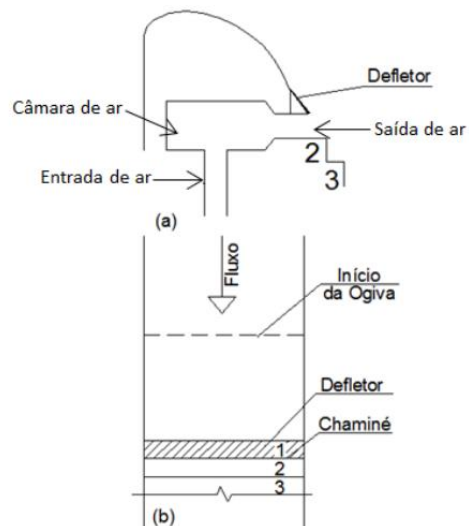


Figura 5.3. Foto das instalações e esquema do sistema de indução de ar do Modelo LOH II, sendo (a) um corte transversal e (b) uma vista frontal da região da crista. Cortesia de Carolina Novakoski.

Os experimentos foram conduzidos com vazões específicas 0,20, 0,30, 0,40 e 0,50 m³/s/m. Sendo o modelo operado em escala 1:15, as vazões correspondentes em escala de protótipo variam de 11,6 m³/s/m a 29,0 m³/s/m.

As medições de pressões foram feitas junto às quinas externas das faces verticais e horizontais dos degraus com transdutores de pressão (Omega PX419, Sitron SP96 e Hytronic TM25) a uma distância de 8 mm da extremidade. Para mais detalhes, ver Novakoski (2021), Novakoski et al. (2021) e Canellas (2020). Neste trabalho, quando utilizado o defletor, considerou-se uma altura de 10 mm, formando um ângulo de 45° a partir da quina do primeiro patamar, conforme Figura 5.4.

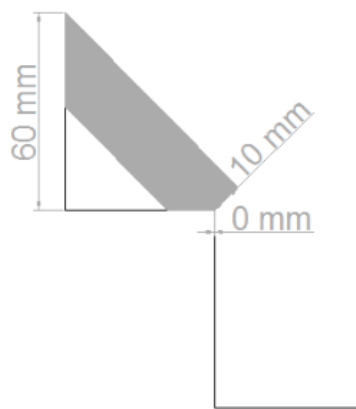


Figura 5.4. Geometria considerada para o defletor no Modelo LOH II. Cortesia de Carolina Novakoski.

5.2.2 Modelo Numérico

As simulações foram desenvolvidas no software comercial Ansys Fluent, que resolve as equações da continuidade e da quantidade de movimento com um método de volumes finitos (ANSYS INC., 2013). Este software possui grande histórico de utilização em simulações com escoamento bifásico ar-água em vertedouros em degraus (ALWON *et al.*, 2017, 2019; ALWON, 2019; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; EGHBALZADEH; JAVAN, 2012; ZHAN; ZHANG; GONG, 2016) e com aeradores (AYDIN; OZTURK, 2009, 2010; TENG; YANG, 2016).

Foi utilizado o modelo multifásico Euleriano, onde as equações da continuidade e da conservação de quantidade de movimento são calculadas separadamente, para cada fase ar-água (ALWON *et al.*, 2017, 2019; ALWON, 2019), com interação entre fases através do modelo Symmetric, recomendado para escoamentos onde uma fase secundária

em uma determinada região do domínio torna-se a fase primária em outra região (ANSYS INC., 2013). A turbulência foi modelada a partir das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS), com o modelo de turbulência SST (*Shear-Stress Transport*) $k-\omega$. Este modelo de turbulência, que possui histórico de utilização em estudos de vertedouros em degraus (ALWON, 2019; KOSITGITTIWONG; CHINNARASRI; JULIEN, 2013; LOPES; LEANDRO; CARVALHO, 2018), é uma combinação de outros dois modelos, pois aplica o $k-\omega$ nas zonas próximas às paredes e o $k-\epsilon$ nas zonas mais afastadas (KOSITGITTIWONG; CHINNARASRI; JULIEN, 2013).

As simulações foram desenvolvidas em escala de modelo e utilizaram um domínio com largura de 0,01 m, com condição de contorno de simetria nas paredes e malhas com número de elementos, após a adaptação na interface ar-água, da ordem de 1×10^6 a 2×10^6 , com cerca de 40 elementos em cada espelho e 30 elementos em cada patamar. A Figura 5.5 apresenta parte do domínio simulado, na região próxima à crista, para as simulações com aeração natural e induzida. A geometria da câmara de ar simulada possui as mesmas dimensões que a do modelo físico existente.

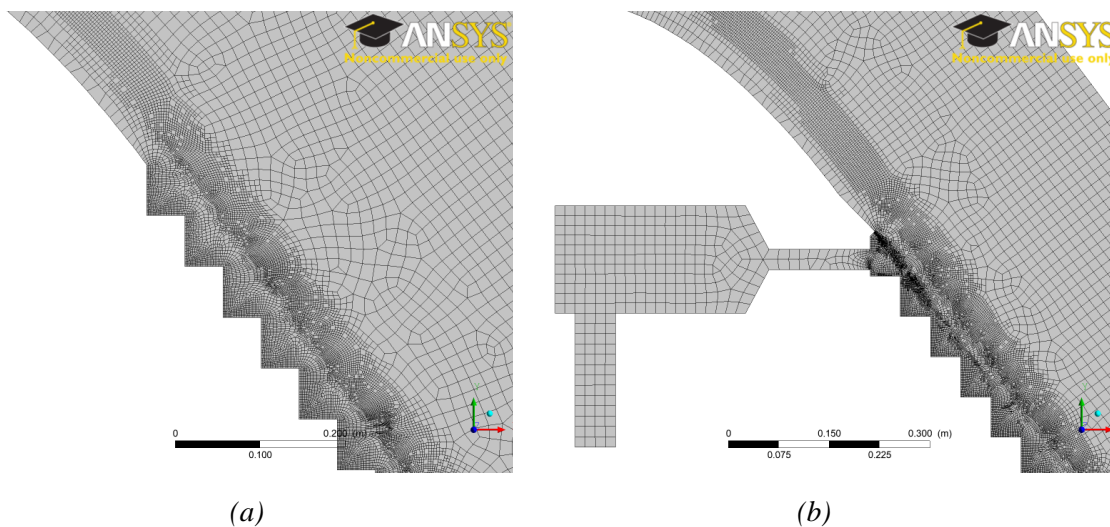


Figura 5.5. Vista parcial da estrutura simulada do Modelo Físico LOH II: região próxima à crista da estrutura para (a) as simulações com aeração natural e para (b) as simulações com aeração induzida.

5.2.3 Características das Simulações

As simulações com aeração natural contaram com as vazões específicas 0,15, 0,30 e 0,45 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, enquanto as simulações com aeração induzida foram desenvolvidas com as vazões específicas 0,15 e 0,30 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, apenas. Em todos os casos, a condição de

contorno de entrada foi uma vazão mássica, na parte inferior do reservatório a montante do vertedouro, equivalente às vazões específicas desejadas. Nas simulações com aeração induzida, a vazão de ar foi inserida como uma vazão mássica (com massa específica do ar $\rho_{air} = 1,225 \text{ kg/m}^3$), conforme dados dos ensaios experimentais (NOVAKOSKI, 2021), sendo a demanda relativa de ar $\beta = 5,8\%$ para a vazão de água de $0,15 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e $\beta = 2,4\%$ para a vazão de água de $0,30 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

Na saída do domínio, foi aplicada pressão atmosférica como condição de contorno. Na parte superior do domínio, foi considerada pressão atmosférica e fluxo apenas de ar. Uma condição de não deslizamento foi aplicada às superfícies sólidas (calha, defletor, crista), considerando-se rugosidade nula a todas as paredes. Como o modelo possui uma largura menor que a do modelo físico, foi aplicada condição de simetria às paredes do domínio, o que força que as variáveis do campo do escoamento sejam espelhadas com o respectivo campo de simetria (ÇENGEL; CIMBALA, 2006). Esta simplificação prejudica a representação anisotrópica da turbulência, mas permite a redução do esforço computacional e elimina possíveis efeitos de parede devido à menor largura do modelo numérico (ARANTES, 2007).

5.2.4 Teste de malha e validação do modelo

O teste de malha foi efetuado com o Índice de Convergência de Malha (GCI, do inglês *Grid Convergence Index*) (CELIK *et al.*, 2008; ROACHE, 1994), com histórico de aplicação em estudos de vertedouros (AYDIN; OZTURK, 2009; BAI; PENG; ZHANG, 2017; BAYON *et al.*, 2018; LI; ZHANG; XU, 2018; LOPES; LEANDRO; CARVALHO, 2018; TASSINARI *et al.*, 2020; TENG; YANG, 2016; YANG; TENG; ZHANG, 2019), o qual permite estimar as incertezas em uma determinada variável devido à utilização de uma determinada malha. Após a definição da malha, foi efetuada a validação do modelo comparando-se resultados numéricos com dados experimentais e equações empíricas obtidas na literatura.

O GCI foi calculado para velocidades médias ao longo dos degraus com aeração natural, sendo velocidade a variável hidráulica mais representativa no estudo de dissipação de energia. Foram desenvolvidas três simulações com o mesmo domínio e uma vazão específica $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s/m}$, com três malhas não estruturadas, conforme apresentado na Figura 5.5.a. Os números de elementos das malhas após a adaptação foram $7,02 \times 10^5$ (coarse grid), $1,70 \times 10^6$ (medium grid) e $3,90 \times 10^6$ (fine grid), compondo,

respectivamente, 30, 40 e 60 elementos nos espelhos, 23, 30 e 45 elementos nos patamares dos degraus e tamanhos máximos de elementos nos degraus iguais a 2,0, 1,5 e 1,0 mm.

As velocidades médias (u_m) acima do pseudofundo, a partir das quinas dos degraus, foram calculadas da seguinte forma:

$$u_m = \frac{1}{A} \int u \, dA, \quad 5.1$$

sendo A a área da seção transversal ao escoamento e u a velocidade. Nessa etapa de escolha da malha, considerou-se que a superfície livre ocorre onde há o equilíbrio entre ar e água, ou seja, onde a fração de água é $\alpha = 0,50$ (ALBADAWI *et al.*, 2013; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; TORO *et al.*, 2016).

Neste trabalho, a validação do modelo constou em uma comparação visual entre os dados de pressão média obtidas em uma simulação com a malha escolhida (*medium grid*) com aeração natural e vazão específica $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e dados experimentais de Matos *et al.* (2022). Adicionalmente, comparou-se o desenvolvimento das concentrações de ar em um perfil perpendicular ao pseudofundo, partindo da quina de alguns degraus, com um modelo proposto por Chanson, Yasuda e Ohtsu (2002). Esse modelo permite definir um perfil teórico de concentração de ar ao longo da profundidade do escoamento a jusante do ponto de incipiência da aeração, apenas em função da concentração média da seção, de acordo com a equação

$$C = 1 - \tanh^2 \left(K' - \frac{y}{2.D'y_{90}} \right), \quad 5.2$$

sendo C a concentração de ar, K' uma constante de integração, D' a difusividade turbulenta adimensional, y a distância medida perpendicular ao pseudofundo e y_{90} a distância perpendicular ao pseudofundo onde a concentração de ar local é $C = 0,90$. Os valores de K' e D' podem ser calculados através das Equações 5.4 e 5.5, em função da concentração média de ar (C_m), para $C_m < 0,70$, sendo

$$(1 - C_m).y_{90} = d \quad 5.3$$

$$D' = \frac{0,848.Cm - 0,00302}{1 + 1,1375.Cm - 2,2925.Cm^2} \quad 5.4$$

$$K' = \tanh^{-1}(\sqrt{0,1}) + \frac{0,5}{D'} \quad 5.5$$

onde d é a altura característica do escoamento, definida por

$$d = \int_0^{y_{90}} (1 - C) dy \quad 5.6$$

5.2.5 Análise dos Resultados

Para a análise da dissipação de energia ao longo da calha em degraus com uma abordagem numérica, há duas variáveis importantes de se definir: uma variável é a profundidade, usualmente adotada em modelos numéricos como sendo a profundidade onde há equilíbrio entre ar e água, com fração de água $\alpha = 0,5$ (ALBADAWI *et al.*, 2013; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; TORO *et al.*, 2016) e em estudos experimentais como sendo a profundidade da mistura característica ar-água com concentração de ar local $C = 0,90$ (h_{90}) (BOES; HAGER, 2003b; BUNG, 2013; CHANSON, 1994a; FRIZELL; FRIZELL, 2015; MEIRELES; BOMBARDELLI; MATOS, 2014), e outra variável é o coeficiente de Coriolis (α_C), que pode ser variável ou igual à unidade (TOZZI, 2010).

Em vertedouros em degraus íngremes ($\theta > 20^\circ$), a resistência ao escoamento ocorre em função dos processos de recirculação e a dissipação de energia é dominada pela transferência de quantidade de movimento entre o escoamento principal e aquele que se localiza abaixo do pseudofundo (CHANSON; YASUDA; OHTSU, 2002). Assim, a resistência ao escoamento pode ser considerada na análise hidráulica do escoamento a partir da definição do fator de resistência (f), também conhecido como coeficiente de atrito de Darcy-Weisbach. A partir de uma análise dimensional, Chanson (1993) mostrou que o fator de resistência depende do número de Reynolds, da rugosidade da calha e da declividade da calha (θ).

Não existe, ainda, um consenso na literatura para a definição do fator de resistência para vertedouros em degraus, havendo diferentes equações para o cálculo de

f na literatura (CHANSON, 1993; CHANSON; BUNG; MATOS, 2015; SANAGIOTTO; MARQUES, 2008; SIMÕES; SCHULZ; PORTO, 2010).

São vários os fatores que interferem na dissipação de energia, de forma que a geometria dos degraus, a declividade da calha, o tipo de escoamento e a aeração do escoamento podem impactar diretamente na energia residual no pé do vertedouro (CONTERATO; MARQUES; ALVES, 2015). Além disso, sabe-se que a dissipação de energia é proporcional à altura do degrau, de forma que degraus maiores tendem a dissipar mais energia (SANAGIOTTO, 2003; TABARI; TAVAKOLI, 2016). No entanto, a configuração dos degraus de forma não uniforme (com interposição de degraus de transição ou descontinuidades localizadas ao longo da calha) não traz impacto na posição do início da aeração, tampouco à dissipação de energia e ao padrão do escoamento, quando comparado com uma calha com degraus uniformemente distribuídos (FELDER; CHANSON, 2011).

A energia a montante (E_m) pode ser calculada através da Equação 5.7 (BOES; HAGER, 2003a; CHANSON; BUNG; MATOS, 2015), sendo Y a distância vertical entre a crista do vertedouro e a posição onde se está sendo avaliada a energia (altura relativa do vertedouro) e h_c a profundidade crítica do escoamento.

$$E_m = Y + \frac{3}{2}h_c \quad 5.7$$

A energia a jusante, ou no ponto a ser analisado (E_j), pode ser determinada por via direta ou indireta. A via direta consta em medir efetivamente a profundidade ($h \cdot \cos\theta$) e a energia cinética ($\alpha_c \frac{u_m^2}{2g}$) e, a partir disso, calcular a energia (CHOW, 1959)

$$E_j = h \cdot \cos\theta + \alpha_c \frac{u_m^2}{2g} \quad 5.8$$

sendo h uma profundidade característica, α_c o coeficiente de Coriolis, ou fator de correção de energia cinética, θ o ângulo da calha em degraus em relação a um plano horizontal, u_m a velocidade média e g a aceleração da gravidade. Devido à característica bifásica do escoamento deslizante sobre turbilhões, a variável profundidade (h) pode assumir diferentes valores, podendo ser a altura característica do escoamento denominada

profundidade equivalente à água limpa (d , calculada conforme Equação 5.6) (BOES; HAGER, 2003a; FRIZELL; FRIZELL, 2015; MEIRELES *et al.*, 2012), a profundidade de mistura com $C = 0,90$ (h_{90}), ou ainda outra profundidade equivalente a uma concentração de ar específica.

Nesse sentido, torna-se importante definir qual a profundidade característica deve ser utilizada na análise da dissipação de energia. Lopes, Leandro e Carvalho (2018) mostraram que não há um consenso na literatura a respeito da definição numérica da superfície livre do escoamento e, assim, buscaram estabelecer um procedimento para a definição da superfície livre ao longo de uma calha em degraus com o uso de CFD e o método VOF (Volume of Fluid). A partir de medições experimentais de lâminas d'água com sensores ultrassônicos em uma calha em degraus com declividade 1V:2H, os autores definiram diferentes frações de água (α) em diferentes regiões da calha (aerada e não aerada), concluindo que não há uma isolinha global de α que prediga a superfície do escoamento ao longo de toda a calha. Assim, os autores sugerem que seja utilizada uma fração de água $\alpha=0,7$ para a zona não aerada e $\alpha=0,1$ para a zona aerada. Tassinari et al. (2020) desenvolveram um estudo semelhante, também com o modelo VOF, mas para uma calha em degraus com declividade 1V:0,75H, onde definiram que os valores que melhor se ajustaram aos dados experimentais são $\alpha=0,3$ para a zona não aerada e $\alpha=0,1$ para a zona aerada.

Nesse trabalho, foi utilizado um modelo multifásico Euleriano, a partir de Alwon et al. (2017, 2019) e Alwon (2019), diferentemente dos trabalhos de Tassinari et al. (2020) e Lopes, Leandro e Carvalho (2018). Dessa forma, foi feita uma comparação entre os resultados numéricos e dados experimentais de Sanagiotto e Marques (2008) buscando-se validar as conclusões de Tassinari et al. (2020) em relação à determinação da superfície livre a partir da escolha de frações de água que melhor representem o escoamento deslizante sobre turbilhões em calhas escalonadas com declividade 1V:0,75H. Para a separação das regiões de escoamento, foram considerados os degraus de incipiência da aeração determinados experimentalmente por Novakoski (2021).

Meireles et al. (2012) estudaram perfis de velocidade com dados experimentais e calcularam os valores de coeficiente de Coriolis. Ao comparar os valores calculados de energia cinética com aqueles obtidos com $\alpha_c = 1,0$ (valor comumente adotado em projetos), observaram diferenças da ordem de 16% nos valores de energia específica. Arantes (2007) calculou coeficientes de Coriolis a partir de resultados numéricos e obteve

valores entre 1,085 e 1,149, sendo a média igual a 1,10, similar ao valor proposto por Boes e Hager (2003a).

A via indireta de determinação da energia no pé do vertedouro consta na imposição da formação de um ressalto hidráulico na bacia de dissipação, podendo a profundidade rápida do ressalto, equivalente à profundidade no pé do vertedouro, ser determinada por uma equação (Bèlanger, por exemplo), medida a jusante do ressalto hidráulico. Tozzi (2010) comenta que a comparação entre os valores obtidos pelo emprego das duas metodologias (direta e indireta) conduz a diferenças máximas de 15% no valor da energia a jusante, refletindo um erro na determinação da profundidade da ordem de 7%.

Neste trabalho, o fator de correção da energia cinética foi calculado através da equação (CHOW, 1959)

$$\alpha_c = \frac{1}{A} \int \left(\frac{u}{u_m} \right)^3 dA \quad 5.9$$

Enfim, a energia dissipada em relação à energia de montante ($\Delta E/E_m$) foi calculada através da equação

$$\Delta E/E_m = \frac{E_m - E_j}{E_m} \quad 5.10$$

Após, foram comparados os resultados de dissipação de energia obtidos com aeração natural e com aeração induzida por defletor. Essa análise foi feita para as vazões específicas de água $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Por fim, nesse trabalho, buscou-se avaliar o efeito que têm as incertezas na estimativa da dissipação de energia no comprimento de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico. Não é escopo deste artigo a análise hidrodinâmica do ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros em degraus, sendo este assunto tratado em Novakoski (2017a, 2017b) e Hunt e Kadavy (2021). Assim, as análises desenvolvidas constaram em calcular a energia na entrada da bacia de dissipação e, a partir disso, calcular o comprimento do ressalto hidráulico. Como simplificação, considerou-se a equação de Bèlanger e que o nível de água a jusante da bacia de dissipação coincidente com a altura conjugada lenta (h_2).

Schulz et al. (2015) apresentam diversas equações para o cálculo do comprimento do ressalto hidráulico e do rolo, abrangendo um período de 1917 a 2012, dentre as quais optou-se por utilizar, nesse trabalho, a Equação 5.11, de Marques, Drapeau e Verrette (1997). Como critério para a determinação do comprimento necessário à bacia de dissipação, considerou-se que esta deverá ter comprimento suficiente para conter todo o ressalto hidráulico.

$$L_j = 8,5(h_2 - h_1) \quad 5.11$$

sendo L_j o comprimento do ressalto hidráulico e h_1 a altura conjugada rápida.

Outra variável do ressalto hidráulico analisada refere-se à posição de maior flutuação de pressão ($L_{CPmáx}$), calculada da seguinte forma (MARQUES; DRAPEAU; VERRETTE, 1997)

$$L_{CPmáx} = 1,75(h_2 - h_1) \quad 5.12$$

Essa etapa do trabalho foi desenvolvida na forma de um estudo de caso, considerando-se os seguintes valores hipotéticos, em escala de protótipo:

- Vazão de projeto – $Q = 440 \text{ m}^3/\text{s}$
- Declividade da calha em degraus – $1V:0,75H$
- Largura da calha – $B = 50 \text{ m}$
- Altura dos degraus – $h = 0,60 \text{ m}$
- Desnível entre a crista do vertedouro e a entrada na bacia de dissipação – $Y = 43,8 \text{ m}$

5.3 Escolha da Malha e Validação do Modelo

As incertezas devido à malha nos valores de velocidade média, estimadas através do GCI, variaram de 0,0% a 0,7% ao longo dos 52 degraus, com um valor médio igual a 0,2%. A Figura 5.6 apresenta o desenvolvimento das velocidades médias ao longo dos degraus. Conforme dados experimentais de Matos et al. (2022), o degrau de início da aeração para a vazão $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ é o 24. Percebe-se, com isso, um aumento da dispersão entre os resultados de velocidade média na região aerada do escoamento, junto com um aumento da magnitude desta variável.

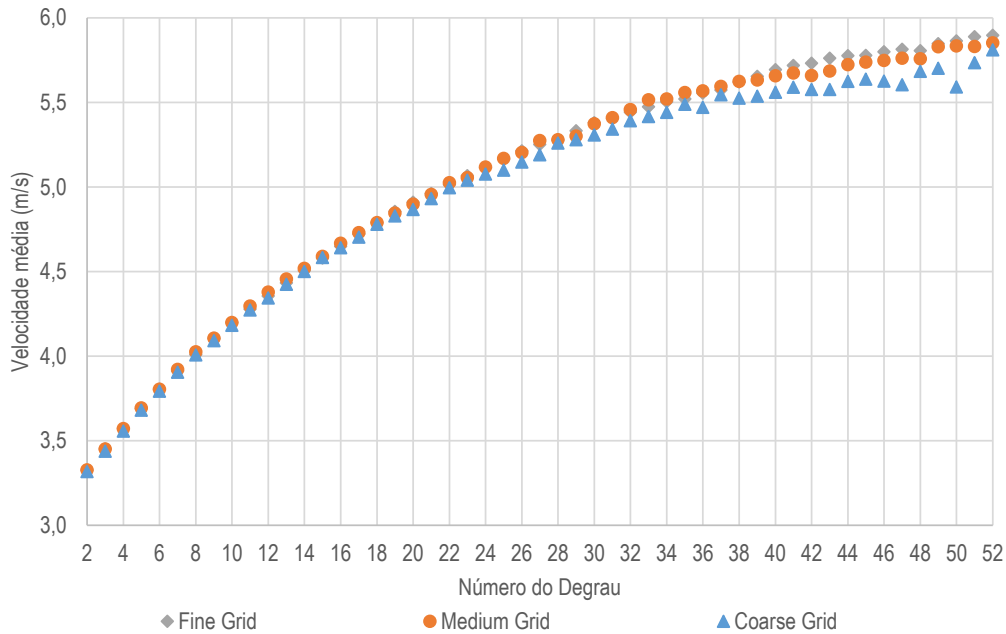


Figura 5.6. Velocidades médias junto às quinas dos degraus para as três malhas testadas para uma vazão específica $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

A partir da análise de escolha da malha com o GCI, julgou-se apropriado utilizar a malha intermediária (medium grid), com $1,70 \times 10^6$ elementos e 1,5 mm de tamanho máximo de um elemento dentro dos degraus.

A validação do modelo foi efetuada a partir de uma simulação com $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Ao comparar as pressões médias dos patamares obtidas experimentalmente (MATOS *et al.*, 2022) a cerca de 8 mm da borda com os perfis resultantes da simulação (Figura 5.7), observa-se uma boa aderência entre resultados numéricos e experimentais, com um erro médio igual a 0,011 m.c.a. para os degraus 5 a 20, o que representa um erro igual a 6,7% em relação à média dos valores de pressão média observada experimentalmente nesses degraus, igual a 0,159 m.c.a.

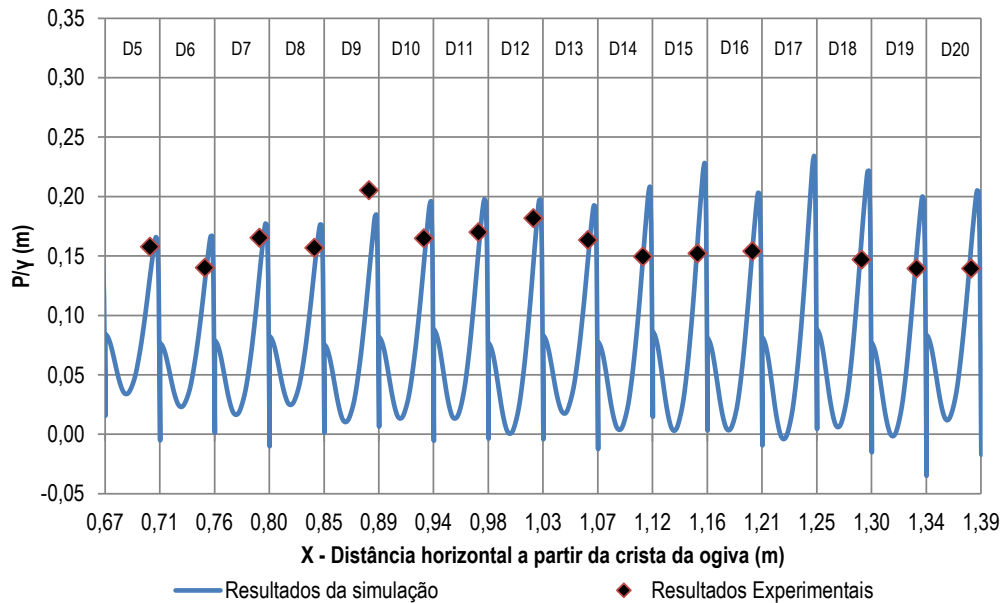


Figura 5.7. Cargas de pressão nos patamares dos degraus ao longo da calha, entre os degraus 5 e 20: resultados das simulações numéricas com a malha intermediária e dados experimentais de Matos et al. (2022) para a validação do modelo computacional. Não há valor experimental para o degrau 17.

As diferenças encontradas entre os resultados experimentais e numéricos para um determinado ponto podem ser justificadas pelas incertezas nas posições relativas das medições de pressão (TASSINARI *et al.*, 2020), podendo a pressão máxima ocorrer entre o ponto de medição de pressão e a extremidade absoluta do patamar.

Conforme dados experimentais (NOVAKOSKI, 2021), o degrau de início da aeração para a vazão $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ é o 10, onde se espera que a concentração média de ar seja da ordem de 0,20 (BUNG, 2011; MEIRELES *et al.*, 2012) a 0,22 (MATOS, 1999). Buscando-se ainda a validação do modelo computacional, calculou-se a concentração média de ar para todos os degraus (Equação 5.3), considerando-se um plano perpendicular ao pseudofundo, partindo das quinas dos degraus. A título de exemplo, são apresentados, na Figura 5.8, os perfis de concentração de ar obtidos numericamente, os perfis teóricos calculados através de um modelo de difusão apresentado em Chanson, Yasuda e Ohtsu (2002) (Equação 5.2) e as concentrações médias de ar obtidas numericamente, necessárias à aplicação do modelo de difusão. Os degraus 11 e 15 estão no entorno da incipiência da aeração, enquanto os degraus 20 e 25 estão na região aerada do escoamento.

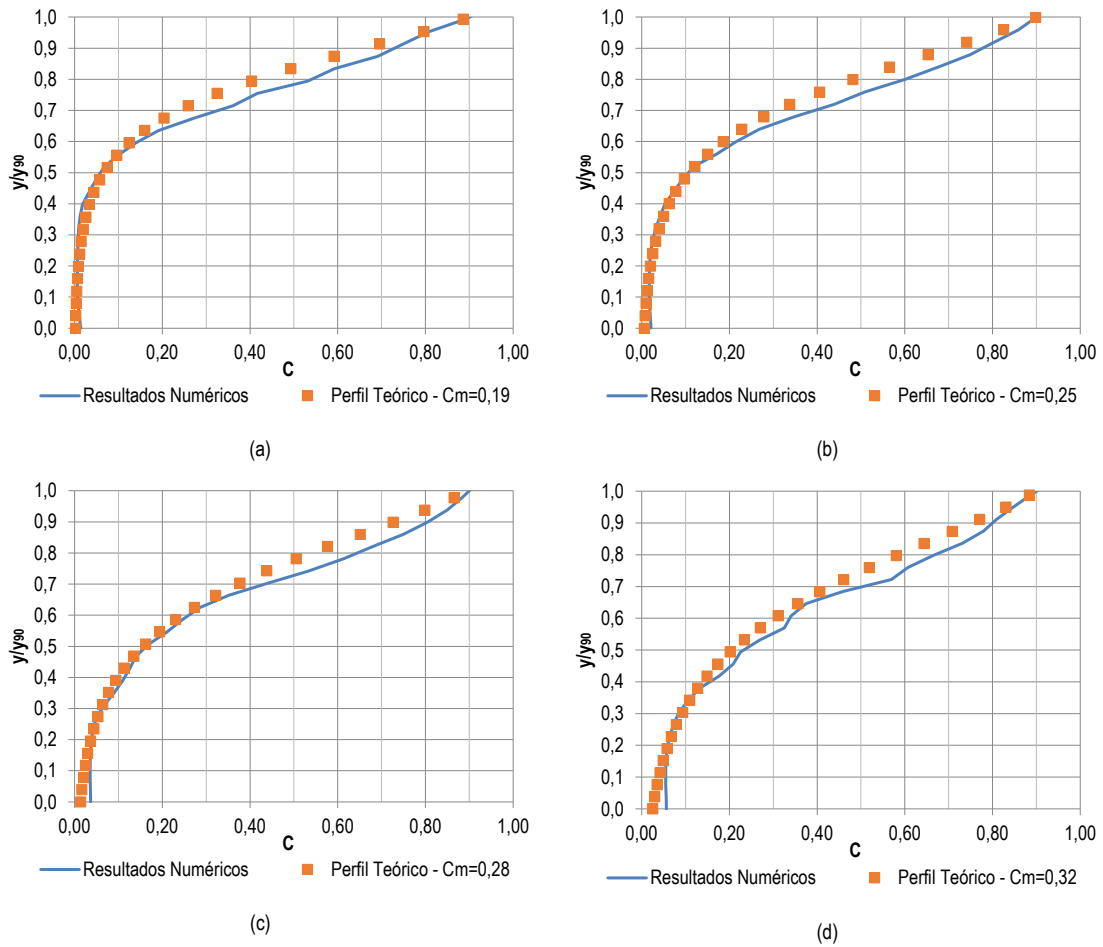


Figura 5.8. Perfis de concentração de ar para o escoamento naturalmente aerado, com $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$: resultados numéricos e perfis teóricos obtidos a partir de um modelo de difusão para os degraus (a) 11, (b) 15, (c) 20 e (d) 25.

Observa-se, portanto, uma boa aderência entre os resultados numéricos de concentração de ar e os perfis teóricos, o que valida o modelo computacional para análises que demandam incorporação de ar. Esse resultado corrobora com Alwon et al. (2019) e Alwon (2019), que sugerem o uso de modelos numéricos Eulerianos com modelo de turbulência SST $k-\omega$ para determinar o ponto de incipiência da aeração e a incorporação de ar no escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus.

5.4 Resultados e Discussão

Este item apresenta resultados, análises e discussões quanto à definição da superfície livre em modelagem computacional com CFD de um vertedouro em degraus e avaliação da dissipação de energia ao longo da calha, considerando-se aeração natural e induzida por um defletor. Ao final, desenvolveu-se o dimensionamento de uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico em um estudo de caso aplicando-se os valores desenvolvidos nos itens anteriores.

5.4.1 Determinação da superfície livre e de profundidades

Tassinari et al. (2020) desenvolveram um estudo numérico com o Ansys CFX, com o modelo multifásico homogêneo e modelo de turbulência k- ϵ , buscando definir quais as isolinhas de fração de água (α) melhor representam a superfície livre do escoamento deslizante sobre turbilhões para um vertedouro em degraus com declividade 1V:0,75H. Como alguns trabalhos consideram que o modelo adotado não é adequado para escoamentos com a incorporação de ar (ALWON *et al.*, 2017, 2019; ALWON, 2019), neste artigo foi utilizado o modelo multifásico Euleriano incorporado ao Ansys Fluent. Dessa forma, tornou-se necessário avaliar se as isolinhas de fração de água sugeridas em Tassinari et al. (2020) para o escoamento em um vertedouro com declividade 1V:0,75H seguem válidas para o modelo Euleriano.

A Figura 5.9 apresenta os resultados obtidos com o modelo Euleriano junto com os resultados numéricos de Tassinari et al. (2020) (que usaram o VOF, no Ansys CFX) e os resultados experimentais de Sanagiotto e Marques (2008). As medições experimentais de profundidades foram feitas em degraus específicos, na metade da largura da calha, perpendicular ao pseudofundo, com uma ponta linimétrica presa em um carrinho móvel. Devido à natureza do escoamento altamente aerado, com uma superfície livre de difícil medição, foi utilizado um detector de lâmina de água de alta sensibilidade com um sinal luminoso instalado na ponta linimétrica (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008).

Os resultados mostram que seguem válidas as conclusões de Tassinari et al. (2020), uma vez que os dados experimentais para a região não aerada ($0 \leq X/X_i \leq 1$) se aproximam da isolinha $\alpha=0,3$. Para a zona não aerada ($X/X_i > 1$), há uma maior dispersão dos resultados, mas há uma indicação de que as frações de água são inferiores a $\alpha=0,3$, restando a sugestão de considerar a isolinha $\alpha=0,1$ para a zona aerada do escoamento.

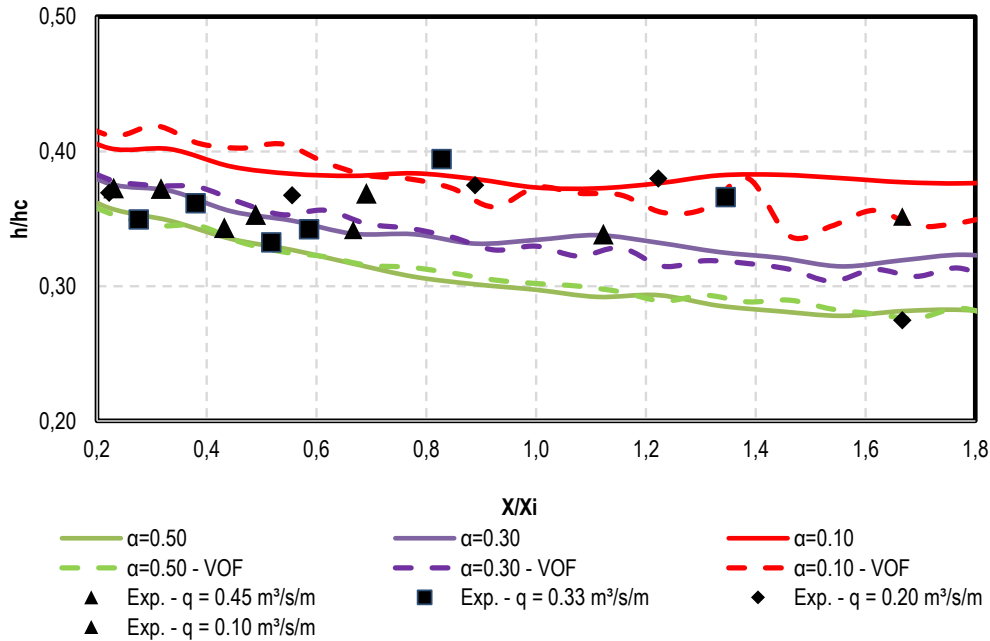


Figura 5.9. Profundidades adimensionalizadas ao longo da calha em degraus para $q = 0,15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ – resultados experimentais (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008) e numéricos, obtidos com os modelos multifásicos homogêneo no Ansys CFX (equivalente ao VOF, em linha tracejada) (TASSINARI et al., 2020) e Euleriano no Ansys Fluent (resultados do presente estudo, em linha contínua).

5.4.2 Avaliação da dissipação de energia para vertedouros em degraus com aeração natural

A avaliação da dissipação de energia ao longo da calha em degraus foi separada em regiões: região com escoamento não aerado, que ocorre para $0 \leq X/X_i \leq 1$, e região com escoamento aerado, que ocorre em $X/X_i > 1$. No presente estudo, de forma geral, essas regiões ocorrem aproximadamente para $Y/h_c < 6,5$ e para $Y/h_c > 6,5$, respectivamente.

A Figura 5.10 apresenta os valores de dissipação de energia obtidos a partir das simulações numéricas para 04 cenários para a região não aerada do escoamento:

- i. Superfície livre definida pelo equilíbrio entre ar e água ($\alpha = 0,5$) e coeficiente de Coriolis (α_c) variado, calculado para cada degrau;
- ii. Superfície livre definida através de análise prévia, com $\alpha = 0,3$ para a região não aerada e $\alpha = 0,1$ para a região aerada, e coeficiente de Coriolis (α_c) variado, calculado para cada degrau;
- iii. Superfície livre definida pelo equilíbrio entre ar e água ($\alpha = 0,5$) e coeficiente de Coriolis $\alpha_c = 1,0$;

- iv. Superfície livre definida através de análise prévia, com $\alpha = 0,3$ para a região não aerada e $\alpha = 0,1$ para a região aerada, e coeficiente de Coriolis $\alpha_c = 1,0$.

Na Figura 5.10, estão apresentados também resultados obtidos a partir de uma equação empírica de Pegram, Offcier e Mottram (1999) e a partir de equações apresentadas em Boes e Hager (2003a).

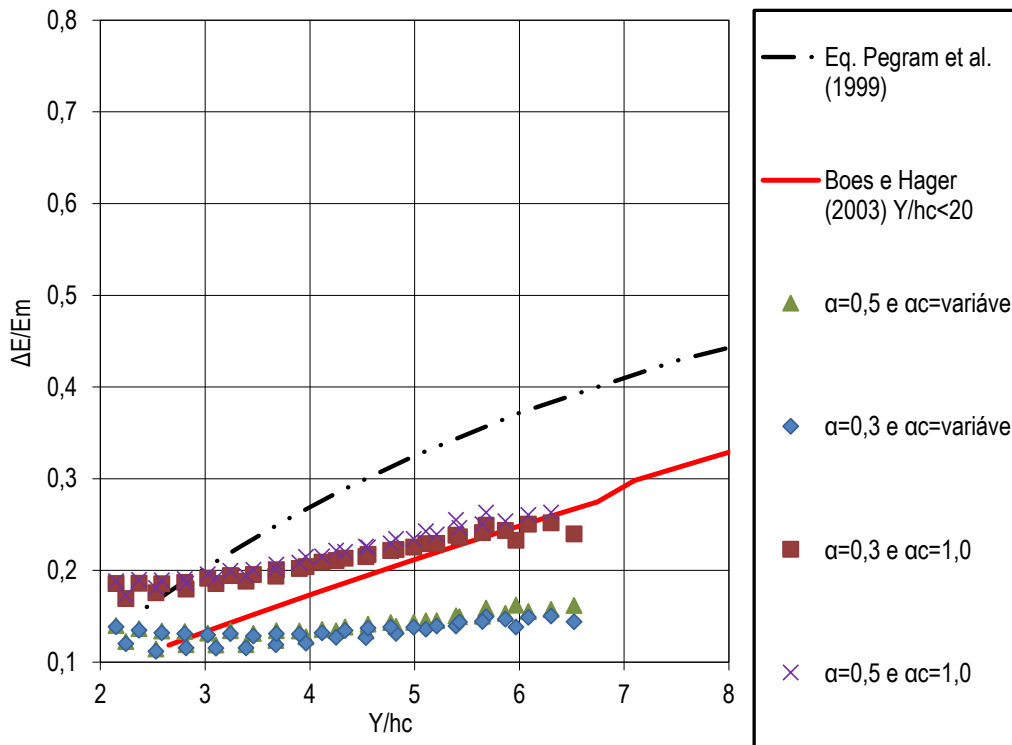


Figura 5.10. Resultados numéricos obtidos no presente estudo de dissipação de energia em relação à energia de montante para $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q = 0,45 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ na região não aerada, comparados com os dados e proposições de outros pesquisadores. Na legenda, “ α ” refere-se à fração de água e “ α_c ” ao coeficiente de Coriolis.

Na região não aerada, a diferença entre as profundidades para $\alpha = 0,5$ ou $\alpha = 0,3$ não resultou diferença significativa entre os valores de dissipação de energia. As diferenças encontradas decorrem da consideração de um coeficiente de Coriolis diferente de 1,0. A Figura 5.11 apresenta os valores de coeficiente de Coriolis e variação dos valores de dissipação de energia relativa calculados considerando-se $\alpha = 0,5$ para a região não aerada (aproximadamente para $Y/h_c < 6,5$, nesse caso). Estes valores crescem desde a unidade junto à crista do vertedouro até um valor da ordem de 1,15, no degrau onde inicia a aeração.

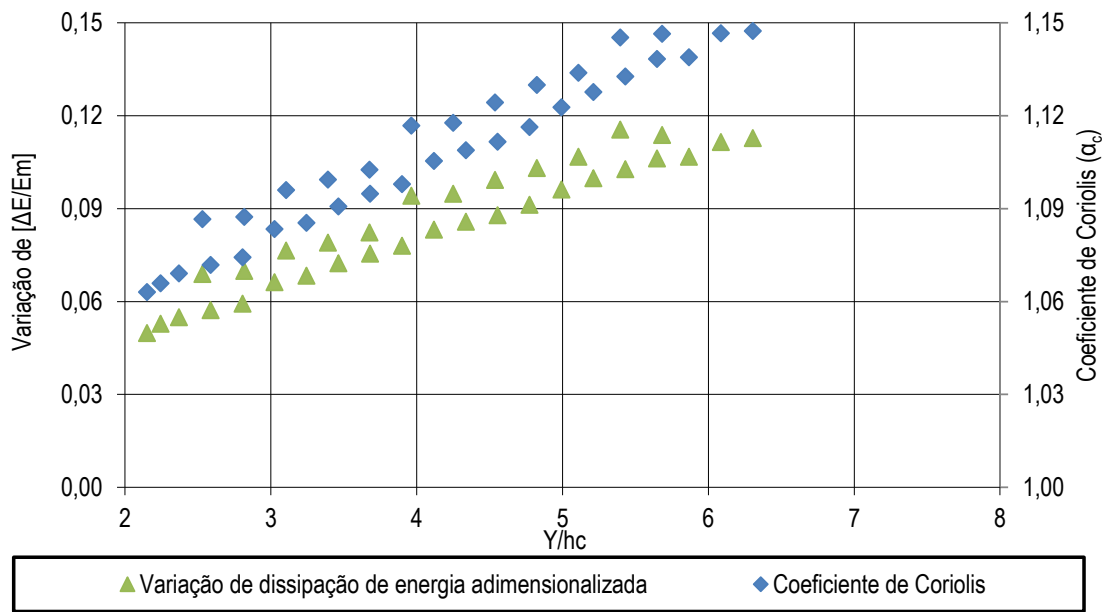


Figura 5.11. Valores de diferença de energia adimensionalizada ($\Delta E/Em$) para as simulações com coeficiente de Coriolis igual a 1,0 e variado e valores de Coeficiente de Coriolis para diferentes degraus na região não aerada ($q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e $q = 0,45 \text{ m}^3/\text{s/m}$).

Conforme a Figura 5.11, a diferença entre os valores calculados para a dissipação de energia com $\alpha_c = 1,0$ ou α_c variado aumenta conforme aumenta o coeficiente de Coriolis, sendo esta uma variável que explica as diferenças encontradas.

A Figura 5.12 apresenta os valores de dissipação de energia obtidos a partir das simulações numéricas para 04 cenários para a região aerada do escoamento. Nessa figura, estão apresentados resultados obtidos a partir de uma equação empírica de Pegram, Officier e Mottram (1999) e resultados obtidos a partir de equações apresentadas em Boes e Hager (2003a), que apresentam duas equações para estimar a dissipação de energia, sendo uma válida para barragens com alturas relativas $Y/h_c < 15 - 20$ e outra para barragens com alturas relativas maiores, com $Y/h_c \geq 15 - 20$.

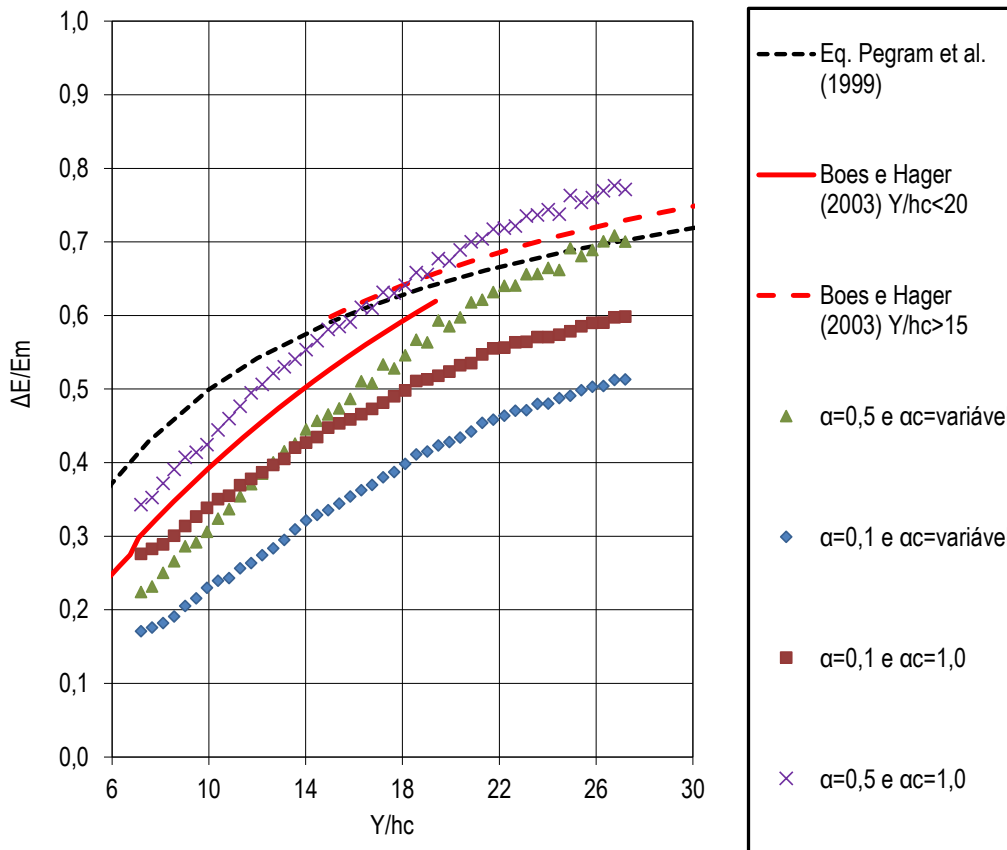


Figura 5.12. Resultados numéricos obtidos no presente estudo de dissipação de energia em relação à energia de montante para $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ na região aerada, comparados com os dados e proposições de outros pesquisadores. Na legenda, “ α ” refere-se à fração de água e “ α_c ” ao coeficiente de Coriolis.

Na região aerada, as diferenças encontradas entre os valores de dissipação de energia são maiores, explicadas parcialmente pela consideração do coeficiente de Coriolis igual à unidade ou variado. No entanto, nessa região, devido à maior diferença encontrada para as profundidades em função do método utilizado, esta variável também influencia na dissipação de energia. Com o objetivo de auxiliar a interpretação da Figura 5.12, a Figura 5.13 apresenta os valores de dissipação de energia adimensionalizados ao longo dos degraus de 11 a 50, para uma vazão específica $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, e a Figura 5.14 apresenta os valores de coeficientes de Coriolis, para vazões específicas $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, sendo insignificante a diferença entre os valores entre os dois cenários com coeficientes variáveis.

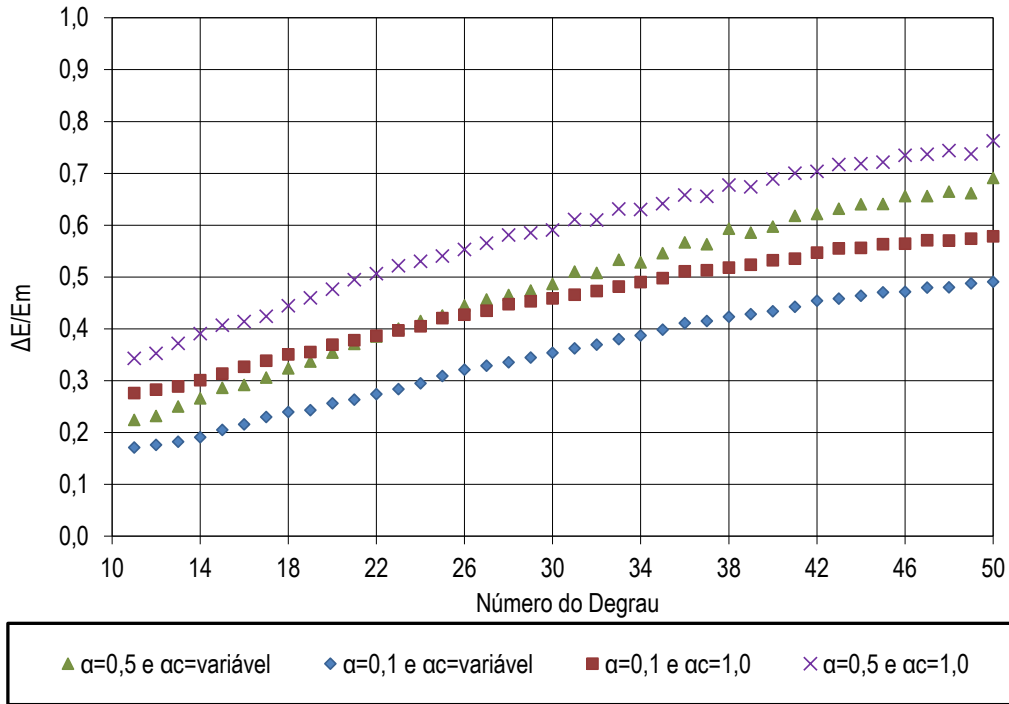


Figura 5.13. Valores de dissipação de energia adimensionalizada ($\Delta E/E_m$) para a região aerada com $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

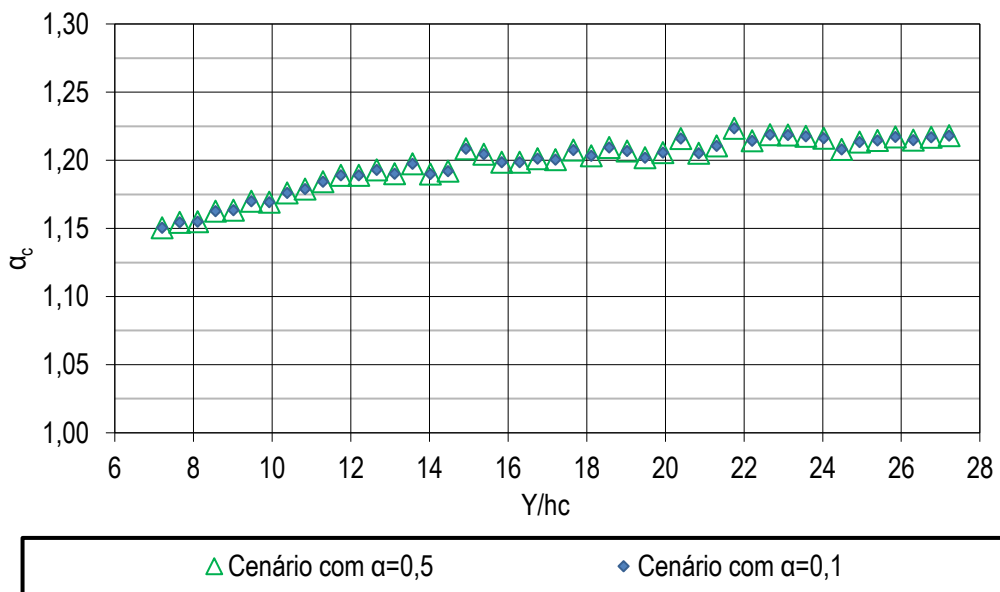


Figura 5.14. Valores de coeficiente de Coriolis para os dois cenários onde estes valores são variáveis ($q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s/m}$).

As menores dissipações de energia foram calculadas considerando-se $\alpha = 0,1$ (o que equivale a considerar a profundidade com concentração de ar $C = 0,9$, ou seja a profundidade característica h_{90}). No cálculo da energia a jusante (E_j), o valor da

profundidade influencia três variáveis: a velocidade média devido à definição da área da seção molhada (Equação 5.1), o coeficiente de Coriolis que é influenciado pela velocidade média (Equação 5.9) e a própria energia a jusante (Equação 5.8).

Comparando-se os resultados dos 04 cenários apresentados, observa-se que são calculadas maiores dissipações de energia ao se considerar uma profundidade característica menor ($\alpha = 0,5$) e ao se considerar o coeficiente de Coriolis constante $\alpha_c = 1,0$. Esse resultado não é intuitivo, uma vez que ao se considerar uma vazão específica constante, menores valores de profundidade deveriam resultar maiores energias cinéticas. Nesse sentido, tendo-se valores de concentração de ar disponíveis, é interessante a metodologia aplicada em Boes e Hager (2003a) e em Frizell e Frizell (2015) que considera profundidade equivalente à água limpa (d) ao invés de uma profundidade medida diretamente no escoamento para o cálculo da energia a jusante, eliminando-se uma das incertezas analisadas no presente trabalho. No entanto, neste artigo, conforme objetivos e justificativas metodológicas apresentadas, foram considerados os perfis de velocidade para o cálculo da energia cinética (equações 5.1 e 5.9), de forma que quanto maior é a profundidade considerada, maior é a velocidade média e, conseqüentemente, maior é a energia a jusante e menor é a dissipação de energia até o ponto analisado.

Ao se considerar no cálculo da dissipação de energia via CFD profundidades maiores ($\alpha < 0,5$) e o fator de correção da energia cinética ($\alpha_c > 1,0$), as dissipações de energia calculados reduzem para uma mesma posição. As diferenças encontradas para as dissipações de energia adimensionalizadas ($\Delta E/E_m$) são maiores para as regiões mais distantes do início da calha, chegando a valores da ordem de 25 – 30%.

Esses resultados indicam que é importante considerar nos estudos de dissipação de energia em vertedouros em degraus o fator de correção da energia cinética, reduzindo o risco de superestimar a dissipação de energia, o que implicaria na redução da segurança nas obras a jusante da calha em degraus. Além disso, os resultados de dissipação de energia se mostraram sensíveis ao método utilizado para definir a profundidade, demonstrando a importância, em estudos de dissipação de energia, de que profundidades sejam medidas diretamente na calha em degraus, e não obtidas por via indireta, a partir da medição da profundidade lenta ao fim do ressalto hidráulico, o que agrega maiores incertezas aos valores obtidos.

Nesse estudo, foram obtidos valores de energia (E_j) em todos os degraus, com três simulações com vazões distintas (0,15, 0,30 e 0,45 m³/s/m). Ao adimensionalizar estes

resultados com Y/h_c nas abcissas e com $\Delta E/E_m$ nas ordenadas, verificou-se que para uma mesma posição relativa (Y/h_c) são obtidas diferentes dissipações $\Delta E/E_m$, de forma que quanto maior é a vazão específica, menor será a dissipação de energia até uma determinada posição Y/h_c . A Figura 5.15 mostra o padrão encontrado nos resultados para $\alpha = 0,5$ e coeficiente de Coriolis variado. Embora a redução da dissipação de energia relativa devido ao aumento da vazão já tenha sido comentada por outros pesquisadores (ZAMORA *et al.*, 2009), este padrão deverá ser investigado em pesquisa futura, com abordagens numéricas e experimentais.

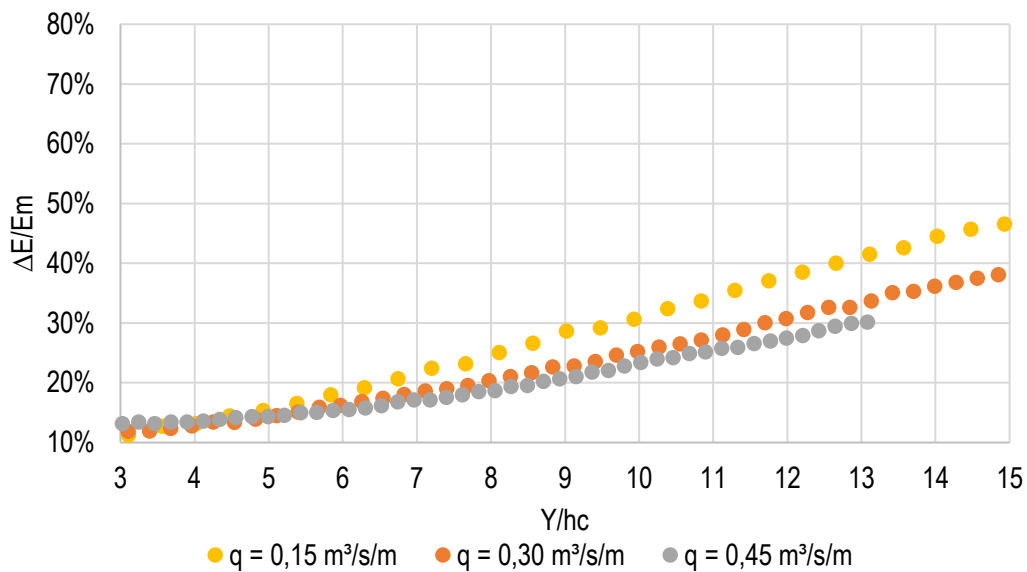


Figura 5.15. Valores de dissipação de energia adimensionalizada ($\Delta E/E_m$) ao longo da calha para as três vazões simuladas (0,15, 0,30 e 0,45 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$).

5.4.3 Avaliação da dissipação de energia para vertedouros em degraus com aeradores

Foram desenvolvidas simulações com aeração induzida por defletor para as vazões $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Conforme dados experimentais (NOVAKOSKI, 2021), para ambas as vazões, o jato resultante do defletor atinge a calha no sexto degrau.

A Figura 5.16 apresenta os valores de dissipação de energia ao longo da calha para as vazões 0,15 e 0,30 $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, a partir do degrau 7, considerando-se aeração natural e aeração induzida. Os resultados consideram coeficiente de Coriolis variado e fração de água $\alpha = 0,5$, que se configura como um cenário intermediário em termos de dissipação

de energia, com valores próximos àqueles obtidos através das equações de Boes e Hager (2003a), conforme Figura 5.12.

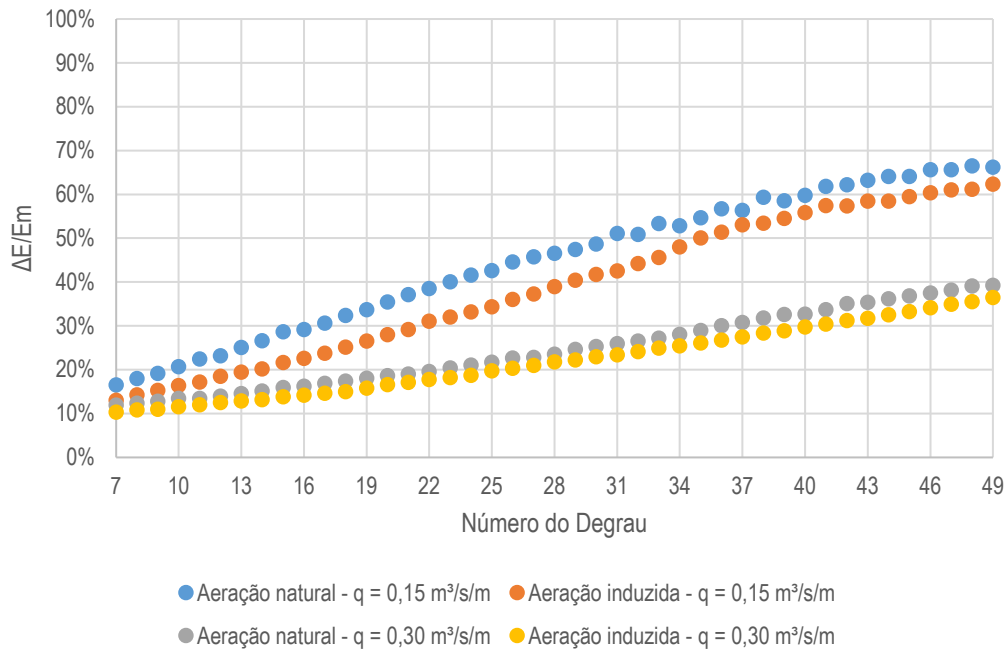


Figura 5.16. Valores de dissipação de energia adimensionalizada ($\Delta E/E_m$) ao longo da calha para as vazões 0,15 e 0,30 $m^3/s/m$ com aeriação natural e aeriação induzida por defletor conjugado a uma câmara de fornecimento de ar.

Para a vazão $q = 0,30 m^3/s/m$, a diferença observada na dissipação de energia é praticamente desprezível, enquanto a diferença observada nos resultados numéricos para $q = 0,15 m^3/s$ é pequena, com valor médio da ordem de 5-6%. Esse resultado vem ao encontro do que foi observado em Novakoski (2021) e em Zamora et al. (2008), que observaram valores muito semelhantes de dissipação de energia com e sem aerador. Assim, o projeto de bacias de dissipação de energia acaba não sendo alterado ao se considerar ou não um aerador.

5.4.4 Avaliação dos efeitos das incertezas na dissipação de energia no dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico: estudo de caso

Conforme demonstrado nos itens anteriores, há incertezas em estudos de dissipação de energia. Nesse artigo, tais incertezas foram investigadas com CFD.

A Tabela 5.2 apresenta o cálculo do comprimento necessário para uma bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico (Equação 5.11) considerando-se os valores de dissipação de energia calculados para os 04 cenários, apresentados na Figura 5.12. Esta análise foi efetuada em escala de protótipo, com as variáveis de entrada apresentadas na metodologia (item 5.2.5): para uma vazão de projeto $Q = 440 \text{ m}^3/\text{s}$ e calha com largura igual a 50 m, chega-se a uma vazão específica $q = 8,8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e profundidade crítica $h_c = 1,99 \text{ m}$; a altura máxima entre a crista do vertedouro e a chegada na bacia de dissipação foi considerada $Y = 43,8 \text{ m}$, e; por simplificação, considerou-se que em todos casos o nível de água a jusante coincide com a profundidade conjugada lenta (h_2), calculada através da Equação de Bèlanger.

Tabela 5.2. Estimativa dos comprimentos de bacia de dissipação de energia considerando-se valores de dissipação de energia obtidos nos 04 cenários analisados.

Cenário	Y/h_c	$\Delta E/E_m$	E_m	E_j	h_1	$\alpha_{c,1}$	V_1	Fr_1	h_2	$L_{CPm\acute{a}x}$	L_j
			[m]	[m]	[m]		[m/s]		[m]	[m]	[m]
Fonte da informação:	Figura 5.11	Eq. 5.7	Eq. 5.10	Eq. 5.8	Figura 5.14				Eq. 5.12	Eq. 5.11	
[i] $\alpha=0,5$; $\alpha_c=var.$	22,0	0,63	46,79	17,31	0,53	1,22	16,52	7,23	5,19	8,15	39,57
[ii] $\alpha=0,1$; $\alpha_c=var.$	22,0	0,46	46,79	25,27	0,44	1,22	20,04	9,66	5,78	9,35	45,43
[iii] $\alpha=0,5$; $\alpha_c=1,0$	22,0	0,72	46,79	13,10	0,56	1,00	15,82	6,77	5,06	7,88	38,27
[iv] $\alpha=0,1$; $\alpha_c=1,0$	22,0	0,56	46,79	20,59	0,44	1,00	19,96	9,60	5,77	9,33	45,30
Valor médio		0,59	46,79	19,07	0,49		18,09	8,32	5,45	8,68	42,14
Valor máximo		0,72	46,79	25,27	0,56		20,04	9,66	5,78	9,35	45,43
Valor mínimo		0,46	46,79	13,10	0,44		15,82	6,77	5,06	7,88	38,27

Os comprimentos necessários a uma bacia de dissipação de energia para este caso variaram de 38,3 a 45,4 m, com valor médio igual a 42,1 m. Em relação ao valor médio, houve uma variação de -9,2% a +7,8%. Ao analisar a posição de maior flutuação de pressão em uma bacia de dissipação de energia, observa-se uma diferença de 1,47 m entre

o valor máximo e o valor mínimo. As diferenças encontradas nesses comprimentos e posições são relativamente pequenas e possivelmente não representam perigo à obra.

As diferenças encontradas que são mais significativas para as estruturas hidráulicas são a velocidade na chegada da bacia de dissipação, que apresentou uma variação de 15,8 a 20,0 m/s, e a profundidade conjugada lenta, que variou entre 5,06 e 5,78 m.

A profundidade conjugada lenta é utilizada para definir a altura dos muros laterais da bacia e a cota de instalação da laje da estrutura. Além disso, é usual considerar em projetos de bacias de dissipação uma folga mínima de 5% na relação entre a profundidade no rio (T_w) e a profundidade conjugada lenta (USBR, 1987). Aplicando-se esta folga ao valor médio calculado, resulta $0,05 \times 5,45\text{m} = 0,27\text{ m}$, ou seja, um possível erro da ordem de 0,70 m na altura conjugada lenta, que é igual à diferença entre os valores encontrados na Tabela 5.2, poderia implicar na saída do ressalto hidráulico para fora da bacia de dissipação.

Enfim, o impacto das incertezas na dissipação de energia ao longo do vertedouro em degraus no dimensionamento da bacia de dissipação foi menor do que inicialmente imaginado em termos da definição da geometria da estrutura, uma vez que foram consideradas diferenças de até 26% na dissipação de energia relativa. No entanto, deve haver cuidado no cálculo das velocidades e na definição da cota de instalação da laje da bacia de dissipação, sendo recomendado realizar uma análise de sensibilidade no dimensionamento da estrutura a partir da variação nos valores de dissipação de energia. Os resultados e análises apresentados neste item referem-se ao caso descrito, não devendo ser generalizados para qualquer caso.

5.5 Conclusões

Nesse trabalho, buscou-se investigar a dissipação de energia ao longo da calha em degraus com CFD, buscando-se compreender os possíveis impactos no dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico devido a simplificações metodológicas em estudos experimentais de dissipação de energia nos vertedouros em degraus. Além disso, as ferramentas de CFD foram utilizadas para analisar as alterações na dissipação de energia ao inserir mais ar ao escoamento deslizante sobre turbilhões a partir do uso de defletor com câmara de entrada de ar.

Para o estudo da dissipação de energia, foi necessário estabelecer uma metodologia para definir a superfície livre do escoamento. O critério usualmente adotado em estudos com CFD para definir a superfície livre é considerá-la como a profundidade onde há o equilíbrio entre ar e água ($\alpha = 0,5$) (ALBADAWI *et al.*, 2013; DANESHFARAZ *et al.*, 2016; TORO *et al.*, 2016). Nesse estudo, de forma semelhante ao que foi feito em Lopes, Leandro e Carvalho (2018), foram definidos diferentes valores de fração de água (α) para a região não aerada e para a região aerada, com base nos valores observados de profundidade de Sanagiotto e Marques (2008). Os valores que melhores se ajustaram aos dados experimentais foram $\alpha = 0,3$ para a região não aerada e $\alpha = 0,1$ para a região aerada, corroborando com resultados apresentados em Tassinari *et al.* (2020), que utilizaram um modelo multifásico diferente daquele utilizado neste trabalho.

A validação do modelo computacional foi desenvolvida comparando-se dados de pressão obtidos ao longo da calha, nos patamares, com dados de pressão obtidos experimentalmente e apresentados em Matos *et al.* (2022). Além disso, os perfis de concentração de ar obtidos numericamente foram comparados com perfis teóricos obtidos com um modelo de difusão apresentado em Chanson, Yasuda e Ohtsu (2002).

Os valores obtidos para a dissipação de energia relativa ($\Delta E/E_m$) para os 04 cenários analisados, onde foram consideradas diferentes alternativas para a definição da superfície livre e correção da energia cinética, apresentaram comportamento semelhante ao apresentado por outros autores (BOES; HAGER, 2003a; PEGRAM; OFFICER; MOTTRAM, 1999). No entanto, foram encontradas diferenças significativas de dissipação de energia para uma mesma posição relativa (Y/h_c), sendo maiores estas diferenças para maiores valores de Y/h_c . Esses resultados indicam que é importante considerar nos estudos de dissipação de energia em vertedouros em degraus o fator de correção da energia cinética, reduzindo o risco de superestimar a dissipação de energia, o

que poderia implicar na redução da segurança nas obras a jusante da calha em degraus. Além disso, os resultados de dissipação de energia se mostraram sensíveis ao método utilizado para definir a profundidade, demonstrando a importância, em estudos de dissipação de energia, de que profundidades sejam medidas diretamente na calha em degraus, e não obtidas por via indireta, a partir da medição da profundidade lenta ao fim do ressalto hidráulico, o que agrega maiores incertezas aos valores obtidos. Havendo a possibilidade de desenvolver medidas de concentração de ar, sugere-se que a energia a jusante seja calculada considerando-se a profundidade equivalente de água (d) ao invés da profundidade do escoamento bifásico, eliminando-se uma das incertezas analisadas neste artigo.

Ao analisar a dissipação de energia em um modelo com um defletor e câmara de ar no primeiro degrau e comparar com os resultados obtidos com aeração natural, as diferenças encontradas são praticamente nulas para uma vazão $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e pequenas (da ordem de 5 – 6%) para $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Dessa forma, projetos de bacias de dissipação de energia não devem ser alterados devido à presença de um aerador, corroborando com os resultados experimentais de Novakoski (2021) e de Zamora et al. (2008).

Por mais que tenham sido encontradas diferenças significativas para os valores de dissipação de energia relativa ao longo da calha em degraus com aeração natural em função da metodologia adotada, em um estudo de caso de um vertedouro com altura total igual a 43,8 m e vazão específica $q = 8,8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, tais diferenças não resultaram impactos significativos no dimensionamento da bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico. As diferenças calculadas para o comprimento necessário à bacia e posição de maior flutuação de pressão foram consideradas pequenas. Assim, julgou-se mais significativo, em termos de projeto de obras hidráulicas, as diferenças encontradas para as velocidades e profundidades no final do ressalto, recomendando-se, com isso, que seja realizada uma análise de sensibilidade no dimensionamento dessas estruturas a partir da variação nos valores de dissipação de energia.

Comenta-se que não foi definida uma cota fixa para o nível de água a jusante da bacia de dissipação e, conseqüentemente, não se analisou a variação necessária à cota de escavação da estrutura. Contudo, essa diferença é equivalente às diferenças observadas para os valores de profundidade lenta ao final do ressalto hidráulico.

Este artigo não tem como objetivo sugerir a utilização de valores de dissipação de energia obtidos via CFD ao invés de valores apresentados na literatura, ou obtidos em

modelos físicos. Este artigo busca apresentar possíveis efeitos decorrentes de simplificações em estudos experimentais, que podem ser consideradas em estudos e projetos dessas estruturas, buscando-se aumentar a segurança dessas obras.

References

ALBADAWI, A. *et al.* Influence of surface tension implementation in Volume of Fluid and coupled Volume of Fluid with Level Set methods for bubble growth and detachment. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 53, p. 11–28, 2013.

ALWON, J. van *et al.* Experimental and numerical modelling of aerated flows over stepped spillways. *In:* , 2017, Kuala Lumpur, Malaysia. **International 37th IAHR World Congress**. Kuala Lumpur, Malaysia: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2017. p. 12. Disponível em: <http://eprints.whiterose.ac.uk/122417/>.

ALWON, J. C. van. **Numerical and Physical Modelling of Aerated Skimming Flows over Stepped Spillways**. 2019. 1–398 f. PhD thesis, Leeds, UK, 2019.

ALWON, J. van *et al.* Prediction of air entrainment in skimming flow over stepped spillways using numerical methods. *In:* , 2019, Panama City, Panama. **International 38th IAHR World Congress**. Panama City, Panama: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2019. p. 11.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Characterization of the nonaerated flow region in a stepped spillway by PIV. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 128, n. 6, p. 1266–1273, 2006.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 135, n. 12, p. 1092–1100, 2009.

ANSYS INC. **ANSYS Fluent User's Guide**. Versão 15.0. Canonsburg, PA: [s. n.], 2013.

ARANTES, E. J. **Caracterização do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus via CFD**. 2007. 204 f. PhD Thesis. São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2007.

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Reply to discussion by Chanson and Lubin on “verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air

entrainment at spillway aerators.” **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 37, p. 139–142, 2010.

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 826–836, 2009.

BAI, Z. L.; PENG, Y.; ZHANG, J. M. Three-Dimensional Turbulence Simulation of Flow in a V-Shaped Stepped Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 9, p. 1–10, 2017.

BAYON, A. *et al.* 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**, [s. l.], v. 19, p. 137–149, 2018.

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Hydraulic Design of Stepped Spillways. **J. Hydraul. Eng.**, [s. l.], v. 129, n. 9, p. 671–679, 2003a.

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. **J. Hydraul. Eng.**, [s. l.], v. 129, n. 9, p. 661–670, 2003b.

BOMBARDELLI, F. A.; MEIRELES, I.; MATOS, J. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 263–288, 2011.

BUNG, D. B. Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 639–648, 2011.

BUNG, D. B. Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 322–329, 2013.

CANELLAS, A. V. B. **Pressões Extremas Atuantes nas Proximidades das Quinas dos Degraus de Vertedouros**. 2020. 1–189 f. PhD thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2020.

CELIK, I. B. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 130, n. 7, p. 0780011–078001, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications**. 1. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2006.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 4, p. 361–368, 1999.

CHANSON, H. **Hydraulic Design of Stepped Cascade, Channels, Weirs and Spillways**. Oxford, England: Elsevier Science Ltd, 1994a.

CHANSON, H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 445–460, 1994b.

CHANSON, H. Stepped spillway flows and air entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 422–435, 1993.

CHANSON, H.; BUNG, D. B.; MATOS, J. Stepped spillways and cascades. *In*: CHANSON, H. (org.). **Energy Dissipation in Hydraulic Structures**. IAHR Monographed. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2015. p. 45–64. *E-book*. Disponível em: www.iahr.org.

CHANSON, H.; TOOMBES, L. Air-water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 28, p. 1737–1761, 2002. Disponível em: [http://www.uq.edu.au/\\$e2hchans](http://www.uq.edu.au/$e2hchans).

CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. Flow Resistance in Skimming Flows and its Modelling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 809–819, 2002.

CHOW, V. te. **Open-channel hydraulics**. Caldwell, New Jersey : The Blackburn Press, 1959.

CONCEIÇÃO, M. P. da S.; FONTES, A. S. Risco Hidrológico Associado a Precipitação Máxima Provável em Barragens do Semiárido Baiano. *In*: , 2019, Foz do Iguaçu - Brazil. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu - Brazil: ABRHidro, 2019. p. 1–10.

CONSÓRCIO HIDROCONSULT - MWH BRASIL. **Relatório do Projeto Executivo dos Segmentos de Canais do PISF - Volume 2**. [S. l.: s. n.], 2012.

CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; ALVES, A. A. M. Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 131–137, 2015.

DAI PRÁ, M. *et al.* Um Estudo sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. **Revista Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 17–28, 2012.

DANESHFARAZ, R. *et al.* Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. **Advances and Applications in Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 805–822, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17654/FM019040805>.

EGHBALZADEH, A.; JAVAN, M. Comparison of Mixture and VOF models for numerical simulation of Air-Entrainment in skimming flow over stepped spillways. *In:* , 2012. **Procedia Engineering**. [S. l.: s. n.], 2012. p. 657–660.

FALVEY, H. T. **Cavitation in Chutes and Spillways - Engineering Monograph N° 42**. Denver, CO: [s. n.], 1990.

FELDER, S.; CHANSON, H. Energy Dissipation down a Stepped Spillway with Nonuniform Step Heights. **J. Hydraulic Eng.**, [s. l.], v. 137, n. 11, p. 1543–1548, 2011.

FELDER, S.; CHANSON, H. Scale effects in microscopic air-water flow properties in high-velocity free-surface flows. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [s. l.], v. 83, p. 19–36, 2017.

FELDER, S.; CHANSON, H. Turbulence, dynamic similarity and scale effects in high-velocity free-surface flows above a stepped chute. **Experiments in Fluids**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 1–18, 2009.

FERLA, R. *et al.* Stepped spillways with aerators: Hydrodynamic pressures and air entrainment. **Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 26, n. e04, p. 1–12, 2021.

FRIZELL, K. H. **Research State-of-the-Art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways - Hydraulic Laboratory Report HL-2005-06**. Denver, CO: [s. n.], 2006. Disponível em: <http://www.ntis.gov>.

FRIZELL, K. W.; FRIZELL, K. H. **Guidelines for Hydraulic Design of Stepped Spillways. Hydraulic Laboratory Report HL-2015-06**. Denver, CO: [s. n.], 2015.

FRIZELL, K. W.; RENNA, F. M.; MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 139, n. 6, p. 630–636, 2013.

FUHRHOP, H.; SCHULZ, H. E.; WITTENBERG, H. Solution for Spillway Chute Aeration Through Bottom Aerators. **Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas.**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 298–312, 2014.

GOMES, J. F. **Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros**. 2006. PhD Thesis. Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2006.

HUNT, S. L.; KADAVY, K. C. Types I, II, III and IV Stilling Basin Performance for Stepped Chutes Applied to Embankment Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 147, n. 6, p. 1–10, 2021.

KELLS, J. A.; SMITH, C. D. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. **Canadian Journal of Civil Eng.**, [s. l.], v. 18, p. 358–377, 1991. Disponível em: www.nrcresearchpress.com.

KOEN, J.; BOSMAN, D. E.; BASSON, G. R. Artificial aeration of stepped spillways by crest piers and flares for the mitigation of cavitation damage. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 28–38, 2019.

KÖKPINAR, M. A.; GÖĞÜŞ, M. High-speed jet flows over spillway aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 885–898, 2002.

KOSITGITTIWONG, D.; CHINNARASRI, C.; JULIEN, P. Y. Numerical simulation of flow velocity profiles along a stepped spillway. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 227, n. 4, p. 327–335, 2013.

LI, S.; ZHANG, J.; XU, W. Numerical investigation of air–water flow properties over steep flat and pooled stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 1–14, 2018.

LOPES, P.; LEANDRO, J.; CARVALHO, R. F. Numerical procedure for free-surface detection using a Volume-of-Fluid model. **Journal of Hydro-Environment Research**, [s. l.], v. 21, p. 43–51, 2018.

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.

MATOS, J. S. G. **Arejamento como Medida de Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas**. 1990. Master thesis, Lisboa, Portugal (in Portuguese), 1990.

MATOS, J. S. G. **Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus**. 1999. PhD thesis, Lisboa, Portugal (in Portuguese), 1999.

MATOS, J. *et al.* Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 3, 2022.

MEIRELES, I. O. de C. **Hydraulics of stepped chutes experimental-numerical-theoretical study**. 2011. 293 f. PhD thesis. Aveiro, Portugal, 2011.

MEIRELES, I. *et al.* Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 138, n. 10, p. 870–877, 2012.

MEIRELES, I. C.; BOMBARDELLI, F. A.; MATOS, J. Air entrainment onset in skimming flows on steep stepped spillways: An analysis. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 375–385, 2014.

NEVES, Y. T.; RODRIGUES, A. B.; CABRAL, J. J. da S. P. Modelagem computacional do rompimento hipotético da barragem de Jucazinho no estado de Pernambuco (Brasil). **Revista DAE**, [s. l.], v. 69, n. 230, p. 167–182, 2021.

NOVAKOSKI, C. K. **Análise da Macroturbulência do escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Aeração Induzida por Defletor e Câmara de Ar**. 2021. 1–221 f. PhD thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2021.

NOVAKOSKI, C. K. *et al.* Induced aeration flow over stepped spillways: Mean pressures, air entrainment and flow behavior. **Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 26, n. e34, p. 1–13, 2021.

NOVAKOSKI, C. K. *et al.* Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 22, n. e42, p. 1–8, 2017a.

NOVAKOSKI, C. K. *et al.* Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 22, n. e22, p. 1–8, 2017b.

PEGRAM, G. G. S.; OFFICER, A. K.; MOTTRAM, S. R. Hydraulics of Skimming Flow on Modeled Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 5, p. 500–510, 1999.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 6, p. 352–359, 2010a.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. II: Hydraulic Design. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 136, p. 360–367, 2010b.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. History and Significance of the Morton Number in Hydraulic Engineering. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 140, n. 5, p. 02514001, 2014.

PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H.-E. Bottom Aeration of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 132, n. 8, p. 850–853, 2006.

POVH, P. H. *et al.* Início da Aeração e Pressões ao Longo de Vertedouros em Degraus. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 97–111, 2004.

PRIEBE, P. D. S. *et al.* Influence of aeration induced by piers on the starting position of the flow aeration and extreme pressures in stepped spillways. **Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 26, n. e13, p. 1–10, 2021.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. **Journal of Fluids Engineering (ASME)**, [s. l.], v. 116, p. 405–413, 1994. Disponível em: <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/>.

RUFF, J. F.; WARD, J. P. **Hydraulic Design of Stepped Spillways**. Denver, Colorado: [s. n.], 2002.

SANAGIOTTO, D. G. **Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. 2003. 137 f. Master Phesis. Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2003.

SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 17–31, 2008.

SANEAMENTO DE GOIÁS - SANEAGO. **Barragem Ribeirão João Leite - RT-008 - Dimensionamento Hidráulico**. Goiânia, Brazil: [s. n.], 2000.

SCHULZ, H. E. *et al.* Details of Hydraulic Jumps for Design Criteria of Hydraulic Structures. *In*: SCHULZ, H. E. (org.). **Hydrodynamics - Concepts and Experiments**. London, UK: IntechOpen, 2015. p. 1–44. *E-book*. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/4498>. Acesso at: 8 Feb. 2022.

SIMÕES, A. L. A. **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus. Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento**. 2008. 1–286 f. Master thesis, São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2008.

SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. de M. Stepped and smooth spillways: Resistance effects on stilling basin lengths. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 329–337, 2010.

STEPHENSON, D. Energy dissipation down Stepped Spillways. **Water Power & Dam Construction**, [s. l.], v. 43, n. 9, p. 27–30, 1991.

TABARI, M. M. R.; TAVAKOLI, S. Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 1215–1224, 2016.

TASSINARI, L. C. da S. *et al.* Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 25, n. e3, p. 1–17, 2020.

TENG, P.; YANG, J. CFD modeling of two-phase flow of a spillway chute aerator of large width. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 163–177, 2016.

TERRIER, S. **Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features**. 2016. 1–339 f. PhD thesis, Lausanne, Switzerland, 2016.

TERRIER, S.; PFISTER, M.; SCHLEISS, A. J. Comparison of Chute Aerator Effect on Stepped and Smooth Spillways. *In:* , 2015, The Hague, The Netherlands. **36th IAHR World Congress**. The Hague, The Netherlands: IAHR, 2015. p. 1–5.

TORO, J. P. *et al.* Characterization of turbulence statistics on the non-aerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 1195–1221, 2016.

TOZZI, M. J. **Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus**. 1992. PhD Thesis. São Paulo, Brazil. (in Portuguese), 1992.

TOZZI, M. Vertedouros em Degraus. *In:* CARVALHO, E. (org.). **Grandes Vertedouros Brasileiros**. [S. l.]: CBDB/ICOLD, 2010. p. 197–203.

TRACTEBEL ENGINEERING. **Relatório do Projeto - 2ª Etapa**. Florianópolis, Brazil: [s. n.], 2020.

USBR. **Design of Small Dams**. 3. ed. [S. l.]: USBR - U. S. Bureau of Reclamation, 1987. v. 3

VOLKART, P. **Air Slots for Flow Aeration Determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway - Mitteilungen Nr. 66**. Zürich, Switzerland: [s. n.], 1983.

WOOD, I. R.; ACKERS, P.; LOVELESS, J. General Method for Critical Point on Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 109, n. 2, p. 308–312, 1983.

YANG, J.; TENG, P.; ZHANG, H. Experiments and CFD modeling of high-velocity two-phase flows in a large chute aerator facility. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 48–66, 2019.

ZAMORA, S. *et al.* Closure to “Hydraulic Performance of Step-Aerator” by Anina Schiess Zamora, Michael Pfister, Willi H. Hager, and Hans-Erwin Minor. **J. Hydraul. Eng.**, [*s. l.*], v. 134, n. 2, p. 135, 2009.

ZAMORA, A. S. *et al.* Hydraulic Performance of Step Aerator. **Journal of Hydraulic Engineering**, [*s. l.*], v. 134, n. 2, p. 127–134, 2008.

ZHAN, J.; ZHANG, J.; GONG, Y. Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**, [*s. l.*], v. 6, p. 139–142, 2016.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. I: Physical Modeling and Boundary Layer Development. **Journal of Hydraulic Engineering**, [*s. l.*], v. 142, n. 7, p. 04016015, 2016a.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. II: Pressure and Velocity Fields. **Journal of Hydraulic Engineering**, [*s. l.*], v. 142, n. 7, p. 04016016, 2016b.

6 CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Ao longo de muitas décadas, diversos estudos do escoamento sobre vertedouros de calha lisa e calha em degraus foram desenvolvidos com modelagem física. No entanto, essa abordagem é suscetível aos efeitos de escala, de medição e do próprio modelo ou método aplicado (HELLER, 2011), possuindo limitações relacionadas à capacidade de bombas, discretização espacial da obtenção de dados e à instrumentação e espaço laboratorial disponível. Dessa forma, a modelagem computacional surge como uma importante ferramenta de análise dos escoamentos, proporcionando maior flexibilidade para estudar estruturas hidráulicas com diferentes configurações. Contudo, a qualidade dos seus resultados é sensível ao código utilizado, calibração e validação dos resultados.

Essa tese buscou investigar os possíveis efeitos de simplificações e limitações das metodologias tradicionalmente aplicadas à modelagem física, utilizando-se, para esse fim, abordagens numéricas com CFD. Ao longo de três artigos, apresentados nos capítulos 3 a 5, foram estudadas as características do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de alta declividade, com aeração natural, onde buscou-se investigar os efeitos de medição em dados de pressão, os efeitos de escala e os efeitos de simplificações adotadas em estudos de dissipação de energia ao longo da calha em degraus no dimensionamento de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Nessa última etapa da pesquisa, estudou-se um vertedouro com aeração induzida por um defletor e câmara de entrada de ar, comparando-se os resultados obtidos com um vertedouro semelhante com aeração natural.

As conclusões obtidas ao longo do trabalho estão apresentadas a seguir.

6.1 Conclusões a respeito da adequabilidade da abordagem com CFD – RANS para o estudo de escoamento bifásico ar-água em vertedouros em degraus

No primeiro artigo e no segundo artigo, o modelo computacional foi desenvolvido no software Ansys CFX, com modelo multifásico homogêneo, equivalente ao VOF (STENMARK, 2013), modelo de superfície livre na interface entre fases e modelo de turbulência $k-\epsilon$.

Considerou-se que o modelo computacional conseguiu reproduzir adequadamente as pressões médias obtidas experimentalmente em Conterato, Marques e Alves (2015) para as regiões próximas às quinas dos degraus. Algumas diferenças observadas entre os

resultados numéricos e os dados experimentais podem ser explicadas devido às incertezas nas posições dos medidores de pressão dentro dos degraus, conforme discutidos em Tassinari et al. (2020). Esse modelo também foi validado comparando-se os perfis de velocidade obtidos a partir das quinas dos degraus e perpendiculares ao pseudofundo com ajustes a leis de potência apresentados na literatura (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; BOES; HAGER, 2003a; CHANSON, 1994a; MEIRELES *et al.*, 2012; TOZZI, 1992; ZHANG; CHANSON, 2016b).

No terceiro artigo, o modelo computacional foi desenvolvido no software Ansys Fluent, com modelo multifásico Euleriano, onde as equações da continuidade e da conservação de quantidade de movimento são calculadas separadamente, para cada fase ar-água (ALWON *et al.*, 2017, 2019; ALWON, 2019), com interação entre fases através do modelo Symmetric. O modelo de turbulência adotado foi o SST k- ω .

A validação do modelo computacional foi desenvolvida comparando-se dados de pressão obtidos ao longo da calha, nos patamares, com dados de pressão obtidos experimentalmente e apresentados em Canellas (2020) e comparando-se os perfis de concentração de ar obtidos numericamente com perfis teóricos obtidos com um modelo de difusão apresentado em Chanson, Yasuda e Ohtsu (2002).

Para o objetivo de melhor representar velocidades e pressões ao longo da calha em degraus, os resultados obtidos não permitem inferir que um modelo é superior ao outro. Ambos os modelos Ansys CFX com modelo multifásico VOF e o Ansys Fluent com modelo Euleriano possuem um histórico de aplicação de sucesso e foram validados nesta pesquisa. No entanto, o modelo desenvolvido no Ansys Fluent (apresentado no capítulo 5) apresentou resultados em relação às concentrações de ar nos perfis desenvolvidos a partir das quinas dos degraus mais coerentes com o que se espera a partir da revisão bibliográfica desenvolvida.

Nesse sentido, mesmo com as simplificações intrínsecas à técnica de modelagem RANS, quando comparada com DNS, considerou-se que modelos desenvolvidos com CFD – RANS são adequados ao estudo de vertedouros em degraus, desde que alicerçados em validações coerentes com os objetivos dos estudos. Nesse sentido, é importante que estudos relacionados à hidrodinâmica de estruturas hidráulicas sejam desenvolvidos com modelagem experimental e computacional de forma integrada.

6.2 Conclusões a respeito da determinação da superfície livre

Usualmente, em estudos com CFD, a superfície livre é determinada como o local onde há equilíbrio entre ar e água, considerando-se, portanto, as profundidades com fração de água igual a $\alpha = 0,50$ (ALBADAWI et al., 2013; BOMBARDELLI; MEIRELES; MATOS, 2011; DANESHFARAZ et al., 2016; TORO et al., 2016). Assim, semelhante ao que foi apresentado em Lopes, Leandro e Carvalho (2018), dados experimentais de profundidades (SANAGIOTTO; MARQUES, 2008) foram utilizados para definir quais as frações de água melhor representam a superfície livre observada para as regiões aerada e não aerada do escoamento deslizante sobre turbilhões.

Em Tassinari et al. (2020, capítulo 3), os valores que melhor se ajustaram às profundidades observadas experimentalmente foram $\alpha = 0,30$ para a região não aerada e $\alpha = 0,10$ para a região aerada.

Como há relatos na literatura (ALWON *et al.*, 2017, 2019; ALWON, 2019) de que modelos homogêneos não conseguem representar corretamente a entrada de ar no escoamento deslizante sobre turbilhões, no estudo de dissipação de energia (capítulo 5) foi desenvolvida novamente essa análise para determinar a superfície livre, mas com um modelo multifásico Euleriano. Nessa análise, os valores sugeridos em Tassinari et al. (2020) foram confirmados. Ressalta-se que os valores de fração de água $\alpha = 0,30$ e $\alpha = 0,10$ são sugeridos para definir a superfície livre nas regiões não aerada e aerada, respectivamente, para o caso de escoamento do tipo deslizante sobre turbilhões em um vertedouro em degraus com declividade 1V:0,75H, apenas. Como não foram analisados degraus com alturas diferentes de 0,06 m, recomenda-se que estes valores sejam utilizados com parcimônia para degraus com diferentes alturas.

6.3 Conclusões a respeito dos efeitos de medição em dados de pressão

A partir de uma análise dos resultados numéricos, determinou-se que é importante que transdutores e piezômetros sejam instalados na região $0,81 < x/l < 0,98$ nos patamares e $0,93 < y/h < 0,98$ nos espelhos dos degraus, buscando-se capturar as máximas e mínimas pressões, respectivamente, que podem ocorrer. Esse resultado é válido para estudos experimentais em vertedouros com declividade 1V:0,75H e degraus com altura igual a 6 cm. Se esse critério for respeitado, as incertezas devido à posição dos instrumentos não irão resultar diferenças significativas nos valores de pressão extrema $P_{0.1\%}$ e $P_{99.9\%}$.

6.4 Conclusões a respeito do estudo de efeitos de escala com CFD

Nesse trabalho, buscou-se investigar os efeitos de escala com CFD, utilizando-se fluidos hipotéticos, com características que conjuntamente constituem fluidos que não são encontrados na natureza.

Os resultados obtidos para o escoamento deslizante sobre turbilhões, com uma vazão em escala de protótipo de $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, mostraram que os efeitos de escala que surgem em modelos experimentais podem resultar diferenças de pressões médias consideráveis. No entanto, os dados de pressão média obtidos em modelos reduzidos podem ser utilizados em projetos de engenharia dessas estruturas, uma vez que estes valores se mostraram mais severos nos modelos reduzidos do que no protótipo, semelhante ao observado por Teixeira et al. (2012) em um estudo de efeito de escala em ressalto hidráulico.

Ao considerar os fluidos hipotéticos, chegou-se a diferenças absolutas menores, o que mostra que a alteração nas características dos fluidos para se ter semelhança em outras forças além da gravitacional possui grande potencial, na modelagem computacional, resultando valores mais próximos daqueles obtidos ao simular o protótipo, mesmo que os fluidos hipotéticos considerados não existam na natureza. Aparentemente, esta metodologia possui potencial de ser aplicada em estudos de efeitos de escala de diferentes estruturas hidráulicas, buscando-se compreender a significância de simplificações necessárias à modelagem física e cuidados necessários à interpretação de dados experimentais.

6.5 Conclusões a respeito da dissipação de energia em vertedouros com aeração induzida por defletor e câmara de entrada de ar

Ao analisar a dissipação de energia em um modelo com um defletor e câmara de ar no primeiro degrau e comparar com os resultados obtidos com aeração natural, as diferenças encontradas são praticamente nulas para uma vazão $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e pequenas (da ordem de 5 – 6%) para $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Dessa forma, projetos de vertedouros não devem ser alterados em relação à dissipação de energia devido à presença de um aerador, corroborando com os resultados experimentais de Novakoski (2021) e de Zamora et al. (2008).

6.6 Conclusões a respeito dos possíveis impactos no dimensionamento de bacias de dissipação de energia por ressalto hidráulico devido às simplificações utilizadas nos estudos experimentais de dissipação de energia

Os resultados de dissipação de energia relativa ao longo da calha indicam que é importante considerar nos estudos de dissipação de energia em vertedouros em degraus o fator de correção da energia cinética, reduzindo o risco de superestimar a dissipação de energia, o que poderia implicar na redução da segurança nas obras a jusante da calha em degraus. Além disso, os resultados de dissipação de energia se mostraram sensíveis ao método utilizado para definir a profundidade, demonstrando a importância, em estudos de dissipação de energia, de que profundidades sejam medidas diretamente na calha em degraus, e não obtidas por via indireta, a partir da medição da profundidade lenta ao fim do ressalto hidráulico, o que agrega maiores incertezas aos valores obtidos. Também, havendo a possibilidade de desenvolver medidas de concentração de ar, sugere-se que a energia a jusante seja calculada considerando-se a profundidade equivalente de água (d) ao invés da profundidade do escoamento bifásico, eliminando-se uma das incertezas analisadas neste trabalho.

Por mais que tenham sido encontradas diferenças significativas para os valores de dissipação de energia relativa ao longo da calha em degraus com aeração natural em função da metodologia adotada, em um estudo de caso de um vertedouro com altura total igual a 43,8 m e vazão específica $q = 8,8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, tais diferenças não resultaram impactos significativos no dimensionamento da bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico. As diferenças calculadas para o comprimento necessário à bacia e posição de maior flutuação de pressão foram consideradas pequenas (9,2% em relação aos valores médios). Assim, julgou-se mais significativo, em termos de projeto de obras hidráulicas, as diferenças encontradas para as velocidades e profundidades no final do ressalto, recomendando-se, com isso, que seja realizada uma análise de sensibilidade no dimensionamento dessas estruturas a partir da variação nos valores de dissipação de energia. Comenta-se que não foi definida uma cota fixa para o nível de água a jusante da bacia de dissipação e, conseqüentemente, não se analisou a variação necessária à cota de escavação da estrutura. Contudo, essa diferença é equivalente às diferenças observadas para os valores de profundidade lenta ao final do ressalto hidráulico.

6.7 Recomendações

A seguir, são apresentadas algumas recomendações para pesquisas futuras, que poderão complementar a pesquisa desenvolvida.

- As simulações desenvolvidas em Tassinari et al. (2020) consideraram apenas vertedouros com calha em degraus com declividade 1,0V:0,75H. Recomenda-se que sejam feitos estudos semelhantes para calhas com declividades 1,0V:2,0H e 1,0V:3,0H, buscando-se definir o padrão de desenvolvimento das pressões dentro dos degraus. Salienta-se que este estudo é importante para vertedouros de barragens de mineração, onde estão sendo aplicadas estruturas escalonadas menos íngremes.
- As simulações desenvolvidas nessa pesquisa foram feitas todas em regime permanente, tendo como resultados valores de pressões médias. Nesse sentido, recomenda-se que sejam desenvolvidos estudos e análises semelhantes às apresentadas em Tassinari et al. (2020) em regime transiente, buscando-se obter valores de pressões extremas com diferentes probabilidades de não excedência. Nesse caso, as flutuações de pressões poderão ser comparadas com as flutuações obtidas em estudos experimentais, buscando-se estabelecer relações. Comenta-se que, devido ao esforço computacional necessário a simulações transientes, o domínio poderá ser reduzido, buscando-se analisar separadamente regiões da calha em degraus;
- Recomenda-se que sejam desenvolvidos estudos de efeitos de escala com o auxílio de fluidos hipotéticos que proporcionem semelhança dinâmica ao escoamento, podendo-se adotar semelhança em diferentes adimensionais para a estimativa dos efeitos de cada simplificação nos resultados. Essa metodologia tem potencial para ser ampliada para outras estruturas hidráulicas, além de vertedouros em degraus. Nessas pesquisas futuras, recomenda-se que se busque a desagregação das diferenças nos resultados entre efeitos de escala, erros de malha, efeitos de modelo, entre outros.
- Recomenda-se que o estudo apresentado no Capítulo 4 desta tese seja ampliado, considerando-se, além das escalas reduzidas 1:10 e 1:100, também, escalas intermediárias 1:25 e 1:50, buscando-se definir qual é a

escala geométrica recomendada para a análise de pressões em vertedouros em degraus com declividade 1,0V:0,75H;

- Recomenda-se que seja desenvolvido um estudo experimental semelhante a Lopes, Leandro e Carvalho (2018), mas aplicado a vertedouros em degraus de alta declividade, como 1,0V:0,75H, por exemplo. De posse de medições experimentais detalhadas de profundidades relacionadas a diferentes concentrações de ar, poder-se-á determinar com melhor precisão uma metodologia para definição da superfície livre do escoamento para as diferentes regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBADAWI, A. *et al.* Influence of surface tension implementation in Volume of Fluid and coupled Volume of Fluid with Level Set methods for bubble growth and detachment. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 53, p. 11–28, 2013.

ALWON, J. van *et al.* Experimental and numerical modelling of aerated flows over stepped spillways. *In:* , 2017, Kuala Lumpur, Malaysia. **International 37th IAHR World Congress**. Kuala Lumpur, Malaysia: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2017. p. 12. Disponível em: <http://eprints.whiterose.ac.uk/122417/>.

ALWON, J. C. van. **Numerical and Physical Modelling of Aerated Skimming Flows over Stepped Spillways**. 2019. 1–398 f. PhD thesis, Leeds, UK, 2019.

ALWON, J. van *et al.* Prediction of air entrainment in skimming flow over stepped spillways using numerical methods. *In:* , 2019, Panama City, Panama. **International 38th IAHR World Congress**. Panama City, Panama: International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2019. p. 11.

AMADOR, A. T. **Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado**. 2005. 244 f. - Universitat Politècnica de Catalunya, PhD Thesis. Barcelona, Spain, 2005.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Characterization of the nonaerated flow region in a stepped spillway by PIV. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 128, n. 6, p. 1266–1273, 2006.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 135, n. 12, p. 1092–1100, 2009.

ANSYS INC. **Ansys CFX-Solver Theory Guide, Release 15.0**. Versão 15.0. Canonsburg, PA: [s. n.], 2013a.

ANSYS INC. **ANSYS Fluent User's Guide**. Versão 15.0. Canonsburg, PA: [s. n.], 2013b.

ARANTES, E. J. **Caracterização do escoamento sobre Vertedouros em Degraus via CFD**. 2007. 204 f. PhD Thesis. São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2007.

ARANTES, E. J. *et al.* Lower nappe aeration in smooth channels: experimental data and numerical simulation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 82, n. 2, p. 521–537, 2010. Disponível em: www.scielo.br/aabc.

ARAUJO FILHO, M. F.; OTA, J. J. Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 360–376, 2016.

AYDIN, M. C.; ISIK, E.; ULU, A. E. Numerical modeling of spillway aerators in high-head dams. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 10, n. 42, p. 1–9, 2020.

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Reply to discussion by Chanson and Lubin on “verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators.” **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 37, p. 139–142, 2010.

AYDIN, M. C.; OZTURK, M. Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 36, n. 5, p. 826–836, 2009.

BAI, Z. L.; PENG, Y.; ZHANG, J. M. Three-Dimensional Turbulence Simulation of Flow in a V-Shaped Stepped Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 9, p. 1–10, 2017.

BAI, Z.; ZHANG, J. Comparison of Different Turbulence Models for Numerical Simulation of Pressure Distribution in V-Shaped Stepped Spillway. **Mathematical Problems in Engineering**, [s. l.], p. 10, 2017.

BAYON, A. *et al.* 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**, [s. l.], v. 19, p. 137–149, 2018.

BINDO, M.; GAUTIER, J.; LACROIX, F. The stepped spillway of M’Bali dam. **Water Power & Dam Construction**, [s. l.], v. 45, n. 1, p. 35–36, 1993.

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Hydraulic Design of Stepped Spillways. **J. Hydraul. Eng.**, [s. l.], v. 129, n. 9, p. 671–679, 2003a.

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. **J. Hydraul. Eng.**, [s. l.], v. 129, n. 9, p. 661–670, 2003b.

BOMBARDELLI, F. A.; MEIRELES, I.; MATOS, J. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 11, n. 3, p. 263–288, 2011.

BUNG, D. B. Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 5, p. 639–648, 2011.

BUNG, D. B. Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 322–329, 2013.

CAMPBELL, F. B.; COX, R. G.; BOYD, M. B. Boundary Layer Development and Spillway Energy Losses. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, [s. l.], v. 91, n. HY3, p. 149–163, 1965.

CANELLAS, A. V. B. **Pressões Extremas Atuantes nas Proximidades das Quinas dos Degraus de Vertedouros**. 2020. 1–189 f. PhD thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2020.

CARRILLO, J. M. *et al.* Experimental and Numerical Analysis of Two-Phase Flows in Plunge Pools. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 146, n. 6, p. 1–11, 2020.

CELIK, I. B. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 130, n. 7, p. 0780011–078001, 2008.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications**. 1. ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2006.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 4, p. 361–368, 1999.

CHANSON, H. **Hydraulic Design of Stepped Cascade, Channels, Weirs and Spillways**. Oxford, England: Elsevier Science Ltd, 1994a.

CHANSON, H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 445–460, 1994b.

CHANSON, H. Stepped spillway flows and air entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 422–435, 1993.

CHANSON, H. Turbulent air-water flows in hydraulic structures: Dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 125–142, 2009.

CHANSON, H.; BUNG, D. B.; MATOS, J. Stepped spillways and cascades. *In*: CHANSON, H. (org.). **Energy Dissipation in Hydraulic Structures**. IAHR Monographed. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2015. p. 45–64. *E-book*. Disponível em: www.iahr.org.

CHANSON, H.; TOOMBES, L. Air-water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 28, p. 1737–1761, 2002. Disponível em: [http://www.uq.edu.au/\\$e2hchans](http://www.uq.edu.au/$e2hchans).

CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. Flow Resistance in Skimming Flows and its Modelling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 809–819, 2002.

CHEN, Q.; DAI, G.; LIU, H. Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 128, n. 7, p. 683–388, 2002.

CHOW, V. te. **Open-channel hydraulics**. Caldwell, New Jersey : The Blackburn Press, 1959.

CONCEIÇÃO, M. P. da S.; FONTES, A. S. Risco Hidrológico Associado a Precipitação Máxima Provável em Barragens do Semiárido Baiano. *In:* , 2019, Foz do Iguaçu - Brazil. **XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Foz do Iguaçu - Brazil: ABRHidro, 2019. p. 1–10.

CONSÓRCIO HIDROCONSULT - MWH BRASIL. **Relatório do Projeto Executivo dos Segmentos de Canais do PISF - Volume 2**. [S. l.: s. n.], 2012.

CONTERATO, E. **Determinação de Critérios de Dimensionamento de Soleira Terminal em Bacia de Dissipação a Jusante de Vertedouro em Degraus**. 2014. 156 f. Master thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2014.

CONTERATO, E. **Escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Declividade 1V:0,75H: Caracterização das Pressões e Condições de Aeração**. 2011. 71 f. Undergraduate Thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2011.

CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; ALVES, A. A. M. Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 131–137, 2015.

DAI PRÁ, M. *et al.* Um Estudo sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. **Revista Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 17–28, 2012.

DANESHFARAZ, R. *et al.* Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. **Advances and Applications in Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 805–822, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17654/FM019040805>.

DETTMER, P. H. C. *et al.* Simulação Numérica da Capacidade de Descarga de um Vertedouro de Baixa Queda Afogado por Jusante. *In:* , 2013, Bento Gonçalves, Brazil.

XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves, Brazil: ABRH, 2013. p. 1–8.

EGHBALZADEH, A.; JAVAN, M. Comparison of Mixture and VOF models for numerical simulation of Air-Entrainment in skimming flow over stepped spillways. *In: ,* 2012. **Procedia Engineering.** [S. l.: s. n.], 2012. p. 657–660.

ELETROBRAS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas.** [S. l.]: CBDB/ICOLD, 2003.

ELETROBRAS. **Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas.** [S. l.]: Centrais Elétricas Brasileiras S. A. - Eletrobras, 2000.

FALVEY, H. T. **Cavitation in Chutes and Spillways - Engineering Monograph N° 42.** Denver, CO: [s. n.], 1990.

FELDER, S.; CHANSON, H. Energy Dissipation down a Stepped Spillway with Nonuniform Step Heights. **J. Hydraulic Eng.,** [s. l.], v. 137, n. 11, p. 1543–1548, 2011.

FELDER, S.; CHANSON, H. Scale effects in microscopic air-water flow properties in high-velocity free-surface flows. **Experimental Thermal and Fluid Science,** [s. l.], v. 83, p. 19–36, 2017.

FELDER, S.; CHANSON, H. Turbulence, dynamic similarity and scale effects in high-velocity free-surface flows above a stepped chute. **Experiments in Fluids,** [s. l.], v. 47, n. 1, p. 1–18, 2009.

FERLA, R. *et al.* Stepped spillways with aerators: Hydrodynamic pressures and air entrainment. **Brazilian Journal of Water Resources,** [s. l.], v. 26, n. e04, p. 1–12, 2021.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics.** 3. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hing Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.

FRIZELL, K. H. **Research State-of-the-Art and Needs for Hydraulic Design of Stepped Spillways - Hydraulic Laboratory Report HL-2005-06.** Denver, CO: [s. n.], 2006. Disponível em: <http://www.ntis.gov>.

FRIZELL, K. W.; FRIZELL, K. H. **Guidelines for Hydraulic Design of Stepped Spillways. Hydraulic Laboratory Report HL-2015-06.** Denver, CO: [s. n.], 2015.

FRIZELL, K. W.; RENNA, F. M.; MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering,** [s. l.], v. 139, n. 6, p. 630–636, 2013.

FUHRHOP, H.; SCHULZ, H. E.; WITTENBERG, H. Solution for Spillway Chute Aeration Through Bottom Aerators. **Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas.**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 298–312, 2014.

GABL, R.; RIGHETTI, M. Design criteria for a type of asymmetric orifice in a surge tank using CFD. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 397–410, 2018.

GOMES, J. F. **Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros**. 2006. PhD Thesis. Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2006.

HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 3, p. 293–306, 2011.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. **Journal of Computational Physics**, [s. l.], v. 39, p. 201–225, 1981.

HUNT, S. L.; KADAVY, K. C. Types I, II, III and IV Stilling Basin Performance for Stepped Chutes Applied to Embankment Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 147, n. 6, p. 1–10, 2021.

JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence. **Int. J. Heat Mass Transfer**, [s. l.], v. 15, p. 301–314, 1972.

KELLS, J. A.; SMITH, C. D. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. **Canadian Journal of Civil Eng.**, [s. l.], v. 18, p. 358–377, 1991. Disponível em: www.nrcresearchpress.com.

KOBUS, H. **Hydraulic Modelling - German Association for Water Resources - Bulletin 7**. Parey, Hamburg: German Association for Water Resources and Land Im, 1980.

KOEN, J.; BOSMAN, D. E.; BASSON, G. R. Artificial aeration of stepped spillways by crest piers and flares for the mitigation of cavitation damage. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, [s. l.], v. 61, n. 2, p. 28–38, 2019.

KÖKPINAR, M. A.; GÖĞÜŞ, M. High-speed jet flows over spillway aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 885–898, 2002.

KOSITGITTIWONG, D.; CHINNARASRI, C.; JULIEN, P. Y. Numerical simulation of flow velocity profiles along a stepped spillway. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 227, n. 4, p. 327–335, 2013.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The Numerical Computation of Turbulent Flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, [s. l.], v. 3, p. 269–289, 1974.

LI, D. *et al.* Case study on application of the step with non-uniform heights at the bottom using a numerical and experimental model. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 10, n. 1762, p. 1–19, 2018.

LI, S.; ZHANG, J.; XU, W. Numerical investigation of air–water flow properties over steep flat and pooled stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 56, n. 1, p. 1–14, 2018.

LOBOSCO, R. J. **Investigação Teórico-Numérica da Aeração em Estruturas de Vertedouros em Degraus com o uso de Software Livre**. 2013. 149 f. São Carlos, Brazil, 2013.

LOBOSCO, R. J.; SCHULZ, H. E. Análise Computacional do Escoamento em Estruturas de Vertedouros em Degraus. *In:* , 2010, Buenos Aires. (E. Dvorkin, M. Goldschmit, & M. Storti, Org.) **Mecánica Computacional Vol XXIX**. Buenos Aires: Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2010. p. 3593–3600.

LOPARDO, R. *et al.* Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basin. *In:* , 2004, Tehran, Iran. **Proceedings of International Conference on Hydraulics of Dams and River Structures**. Tehran, Iran: A. A. Balkema Publishers, 2004. p. 7.

LOPES, P.; LEANDRO, J.; CARVALHO, R. F. Numerical procedure for free-surface detection using a Volume-of-Fluid model. **Journal of Hydro-Environment Research**, [s. l.], v. 21, p. 43–51, 2018.

MA, L. *et al.* Computational fluid dynamics and the physical modelling of an upland urban river. **Geomorphology**, [s. l.], v. 44, p. 375–391, 2002. Disponível em: www.elsevier.com/locate/geomorph.

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.

MATOS, J. S. G. **Arejamento como Medida de Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas**. 1990. Master thesis, Lisboa, Portugal (in Portuguese), 1990.

MATOS, J. S. G. **Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus**. 1999. PhD thesis, Lisboa, Portugal (in Portuguese), 1999.

MATOS, J. *et al.* Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 14, n. 3, 2022.

MEIRELES, I. O. de C. **Hydraulics of stepped chutes experimental-numerical-theoretical study**. 2011. 293 f. PhD thesis. Aveiro, Portugal, 2011.

MEIRELES, I. *et al.* Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 138, n. 10, p. 870–877, 2012.

MEIRELES, I. C.; BOMBARDELLI, F. A.; MATOS, J. Air entrainment onset in skimming flows on steep stepped spillways: An analysis. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 52, n. 3, p. 375–385, 2014.

MOJTABA, S. *et al.* Experimental study of effect of installing deflector on replacement of inception point of air entrainment in stepped spillways. **Journal of Scientific Research and Development**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 11–16, 2015. Disponível em: www.jsrad.org.

MORTENSEN, J. D.; BARFUSS, S. L.; JOHNSON, M. C. Scale effects of air entrained by hydraulic jumps within closed conduits. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 49, n. 1, p. 90–95, 2011.

MÜLLER, G. Energy dissipation through entrained air compression in plunging jets. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], p. 1–7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00221686.2019.1609105>. Acesso at: 31 Jan. 2022.

NEVES, Y. T.; RODRIGUES, A. B.; CABRAL, J. J. da S. P. Modelagem computacional do rompimento hipotético da barragem de Jucazinho no estado de Pernambuco (Brasil). **Revista DAE**, [s. l.], v. 69, n. 230, p. 167–182, 2021.

NOVAK, P. *et al.* **Hydraulic Modelling - An Introduction: Principles, Methods and Applications**. Firsted. New York, NY: Spon Press, 2010.

NOVAKOSKI, C. K. **Análise da Macroturbulência do Escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Aeração Induzida por Defletor e Câmara de Ar**. 2021. 1–221 f. - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), PhD thesis, Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2021.

NOVAKOSKI, C. K. *et al.* Induced aeration flow over stepped spillways: Mean pressures, air entrainment and flow behavior. **Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 26, n. e34, p. 1–13, 2021.

NOVAKOSKI, C. K. *et al.* Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 22, n. e42, p. 1–8, 2017a.

NOVAKOSKI, C. K. *et al.* Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 22, n. e22, p. 1–8, 2017b.

OLINGER, J. C.; BRIGHETTI, G. Distribuição de Pressões em Vertedouros em Degraus. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 67–83, 2004.

OSMAR, F. M. *et al.* Analysis of the longitudinal distribution of pressures near the ends of the vertical and horizontal faces in stepped spillway of slope 1V: 0.75H. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 23, n. e4, p. 1–11, 2018.

PEGRAM, G. G. S.; OFFICER, A. K.; MOTTRAM, S. R. Hydraulics of Skimming Flow on Modeled Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 125, n. 5, p. 500–510, 1999.

PEREIRA, L. de J. *et al.* Proposição de um Defletor Côncavo a Jusante de Vertedouro em Degraus com 1V:0,75H: estudo numérico. *In:* , 2021, Belo Horizonte, Brazil. **XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Belo Horizonte, Brazil: ABRhidro - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2021. p. 1–11.

PETERKA, A. J. **The Effect of Entrained Air on Cavitation Pitting**. Denver, Colorado: [s. n.], 1953.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. **Journal of Hydrodynamics**, [s. l.], v. 26, n. 2, p. 291–298, 2014.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 136, n. 6, p. 352–359, 2010a.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. II: Hydraulic Design. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 136, p. 360–367, 2010b.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. History and Significance of the Morton Number in Hydraulic Engineering. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 140, n. 5, p. 02514001, 2014.

PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H.-E. Bottom Aeration of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 132, n. 8, p. 850–853, 2006a.

PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H. E. Stepped chutes: Pre-aeration and spray reduction. **International Journal of Multiphase Flow**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 269–284, 2006b.

PINTO, N. L. S.; NEIDERT, S. H.; OTA, J. J. Aeration at high velocity flows. **Water Power and Dam Construction**, [s. l.], v. Parts 1-2, p. 1–10, 1982.

POVH, P. H. *et al.* Início da Aeração e Pressões ao Longo de Vertedouros em Degraus. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 97–111, 2004.

PRIEBE, P. D. S. *et al.* Influence of aeration induced by piers on the starting position of the flow aeration and extreme pressures in stepped spillways. **Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 26, n. e13, p. 1–10, 2021.

QIAN, Y. *et al.* Air Movement Induced by Water Flow with a Hydraulic Jump in Changing Slope Pipes. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 143, n. 4, p. 1–11, 2017.

QIAN, Y. *et al.* Numerical and Experimental Study on Mitigation of Storm Geysers in Edmonton, Alberta, Canada. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 146, n. 3, p. 1–13, 2020.

QIAN, Z. *et al.* Numerical simulation and analysis of water flow over stepped spillways. **Science in China, Series E: Technological Sciences**, [s. l.], v. 52, n. 7, p. 1958–1965, 2009.

ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. **Journal of Fluids Engineering (ASME)**, [s. l.], v. 116, p. 405–413, 1994. Disponível em: <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/>.

RUFF, J. F.; WARD, J. P. **Hydraulic Design of Stepped Spillways**. Denver, Colorado: [s. n.], 2002.

SALEH, S. M.; HUSAIN, S. M. Validation of the Computational ANSYS-CFX code for Free Surface Flow: Skimming Flow over Non-Uniform Step Size Stepped Spillways. **ZANCO Journal of Pure and Applied Sciences**, [s. l.], v. 31, n. s3, p. 361–367, 2019. Disponível em: <https://zancojournals.su.edu.krd/index.php/JPAS>.

SANAGIOTTO, D. G. **Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. 2003. 137 f. Master Phesis. Porto Alegre, Brazil (in Portuguese), 2003.

SANAGIOTTO, D. G. *et al.* Three-dimensional numerical simulation of flow in vertical slot fishways: Validation of the model and characterization of the flow. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 24, n. e20, p. 1–14, 2019.

SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 17–31, 2008.

SANAGIOTTO, D. G.; ROSSI, J. B.; BRAVO, J. M. Applications of computational fluid dynamics in the design and rehabilitation of nonstandard vertical slot fishways. **Water (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 199, p. 1–22, 2019.

SÁNCHEZ-JUNY, M.; BLADÉ, E.; DOLZ, J. Pressures on a stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 45, n. 4, p. 505–511, 2007.

SANEAMENTO DE GOIÁS - SANEAGO. **Barragem Ribeirão João Leite - RT-008 - Dimensionamento Hidráulico**. Goiânia, Brazil: [s. n.], 2000.

SCHULZ, H. E. *et al.* Details of Hydraulic Jumps for Design Criteria of Hydraulic Structures. *In*: SCHULZ, H. E. (org.). **Hydrodynamics - Concepts and Experiments**. London, UK: IntechOpen, 2015. p. 1–44. *E-book*. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/4498>. Acesso at: 8 Feb. 2022.

SIMÕES, A. L. A. **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus. Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento**. 2008. 1–286 f. Master thesis, São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2008.

SIMÕES, A. L. A. **Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas**. 2012. 559 f. PhD Thesis. São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2012.

SIMÕES, A. L. A. *et al.* Free-surface Profiles and Turbulence Characteristics in Skimming Flows along Stepped Chutes. **Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 1–12, 2013.

SIMÕES, A. L. A. *et al.* Stepped Spillways: Theoretical, Experimental and Numerical Studies. *In*: HYDRODYNAMICS - NATURAL WATER BODIES. [S. l.]: InTech, 2012.

SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. de M. Stepped and smooth spillways: Resistance effects on stilling basin lengths. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 329–337, 2010.

STENMARK, E. **On Multiphase Flow Models in ANSYS CFD Software**. 2013. 75 f. Master thesis, Göteborg, Sweden, 2013.

STEPHENSON, D. Energy dissipation down Stepped Spillways. **Water Power & Dam Construction**, [s. l.], v. 43, n. 9, p. 27–30, 1991.

TABARI, M. M. R.; TAVAKOLI, S. Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 1215–1224, 2016.

TABBARA, M.; CHATILA, J.; AWWAD, R. Computational simulation of flow over stepped spillways. **Computers and Structures**, [s. l.], v. 83, n. 27, p. 2215–2224, 2005.

TASSINARI, L. C. da S. *et al.* Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways. **RBRH - Brazilian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 25, n. e3, p. 1–17, 2020.

TASSINARI, L. C. da S. *et al.* Efeitos de Escala em Escoamentos sobre Vertedouros em Degraus: investigação numérica e computacional. *In:* , 2018, Buenos Aires, Argentina. **Proceedings of XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica**. Buenos Aires, Argentina: IAHR, 2018. p. 3023–3034.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2008. PhD thesis. Porto Alegre, Brazil. (in Portuguese), 2008.

TEIXEIRA, D. *et al.* Efeito de Escala nos Valores de Pressão Média junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico Submerso. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 87–100, 2012.

TENG, P.; YANG, J. CFD modeling of two-phase flow of a spillway chute aerator of large width. **Journal of Applied Water Engineering and Research**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 163–177, 2016.

TERRIER, S. **Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features**. 2016. 1–339 f. PhD thesis, Lausanne, Switzerland, 2016.

TERRIER, S.; PFISTER, M.; SCHLEISS, A. J. Comparison of Chute Aerator Effect on Stepped and Smooth Spillways. *In:* , 2015, The Hague, The Netherlands. **36th IAHR World Congress**. The Hague, The Netherlands: IAHR, 2015. p. 1–5.

TORO, J. P. *et al.* Characterization of turbulence statistics on the non-aerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study. **Environmental Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 1195–1221, 2016.

TORRES, C. *et al.* Application of Three-Dimensional CFD VOF to Characterize Free-Surface Flow over Trapezoidal Labyrinth Weir and Spillway. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 147, n. 3, p. 1–19, 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001852](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001852). Acesso at: 30 Jan. 2022.

TORRES, C. *et al.* Determination of scale effects for a scaled physical model of a labyrinth weir using CFD. *In:* , 2018. **7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, ISHS 2018**. [S. l.]: Utah State University, 2018. p. 606–616.

TORRES, C. **Numerical Modelling of Hydraulic Free Surface Flows and Scale Effects Associated with Physical Modelling**. 2018. 305 f. PhD thesis, Leeds, UK, 2018.

TOZZI, M. J. **Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus**. 1992. PhD Thesis. São Paulo, Brazil. (in Portuguese), 1992.

TOZZI, M. Vertedouros em Degraus. *In:* CARVALHO, E. (org.). **Grandes Vertedouros Brasileiros**. [S. l.]: CBDB/ICOLD, 2010. p. 197–203.

TRACTEBEL ENGINEERING. **Relatório do Projeto - 2ª Etapa**. Florianópolis, Brazil: [s. n.], 2020.

USBR. **Design of Small Dams**. 3. ed. [S. l.]: USBR - U. S. Bureau of Reclamation, 1987. v. 3

VOLKART, P. **Air Slots for Flow Aeration Determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway - Mitteilungen Nr. 66**. Zürich, Switzerland: [s. n.], 1983.

WOOD, I. R.; ACKERS, P.; LOVELESS, J. General Method for Critical Point on Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 109, n. 2, p. 308–312, 1983.

YANG, J.; TENG, P.; ZHANG, H. Experiments and CFD modeling of high-velocity two-phase flows in a large chute aerator facility. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 48–66, 2019.

ZAMORA, S. *et al.* Closure to “Hydraulic Performance of Step-Aerator” by Anina Schiess Zamora, Michael Pfister, Willi H. Hager, and Hans-Erwin Minor. **J. Hydraul. Eng**, [s. l.], v. 134, n. 2, p. 135, 2009.

ZAMORA, A. S. *et al.* Hydraulic Performance of Step Aerator. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 134, n. 2, p. 127–134, 2008.

ZHAN, J.; ZHANG, J.; GONG, Y. Numerical investigation of air-entrainment in skimming flow over stepped spillways. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**, [s. l.], v. 6, p. 139–142, 2016.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. I: Physical Modeling and Boundary Layer Development. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 142, n. 7, p. 04016015, 2016a.

ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. II: Pressure and Velocity Fields. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 142, n. 7, p. 04016016, 2016b.

ZHANG, J.; CHEN, J.; WANG, Y. Experimental study on time-averaged pressures in stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 236–240, 2012.

ZINDOVIC, B. *et al.* Stepped spillway flow-comparison of numerical and scale models. **FME Transactions**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 218–223, 2014.