



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

JOSE ROBERTO DE CAMPOS COSTA JUNIOR

**ANÁLISE DE BARRAGEM COM GEOMETRIA EM
GABIÕES ATRAVÉS DE MODELAGEM CFD
(FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL)**

CAMPINAS

2019

JOSE ROBERTO DE CAMPOS COSTA JUNIOR

**ANÁLISE DE BARRAGEM COM GEOMETRIA EM
GABIÕES ATRAVÉS DE MODELAGEM CFD
(FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL)**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

Orientador: PROF. DR. PAULO VATAVUK.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO JOSE ROBERTO DE CAMPOS COSTA JUNIOR E ORIENTADO PELO PROF. DR. PAULO VATAVUK.

ASSINATURA DO ORIENTADOR(A)

CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

C823a Costa Junior, Jose Roberto de Campos, 1990-
Análise de barragem com geometria em gabiões através de modelagem
cfd (fluidodinâmica computacional) / Jose Roberto de Campos Costa Junior. –
Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Paulo Vatavuk.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Bacias de dissipação de energia. 2. Fluidodinâmica computacional
(CFD). 3. Análise numérica - Programas de computador. I. Vatavuk, Paulo,
1960-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Dam analysis with gabions geometry through cfd modeling
(computational fluidodynamics)

Palavras-chave em inglês:

Energy dissipation basin

Computational fluid dynamics (CFD)

Numerical analysis – Computational softwares

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Paulo Vatavuk [Orientador]

Paulo Vatavuk

Tiago Zenker Gireli

Podalyro Amaral de Souza

Data de defesa: 02-07-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-0227-3526>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7407679676575587>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO**

**ANÁLISE DE BARRAGEM COM GEOMETRIA EM
GABIÕES ATRAVÉS DE MODELAGEM CFD
(FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL)**

JOSE ROBERTO DE CAMPOS COSTA JUNIOR

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída
por:**

Prof. Dr. Paulo Vatauvuk
Presidente e Orientador/Unicamp

Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli
Unicamp

Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza
USP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 02 de Julho de 2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Taiane Costa e ao meu filho Davi Costa.

Dedico também ao meu pai José Roberto, a minha mãe Áurea Lúcia, e a minha irmã Mariana Rosa.

A família é o amor de Deus nos oferecendo um pouquinho do céu aqui na terra.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da minha vida e das minhas capacidades intelectuais.

Agradeço ao meu pai José Roberto e a minha mãe Áurea Lúcia, por terem se empenhado na minha educação e na minha formação humana, me passando todos os valores necessários para eu ter chegado até aqui.

Agradeço a minha esposa Taianie Costa, por ter compreendido a necessidade de perder vários finais de semana de lazer para que fosse possível o empenho neste trabalho, e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço ao meu filho Davi Costa, que ainda tão pequeno não possui compreensão do quanto foi importante a sua existência para que eu tivesse motivação de enfrentar todas as dificuldades e seguir em frente nesta pesquisa.

Registro aqui os meus agradecimentos ao meu orientador Dr. Paulo Vatauvuk, que com toda a paciência, me ajudou a construir este trabalho.

Agradeço a empresa Maccaferri do Brasil, por ter me fornecido subsídios necessários para desenvolver esta pesquisa. Em especial agradeço ao Eng. Paulo Ferretti, que me deu um voto de confiança ao me contratar, ao Eng. Petrucio Santos que despertou em mim a vontade de aperfeiçoar a minha técnica como engenheiro civil, e ao meu atual gestor Eng. Emerson Ananias por me motivar a finalizar esta pesquisa.

RESUMO

O funcionamento da bacia de dissipação locada a jusante de vertedores é um dos temas que instiga investigações periodicamente, visto que o desempenho da bacia pode ser um fator determinante para a estabilidade do próprio barramento e também para o leito subsequente. Para garantir um dimensionamento mais assertivo da estrutura, recomenda-se a utilização de modelos físicos experimentais, afim de avaliar o comportamento do escoamento através das aproximações permitidas pelo método. Com o avanço da tecnologia foram desenvolvidas ferramentas computacionais capazes de simular o ambiente físico de teste em um ambiente computacional, reduzindo o custo e tempo de modelagem, atraindo assim os olhares de muitos engenheiros e pesquisadores. Hoje em dia o CFD (Computational Fluid Dynamics) já é uma realidade, e tem auxiliado no desenvolvimento de estudos complexos. A boa prática da engenharia tem nos mostrado que tais modelos computacionais devem ser calibrados com os modelos físicos, antes de serem considerados válidos, para isto este trabalho visa apresentar uma análise comparativa dos resultados obtidos nos ensaios de modelos físicos reduzidos de barramentos de pequeno porte e bacias de dissipação que apresentam geometrias compatíveis a solução de gabiões, realizados pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) da Universidade de São Paulo, com os modelos computacionais desenvolvidos através da ferramenta de código aberto OpenFOAM. As modelagens numéricas que serão aqui apresentadas possuem malhas quadradas com células de 1cm, os modelos foram desenvolvidos em duas dimensões (2D), com modelo de turbulência k- ω SST. As estruturas estudadas possuem uma grande variação de geometria, com alturas de 2m a 5m_(esc. 1:1), comprimento de bacias de 4,5m a 9m_(esc. 1:1), e também uma variação na altura das contrabarragens. As alturas d'água de montante da estrutura obtidas pelos modelos numéricos se apresentaram muito próximas aos níveis de montante medidos nos modelos físicos. As velocidades de jusante dos experimentos ficaram coerente com as velocidades encontradas nos modelos numéricos, porém com uma margem de erro um pouco maior do que a encontrada para os níveis de montante. Por fim foram realizados modelos numéricos na escala de protótipo afim de atender a semelhança de Reynolds e verificar possíveis distorções nos resultados, que foram ficaram abaixo de 20%.

Palavras chave: Bacia de dissipação, Modelagem CFD e OpenFOAM

ABSTRACT

The operation of the basin dissipation located downstream of spillways is one of the themes that instigates investigations periodically, since the performance of the basin can be a determinant factor for the stability of the bottom and also for the subsequent riverbed. To assure a more assertive design of the structure, it is recommended to use experimental physical models in order to evaluate the behavior of the flow through the approximations allowed by the method. With the advancement of the technology, computational tools have been developed capable of simulating the physical test environment in a computational environment, reducing the cost and time of modeling, becoming interesting for many engineers and researchers. Nowadays CFD (Computational Fluid Dynamics) is already a reality and has aided in the development of complex studies. The good engineering practice has shown us that such computational models must be calibrated with the physical models, before being considered valid, for this the work aims to present a comparative analysis of the results obtained in the tests of reduced physical models of small dams and dissipation basins that present compatible gabion solution geometries, performed by the Hydraulic Technological Center (University of São Paulo, and Department of water and Hydraulic Energy agreement), with the computational models developed through the OpenFOAM open source tool. The numerical modeling that will be presented here has square meshes with 1cm cells, the models were developed in two dimensions (2D), with turbulence model $k-\omega$ SST. The studied structures have a large variation of geometry, with heights of 2m to 5m (1:1), lengths of basins of 4.5m to 9m (1:1 scaling), as well as a variation in the height of the end sill. The upstream water heights of the structure obtained by the numerical models were very close to the amount levels measured in the physical models. The downstream velocities of the experiments were consistent with the velocities found in the numerical models, but with a margin of error a little higher than that found for the upstream levels. Finally, numerical models were performed on the prototype scale to meet the Reynolds similarity and to verify possible distortions in the results, which were below 20%.

Keywords: Basin dissipation, CFD Models e OpenFOAM

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de rocha que podem ser extraídos os rachões para preenchimento de Gabião. Fonte: Manual de contenções Maccaferri, 2008	31
Tabela 2. "Cv" para soleiras delgadas. Fonte: Próprio Autor	43
Tabela 3. Valores de coeficiente de vazão "Cd" para vertedores retangulares de soleira espessa. Fonte: Próprio Autor	47
Tabela 4. Geometrias ensaiadas no modelo físico. Fonte: Próprio autor	95
Tabela 5. Condições de contorno utilizadas para o modelo numérico. Fonte: Próprio Autor.....	120
Tabela 6. Resultados apresentado pelo CTH para barragens com CTB=0,3 (1:1) . Fonte: Próprio Autor	126
Tabela 7. Resultados apresentado pelo CTH para barragens com CTB=0,05 (1:6) . Fonte: Próprio Autor	127
Tabela 8. Tabela resumo dos modelos físicos desenvolvidos pelo CTH na escala de protótipo. Fonte: CTH	128
Tabela 9. Tabela resumo dos modelos físicos desenvolvidos pelo CTH na escala corrigida. Fonte: Próprio Autor.....	129
Tabela 10. Resumo de todos os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho. Fonte: Próprio Autor	130
Tabela 11. Diferença de velocidades médias na saída das bacias de dissipação elevadas e rebaixadas. Fonte: Próprio Autor	149
Tabela 12. Comparação dos resultados obtidos entre o modelo físico, numérico reduzido (malha 1cm x 1cm) e numérico (malha 0,5cm x 0,5cm). Fonte: Próprio Autor.....	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gabiões executados com malhas vegetais trançadas e preenchidos com pedra, Peru. Fonte: Fracassi 2017	23
Figura 2. Proteção militar com Gabiões de vime em Fort Sedgwick ("Fort Hell"), em Petersburg, na Virginia (EUA). Fonte: Fracassi 2017.....	24
Figura 3. Barragem em Gabiões, Etiópia, 1937. Fonte: Fracassi 2017.....	24
Figura 4. Apoio de ponte em Gabiões, 1910, Itália. Fonte: Fracassi 2017	25
Figura 5. Gabião Caixa, Colchão Reno e Gabião saco, respectivamente, Fonte: Maccaferri, 2008	25
Figura 6. Ponte ferroviária rompida no ano de 1893, entre Piacenza e San Felice. Fonte: Fracassi 2017.....	26
Figura 7. Espigão rio Reno, 1893. Fonte: Fracassi 2017.....	27
Figura 8. Fechamento da brecha com Gabiões, rio Reno, 1894. Fonte: Fracassi 2017	27
Figura 9. Comemoração dos operários com a finalização da obra, rio Reno, 1895. Fonte: Fracassi 2017.....	28
Figura 10. Brechas ocorridas nos diques laterais do rio do Pó, Itália, 1951. Fonte: Fracassi 2017	29
Figura 11. Início dos fechamentos das brechas do rio Pó com gabhões sacos, 1951. Fonte: Fracassi 2017.....	29
Figura 12. Esquema dos gabhões tipo caixa. Fonte: Relatório Técnico Maccaferri do Brasil	30
Figura 13. Prova de carga realizada pela Maccaferri, Itália, 1982. Fonte: Relatório Técnico Maccaferri do Brasil.....	31
Figura 14. Desenho da peça Colchão Reno. Fonte: Maccaferri, 2008.....	32
Figura 15. Tirantes aplicados no colchão Reno. Fonte: Maccaferri, 2008	33
Figura 16. Barragem em Gabiões em Porretta, Bolonha, Itália, 1930. Fonte: Agostini et al., 1981	34
Figura 17. Barragem em Gabiões em Porretta, Bolonha, Itália, 1965. Fonte: Agostini et al., 1981	34
Figura 18. Execução de Barragem em gabhões, Balbina, Amazonas, Brasil. Fonte: Maccaferri do Brasil 1987.....	35

Figura 19. Barragem em gabiões executada, Balbina, Amazonas, Brasil. Fonte: Maccaferri do Brasil 1987.....	35
Figura 20. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010	36
Figura 21. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010	36
Figura 22. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010	36
Figura 23. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010	37
Figura 24. Barragem em Nova Lima, Minas Gerais, Brasil - Paramento vertical. Fonte: Maccaferri do Brasil	38
Figura 25. Barragem em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil - Paramento em degraus. Fonte: Maccaferri do Brasil.....	38
Figura 26. Barragem em Paramirim, Bahia, Brasil - Paramento inclinado. Fonte: Maccaferri do Brasil.....	38
Figura 27. Esquema de barramento em gabiões com face vertical e bacia elevada. Fonte: Próprio autor.....	39
Figura 28. Esquema de barramento em gabiões com face vertical e bacia em depressão. Fonte: Próprio autor.....	39
Figura 29. Soleira de Gabião revestida com concreto e detalhamento da armadura do concreto, respectivamente. Fonte: Agostini et al., 1981	41
Figura 30. Soleira de parede delgada. Fonte: blackboard, 2011	42
Figura 31. Soleira delgada. Fonte: Martins; Euler	43
Figura 32. Empuxos atuantes em uma barragem em gabiões. Fonte: AGOSTINI et al., 1981	44
Figura 33. Barragem em gabiões com vertedor retangular, Araçongas, Paraná, Brasil. Fonte: AGOSTINI et al., 1981	45
Figura 34. Barragem em gabiões com vertedor trapezoidal, Castel dell'Alpi, Bolonha, Itália. Fonte: AGOSTINI et al., 1981	45
Figura 35. Barragem em gabiões com vertedor duplo trapézio, Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010	46

Figura 36. Esquema de barragem em Gabiões sem revestimento de bacia. Fonte: Agostini et al., 1981	51
Figura 37. Ábaco para determinação da profundidade de escavação. Fonte: Agostini et al., 1981	52
Figura 38. Soleira em gabiões com a presença de uma contrabarragem. Fonte: Agostini et al., 1981	53
Figura 39. Curva para determinar o tamanho máximo de pedra para a mistura da bacia de dissipação. Fonte: Peterka, 1984.....	56
Figura 40. Protótipo, Barragem Norte. Fonte: Peterka, 1984.....	57
Figura 41. Modelo, Barragem Sul. Fonte: Peterka, 1984.....	57
Figura 42. Erosões ocorridas no protótipo, Barragem Norte. Fonte: Peterka, 1984	57
Figura 43. Erosões ocorridas no modelo, Barragem Norte Fonte: Peterka, 1984.	58
Figura 44. Modelo hidráulico, barragem norte. Fonte: Peterka 1984.....	59
Figura 45. Ensaio hidráulico. Fonte: Maccaferri em Grenoble, França	62
Figura 46. Velocidades limites dos Gabiões. Fonte: Maccaferri, 2017	63
Figura 47. Barragem com bacia revestida com Gabiões. Fonte: Agostini et al., 1981	64
Figura 48. Barramento com sedimentação completa	66
Figura 49. Ressalto hidráulico em queda livre. Fonte: Chow, 2005.....	68
Figura 50. Barragem com bacia de dissipação em depressão. Fonte: Agostini et al., 1981.	68
Figura 51. Barragem em gabiões com bacia em depressão, Bandar Abbas, IRAN. Fonte: Agostini et al., 1981.....	69
Figura 52. Modelo reduzido utilizando gabião. Fonte: Hassan, 2010	72
Figura 53. Modelo reduzido utilizando soleira em concreto. Fonte: Hassan, 2010	72
Figura 54. Semelhança de medidas (L). Fonte: Próprio autor	77
Figura 55. Etapas do processo CFD. Fonte: Próprio autor.....	84
Figura 56. Faixa de estudo do modelo físico desenvolvido. Fonte: Próprio autor .	91
Figura 57. Níveis d'água medidos no modelo físico utilizados para calibração do modelo numérico. Fonte: Próprio autor.....	93

Figura 58. Ilustração da lâmina d'água com e sem entrada de ar. Fonte: Próprio autor.....	93
Figura 59. Ilustração do comprimento da bacia. Fonte: Próprio autor.....	94
Figura 60. Ilustração das variáveis da tabela 4. Fonte: Próprio autor.....	95
Figura 61. Dimensões das barragens ensaiadas (Escala de 1:1). Fonte: Próprio autor.....	96
Figura 62. Visor acrílico no trecho de dissipação. Fonte: CTH.....	96
Figura 63. Vertedor triangular similar ao modelo físico da barragem em gabiões Fonte: CTH	97
Figura 64. Tranquilizador de escoamento Fonte: CTH	97
Figura 65. Barragem com P=4m, modelo físico reduzido Fonte: CTH	98
Figura 66. Entrada de ar na soleira Fonte: CTH.....	99
Figura 67. Contrabarragem localizada a jusante da bacia de dissipação. Fonte: CTH	99
Figura 68. Placa de madeira para simular sedimentação. Fonte: CTH.....	100
Figura 69. Bacia em depressão. Fonte: CTH.....	101
Figura 70. Sistema de medição de nível d'água. Fonte: CTH.....	102
Figura 71. Vertedor triangular similar ao utilizado no modelo físico. Fonte: CTH	102
Figura 72. Micromolinetete desenvolvido pelo CTH. Fonte: Moraes 2015	103
Figura 73. Preenchimento parcial de montante no t=0, modelagem numérica, Software para visualização Paraview 5.1.2 64bit. Fonte: Próprio Autor.....	105
Figura 74. Gráficos de velocidade por nível vertical do corte, dos instantes de tempo de 3,7s, 30s e 38s. Fonte: Próprio Autor	106
Figura 75. Gráficos da quantidade de água por nível vertical do corte, dos instantes de tempo de 3,7s, 30s e 38s. Fonte: Próprio Autor	106
Figura 76. Sequência de trabalho com OpenFOAM. Fonte: Próprio Autor.....	107
Figura 77. Geometria dos Gabiões. Fonte: Próprio Autor.....	108
Figura 78. Coordenadas da malha utilizada na escala 1:6. Fonte: Próprio Autor	109
Figura 79. Malha computacional utilizada no modelo. Fonte: Próprio Autor	109
Figura 80. Detalhe da malha na região da barragem e na região da contrabarragem. Fonte: Próprio Autor	110
Figura 81. Única divisão no eixo "y" . Fonte: Próprio Autor	110

Figura 82. Divisão da condição de contorno. Fonte: Próprio Autor.....	114
Figura 83. Contorno do modelo numérico. Fonte: Próprio Autor	114
Figura 84. Condições de contorno e suas respectivas velocidades. Fonte: Próprio Autor.....	116
Figura 85. Condições de contorno no outlet. Fonte: Próprio Autor	116
Figura 86. Alturas necessárias para a configuração do contorno Atmosphere – pressureInletOutletVelocity. Fonte: Próprio Autor	117
Figura 87. Condição de contorno da “Entradaar”. Fonte: Próprio Autor.....	118
Figura 88. Visualização geral do Paraview. Fonte: Próprio Autor	121
Figura 89. Visualizações de diversas variáveis para o mesmo modelo. Fonte: Próprio Autor.....	122
Figura 90. Localização do ‘PlotOverLine’. Fonte: Próprio Autor	123
Figura 91. Coordenadas de início e término nos 3 eixos (x, y e z) . Fonte: Próprio Autor.....	123
Figura 92. Gráfico extraído no PlotOverLine. Fonte: Próprio Autor.....	124
Figura 93. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico (P=0,33 esc. 1:6). Fonte: Próprio Autor	131
Figura 94. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico (P=0,5 esc. 1:6). Fonte: Próprio Autor	132
Figura 95. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico (P=0,67 esc. 1:6). Fonte: Próprio Autor.....	132
Figura 96. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico (P=0,83 esc. 1:6). Fonte: Próprio Autor.....	133
Figura 97. Extração de nível d’água de montante através do Paraview. Fonte: Próprio Autor.....	134
Figura 98. Modelo físico reduzido, $P=3m_{(esc. real)}$, $L=9m_{(esc. real)}$, $q=0,95m^3/s/m_{(esc. real)}$. Fonte: CTH.....	135
Figura 99. Exemplo de rebaixamento do NA gerado nas soleiras espessas. Fonte: DAEE 2005	135
Figura 100. Trecho de medição da velocidade média do modelo físico reduzido. Fonte: CTH	136

Figura 101. Trecho de medição de velocidade do modelo numérico. Fonte: Próprio Autor.....	137
Figura 102. Gráfico comparativo de $Q \times V_m$, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,33_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor.....	138
Figura 103. Gráfico comparativo de $Q \times V_m$, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,50_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor	139
Figura 104. Gráfico comparativo de $Q \times V_m$, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,67_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor	139
Figura 105. Gráfico comparativo de $Q \times V_m$, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,83_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor	140
Figura 106. Gráfico comparativo de $L \times V_m$, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,50_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor.....	141
Figura 107. Gráfico comparativo de $L \times V_m$, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,67_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor.....	142
Figura 108. Variáveis da equação 85. Fonte: Próprio Autor	143
Figura 109. Gráfico comparativo de $L \times h$, modelo físico reduzido e modelo numérico($P=0,50_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor	144
Figura 110. Gráfico comparativo de $L \times h$, modelo físico reduzido e modelo numérico($P=0,67_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor	145
Figura 111. Peças gráficas (STL) criadas para a modelagem das bacias em depressão. Fonte: Próprio Autor	146
Figura 112. Superfície de contorno após o comando “snappyhexmesh”. Fonte: Próprio Autor.....	147
Figura 113. Modelos de Bacias rebaixadas com comprimento de bacia variados. Fonte: Próprio Autor	147
Figura 114. Gráfico comparativo de $Q \times V_m$, modelo com bacia rebaixada e modelo com bacia elevada ($P=0,67$). Fonte: Próprio Autor	149
Figura 115. Coordenada $x=4,8$ do PlotOverline para perfil de velocidades. Fonte: Próprio Autor.....	150
Figura 116. Perfis de velocidades para bacia elevada e rebaixada. Fonte: Próprio Autor.....	150
Figura 117. Modelo $P= 0,67m_{(esc. 1:6)}$ com bacia em depressão. Fonte: Próprio Autor	152

Figura 118. Modelo $P=0,67m_{(esc. 1:6)}$ com bacia elevada. Fonte: Próprio Autor ..	152
Figura 119. Desenho 3D das estruturas em escala 1:1. Fonte: Próprio Autor.....	158
Figura 120. Gráfico comparativo de $Q \times H$, modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 ($P=3$). Fonte: Próprio Autor.....	159
Figura 121. Gráfico comparativo de $Q \times V_m$, modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 ($P=3$). Fonte: Próprio Autor	160
Figura 122. Gráfico comparativo de $L \times V_m$, modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 ($P=3$). Fonte: Próprio Autor	161
Figura 123. Modelos numérico reduzido e na escala de 1:1, $P=3$, $L=4,5m$. Fonte: Próprio Autor.....	162
Figura 124. Gráfico comparativo de $L \times h$, modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 ($P=3$). Fonte: Próprio Autor.....	163
Figura 125. Modelo físico reduzido. Fonte: Próprio Autor.....	167

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1.	OBJETIVO	22
1.2.	JUSTIFICATIVA	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1.	PRIMEIRAS OBRAS FLUVIAIS COM GABIÕES	26
2.1.1.	PROTEÇÃO DE MARGEM DO RIO RENO	26
2.1.2.	DIQUE LATERAL DO RIO PÓ, OCCHIOBELLO	28
2.2.	GABIÕES CAIXA	29
2.3.	GABIÕES: TIPO COLCHÃO RENO	32
2.4.	BARRAGENS EM GABIÕES	34
2.5.	VERTEDORES	40
2.5.1.	SOLEIRAS DE SUPERFÍCIE LIVRE	41
2.5.2.	BACIA DE DISSIPACÃO	49
2.6.	MODELAGEM HIDRÁULICA FÍSICA	70
2.6.1.	TEORIA DA SEMELHANÇA	73
2.6.2.	SEMELHANÇA DE FROUDE E EFEITO DE ESCALA	79
2.7.	MODELAGEM HIDRÁULICA COMPUTACIONAL	80
3	MATERIAIS E MÉTODOS	90
4	MATERIAIS E MÉTODOS	92
4.1.	Calibração e Refinamento de malha do OpenFoam	92
4.2.	Avaliação de distorções devido à condição de semelhança incompleta	94
5	MODELAGENS	95
5.1.	Modelagem física FCTH/USP	95
5.1.2	ASSOREAMENTO	100
5.1.3.	REBAIXAMENTO DO NÍVEL DA BACIA	100
5.2.	Instrumentação	101
5.2.1.	MEDIÇÃO DE NÍVEL D'ÁGUA	101
5.2.2.	MEDIÇÃO DE VAZÃO	102
5.2.3.	MEDIÇÃO DE VELOCIDADE	103
5.3.	Modelo Numérico – OpenFoam 4.0	104
5.3.1.	CARACTERIZAÇÃO GERAL	106

5.3.2.	GEOMETRIA	107
5.3.3.	MALHA COMPUTACIONAL	108
5.3.4.	MODELO DE TURBULÊNCIA.....	111
5.3.5.	CONDIÇÕES CONTORNO	113
5.3.6.	NOME DO CONTORNO.....	114
5.3.7.	TIPOS DE CONTORNO	114
5.3.8.	CONDIÇÕES DE CONTORNO OPENFOAM.....	115
5.3.9.	COLETA DE RESULTADOS	121
5.3.10.	COLETA DE DADOS NO PARAVIEW	123
6	Resultados	125
6.1.	Fase 1	130
6.1.1.	RESULTADOS $Q(m^3/s)$ X $h(m)$	131
6.1.2.	RESULTADOS $Q(m^3/s)$ X $V_m(m/s)$	136
6.1.3.	RESULTADOS $V_m(m/s)$ X $L(m)$	140
6.1.4.	RESULTADOS BACIA DE DEPRESSÃO	145
6.1.5.	RESULTADOS $Q (m^3/s)$ X $V_m (m/s)$ – BACIA DE DEPRESSÃO X BACIA ELEVADA – $P= 0,67m$	148
6.1.6.	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS FASE 1	152
6.2.	Fase 2.....	156
6.2.1.	RESULTADOS $Q(m^3/s)$ X $H(m)$ – CFD 1:1	158
6.2.2.	RESULTADOS $Q(m^3/s)$ X $V_m(m/s)$ – CFD 1:1	159
6.2.3.	RESULTADOS $L(m)$ X $V_m(m/s)$ – CFD 1:1	160
6.2.4.	RESULTADOS $L(m)$ X $h(m)$ – CFD 1:1	162
6.2.5.	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS FASE 2	163
7	Conclusão	168
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	172

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das civilizações foi-se descobrindo a necessidade primária de se obter água de qualidade para satisfazer as principais necessidades da população, segundo (Novak et al., 2007) todas as grandes civilizações se desenvolveram através da construção de reservatórios adequados as suas respectivas necessidades, sendo nos primeiros casos para satisfazer as demandas de irrigação oriundas do crescimento da agricultura organizada.

Além da função de armazenamento de água das grandes barragens e reservatórios, surgiu também aplicação de barramentos para controle da erosão e conservação de solo, tal aplicação visa estabilizar o leito do curso d'água contra as tensões de arraste sofridas pelo solo diminuindo assim as erosões nos cursos d'água que possuem declividade mais acentuadas. O controle dos sólidos transportados pelo escoamento reflete diretamente na qualidade da água do escoamento, e na sua turbidez. Uma das soluções que ganhou espaço no cenário hidráulico foi o Gabião, invólucro metálico preenchido com materiais pétreos, que são aplicados como revestimento de cursos d'água, proteção de margens, apoio de pontes, escadas dissipadoras e barramentos, este trabalho se atentará a esta última aplicação. Para tal aplicação a solução em gabiões foi vastamente aplicada, segundo Agostini et al., (1981) a aplicação de barragens em gabiões nos projetos e obras de conservação de solo, é com certeza a mais difundida e utilizada, devido à sua flexibilidade que muitas vezes favorece a solução em áreas degradadas, onde geralmente tais obras devem ser realizadas. Para esta estrutura hidráulica é utilizado um sistema extravasor composto por vertedores retangulares ou trapezoidais de soleira espessa, e subsequente bacia de dissipação, que pode ser constituída de enrocamento, gabiões ou concreto. O vertedor possui a principal função de permitir a passagem da lâmina excedente de montante para jusante, enquanto a bacia de dissipação possui a função de dissipar a energia cinética do escoamento passante pelo vertedor, protegendo assim o leito a jusante da estrutura, e também o próprio barramento. Segundo Baptista e Coelho (2003), a construção das barragens pressupõe o controle dos cursos d'água, porém tais cursos d'água possuem uma variação muito grande de vazão e conseqüentemente

níveis d'água, obrigando assim a ser previsto na estrutura um sistema extravasor que tenha a capacidade de proteger a própria barragem e o leito subsequente.

Hoje em dia a busca pelo aperfeiçoamento técnico de projetos hidráulicos é um tema que desperta o interesse de muitos profissionais na área de recursos hídricos e ambientais, pois com as mudanças de clima e temperatura, muitas cidades, estados e regiões tem sofrido com a escassez ou a superabundância de água, fatos estes que comumente são responsáveis pela falta de abastecimento e inundações, respectivamente. Com esta demanda de obras rápidas e muitas vezes emergenciais, a assertividade técnica do projeto enfrenta cada vez mais dificuldade no que diz respeito ao tempo disponível para estudo e limitações em orçamentos, segundo Ferziger; Peric (2002).

Buscando o aprimoramento técnico na solução de problemas complexos, relacionados a estruturas hidráulicas, tem-se como prática comum a utilização de modelos físicos reduzidos. A técnica de utilização de modelos físico reduzidos é uma ferramenta para estudos da interação do escoamento com estruturas hidráulicas de geometrias complexas (Kanashiro, 2013). A modelação física constitui uma ferramenta poderosa para estudos de escoamentos em estruturas hidráulicas e também para otimizar o formato dessas estruturas e o seu uso foi consagrado através de incontáveis obras, cujos comportamentos foram previstos com maior precisão quando comparado aos resultados teóricos (Kanashiro, 2013).

No mês de maio de 2004 foi realizado um ensaio de Barragem em Gabião caixa com modelo reduzido bidimensional pelo Centro Tecnológico de Hidráulica, com o intuito de avaliar os resultados práticos dos ensaios com os resultados teóricos do método de Rand (1955).

Com o avanço da tecnologia os modelos computacionais, mais conhecidos como "Computational Fluid Dynamics (CFD)" integraram com sucesso o campo de estudos técnicos de hidráulica. O CFD é a análise do sistema envolvendo escoamento, transferência de calor e fenômenos associados, tais como reações químicas por meio de simulações computacionais (Versteeg e Malalaskera, 1995). Alguns tipos de escoamentos podem ser descritos por equações diferenciais, que não podem ser resolvidas analiticamente, exceto em casos especiais. Para obter uma solução aproximada numericamente, temos que utilizar um método de

discretização que nos aproxime das equações diferenciais por um sistema de equações algébricas, que podem então ser resolvido em um computador. As aproximações são aplicadas a pequenos domínios no espaço e/ou no tempo, com isso a solução numérica fornece resultados discretos no espaço e no tempo (Ferziger e Peric, 2002).

Neste trabalho serão abordados com maior ênfase os tópicos que retratam a técnica das barragens em gabiões e suas respectivas bacias de dissipação, os ensaios de modelos reduzidos realizados pelo CTH na USP e as modelagens numéricas desenvolvidas através do software de código aberto OpenFOAM. Complementando o desenvolvimento e a conclusão do trabalho, serão destacados os resultados e as principais diferenças encontradas em cada método, e quais implicações estas diferenças poderiam proporcionar no dimensionamento da estrutura.

1.1. OBJETIVO

O objetivo do trabalho é avaliar o desempenho e as limitações do Software OpenFOAM na reprodução de um escoamento passante sobre uma soleira espessa, a qual possui geometria em Gabiões e revestimento de concreto, impactando diretamente numa bacia de dissipação também formado com geometria de Gabiões, porém revestida com concreto. Para o cumprimento deste objetivo, serão configurados alguns modelos numéricos através da ferramenta OpenFOAM, respeitando as devidas escalas e calibrando-os com um modelo físico reduzido, já existente, o qual foi executado e avaliado no CTH na USP na cidade de São Paulo.

1.2. JUSTIFICATIVA

Com o grande número de obras e projetos onde os barramentos em Gabiões, revestidos ou não com concreto, são aplicados em obras hidráulicas têm-se uma necessidade de avaliar tais soluções de forma mais refinada e depurada, a fim de garantir o pleno funcionamento das estruturas. Justifica-se este trabalho com a necessidade de validar o software OpenFOAM como ferramenta de análise numérica para geometrias que representem barramentos e bacias de dissipação em Gabiões revestidos com concreto, com a tendência de que após tal validação

do programa não seja mais necessário a utilização dos métodos experimentais da estrutura para casos tradicionais, reduzindo assim o custo e o tempo do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Fracassi 2017, as estruturas de Gabião sofreram diversas alterações ao longo dos anos, e a primeira obra de Gabião (ainda não metálico) executada no mundo foi na antiga cidade de Caral, no vale do rio Supe, ao norte de Lima no Peru. Como se trata de uma cidade muito antiga, despertou nos arqueólogos o interesse de pesquisa e investigação, e durante este processo de escavações foram identificados restos de malhas de fibra vegetal trançadas, as quais configuravam um cesto preenchido com pedras (Figura 1). Tais restos de estruturas são datadas de 2.627 a.C., época do crescimento da civilização Egípcia (2.600 – 2.480 a.C.). Foram encontrados também restos de “Gabiões” no alto rio Nilo no Egito. Ao contrário da aplicação do Peru, essas soluções encontradas eram constituídas de cestos de vime cheios de pedras pequenas. Outras aplicações de Gabiões foram utilizadas ao longo da história, como fundação de edifícios na Europa durante a Idade média e o Renascimento, e como defesas militares (Figura 2).



Figura 1. Gabiões executados com malhas vegetais trançadas e preenchidos com pedra, Peru. Fonte: Fracassi 2017



Figura 2. Proteção militar com Gabiões de vime em Fort Sedgwick ("Fort Hell"), em Petersburg, na Virginia (EUA). Fonte: Fracassi 2017

Todas estas aplicações citadas ao longo da história, segundo Fracassi 2017, relatam a constituição dos Gabiões como cestos de vime, ou malhas de materiais vegetais trançadas preenchidas com pedras, porém durante o inverno entre 1892 e 1893 em Bolonha na Itália, nasceu uma nova versão do Gabião, composto por uma malha metálica preenchida com pedras. Esta nova versão foi aplicada pela primeira vez na história como uma recuperação da margem esquerda do rio Reno em Casalecchio, perto da cidade de Bolonha, no norte da Itália. A partir desta aplicação os Gabiões tiveram um crescimento e uma difusão para outros países e continentes, segundo Fracassi 2017 (Figuras 3 e 4).



Figura 3. Barragem em Gabiões, Etiópia, 1937. Fonte: Fracassi 2017



Figura 4. Apoio de ponte em Gabiões, 1910, Itália. Fonte: Fracassi 2017

No decurso da história a solução foi sendo submetida a diversas alterações e melhorias como:

- Alteração do formato da malha de quadrangular para hexagonal
- Alteração nos formatos das peças, caixa, colchão, saco (Figura 5)
- Aplicação de zinco na superfície do arame para proteção contra corrosão
- Aumento de dezenas de g/m² para centenas de g/m² de zinco na proteção do arame
- Introdução de alumínio na proteção metálica contra corrosão do arame
- Acréscimo de revestimento adicional plástico com o PVC
- Presente substituição do PVC para blendas poliméricas

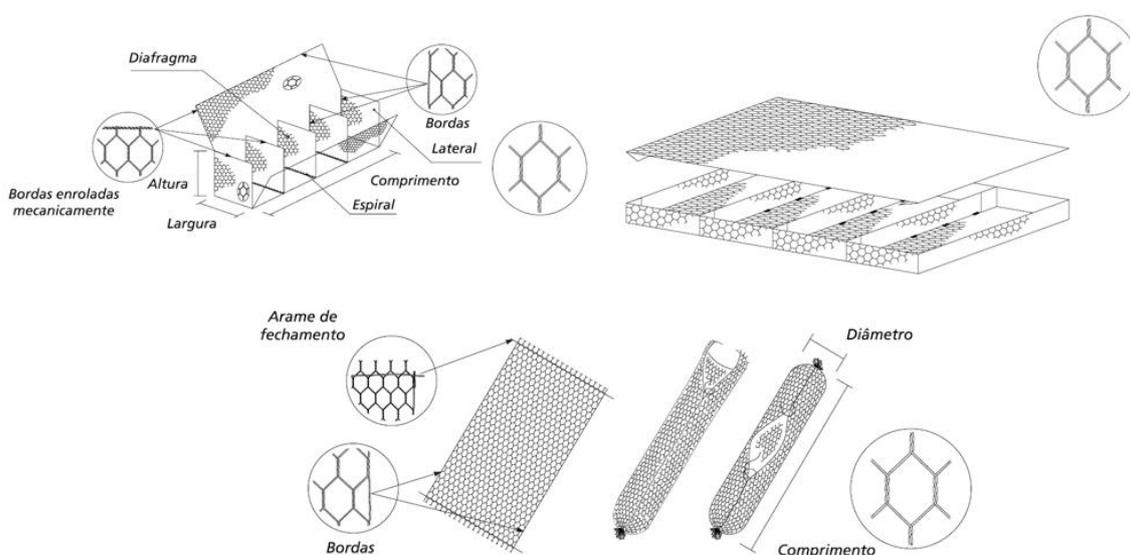


Figura 5. Gabião Caixa, Colchão Reno e Gabião saco, respectivamente, Fonte: Maccaferri, 2008

2.1. PRIMEIRAS OBRAS FLUVIAIS COM GABIÕES

As primeiras aplicações de Gabiões na história registram que tais peças eram constituídas de malhas vegetais preenchidas com pedras, porém, o grande avanço desta técnica se deu após uma grande obra fluvial executada na margem do rio Reno entre Casalecchio e Bolonha. Nesta obra os gabhões não eram mais constituídos de malhas vegetais, mas sim de malha de aço, o que conferia a estrutura uma maior resistência mecânica e a intempéries. Além da obra executada no rio Reno existiu também uma grande obra emergencial executada também na Itália no ano de 1951, a qual gerou um grande impacto positivo à solução.

2.1.1. PROTEÇÃO DE MARGEM DO RIO RENO

No início de outubro de 1893, Fracassi 2017 detalha que houve uma grande cheia na região de Casalecchio e Bolonha, a qual foi responsável pela ruptura de uma ponte ferroviária que ligava as cidades de Piacenza, Bolonha e San Felice (Figura 6), e responsável pela ruptura de um dique lateral presente nas margens do rio Reno na cidade de Casalecchio.

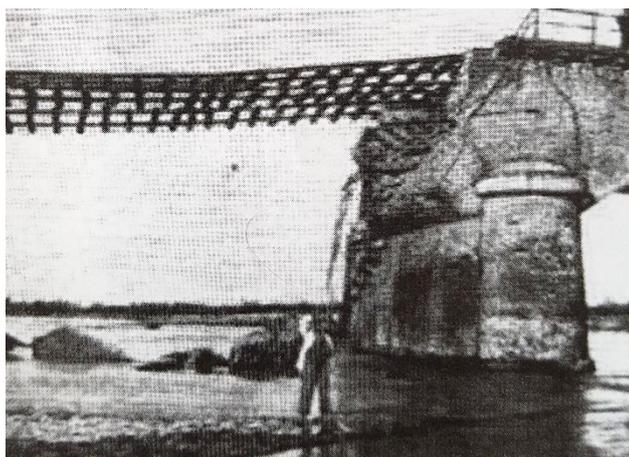


Figura 6. Ponte ferroviária rompida no ano de 1893, entre Piacenza e San Felice. Fonte: Fracassi 2017

Segundo Fracassi 2017, com a ruptura do dique lateral do rio Reno, houve um desvio do curso d'água natural justamente para o ponto de ruptura, fazendo o leito do canal de desvio que as fábricas locais utilizavam para energia hidráulica

ficasse seco, parando assim a produção local e desempregando muitos trabalhadores. A primeira opção tomada no local foi de executar um espigão na margem esquerda do rio e fechar a brecha rompida (Figura 7), porém tal solução foi destruída na cheia seguinte, e então decidiu-se reconstruir com Gabiões o espigão e o fechamento da brecha da margem (Figura 8). Esta segunda opção teve o êxito esperado resultando no enchimento do canal do rio Reno, na restauração dos trabalhos das indústrias locais e numa grande festa de comemoração organizada pelos operários locais, conforme pode-se observar na Figura 9.

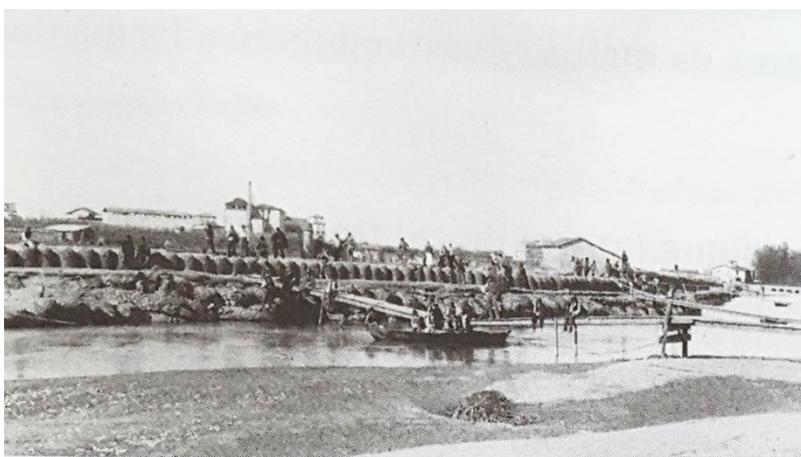


Figura 7. Espigão rio Reno, 1893. Fonte: Fracassi 2017

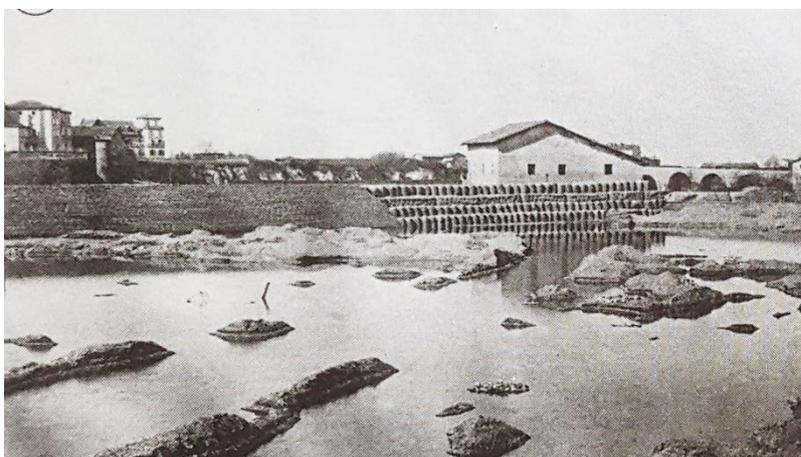


Figura 8. Fechamento da brecha com Gabiões, rio Reno, 1894. Fonte: Fracassi 2017



Figura 9. Comemoração dos operários com a finalização da obra, rio Reno, 1895. Fonte: Fracassi 2017

2.1.2. DIQUE LATERAL DO RIO PÓ, OCCHIOBELLO

Segundo a Infopedia 2018 o rio Pó, localizado nos Alpes Cotianos, e desagua no mar Adriático. É o maior curso d'água da Itália possuindo uma extensão de aproximadamente 652 km. Segundo Fracassi 2017, o rio Pó é confinado por diques laterais, e no mês de novembro de 1951 sofreu com 3 rupturas dos diques ao longo do seu curso, devido a uma cheia excepcional, Figura 10. Tal evento causou 84 mortes e deixou mais de 180 mil de desabrigados. O trecho afetado se encontrava a cerca de 70km do mar e este evento foi caracterizado pela combinação de fenômenos. No campo meteorológico, a chuva ocorreu em toda a bacia fazendo com que coincidisse no canal principal o pico de cheia de vários afluentes. No aspecto topográfico, existiam duas pontes a jusante das rupturas que por apresentarem uma redução hidráulica considerável, gerou um remanso a montante elevando ainda mais o nível d'água. Nos aspectos astronômicos e estruturais, maré alta de 1,51m na foz dificultando o escoamento final do rio, e em alguns pontos o dique do lado esquerdo era menor do que o projetado, respectivamente. A largura total das 3 brechas foi de 736m, vazão máxima passante pelas brechas de $9.500\text{m}^3/\text{s}$. Para cada brecha uma empresa distinta executou uma obra de fechamento e proteção em Gabiões, sendo que os trabalhos foram finalizados em 37 dias e foram utilizados mais de 100.000 m^3 de pedras para lançamento na margem e preenchimento das peças de Gabiões, Figura 11.



Figura 10. Brechas ocorridas nos diques laterais do rio do Pó, Itália, 1951. Fonte: Fracassi 2017



Figura 11. Início dos fechamentos das brechas do rio Pó com gabiões sacos, 1951. Fonte: Fracassi 2017

2.2. GABIÕES CAIXA

São elementos em forma de prisma retangular confeccionados em malha hexagonal de dupla torção, tipo 8x10 (NBR 10514-88), a partir de arames de aço BTC (Baixo Teor de Carbono) revestidos com a liga metálica que atua contra a corrosão (conforme a ASTM 856-98 e NBR 8964), podendo apresentar recobrimento plástico com polímero de engenharia (blenda polimérica, uma mescla de polímeros que atinge altos desempenhos a esforços mecânicos como abrasão e a ataques químicos em ambiente quimicamente agressivos) quando instalados em ambientes agressivos ou em presença constante de água. Os gabiões tipo caixa apresentam diafragmas inseridos de metro em metro durante o processo de fabricação e devem ser acompanhados de arames do mesmo tipo, para as

operações de amarração e atirantamento. Os gabiões tipo caixa (Figura 12) são indicados na aplicação de obras como, contenções a gravidade apoios de ponte, proteções de pontes, defesas hidráulicas, revitalização de cursos d'água, escadas dissipadoras de energia, barragens, obras defletoras (espigões), proteção de bueiros, marinas/píeres, etc. As dimensões dos gabiões caixa são padronizadas, sendo o comprimento múltiplo de 0,50m e 1,00m, variando de 1,50 a 5,00 m, cuja largura quase sempre é mantida constante em 1,00m e a altura pode ser de 0,50 ou 1,00 m.

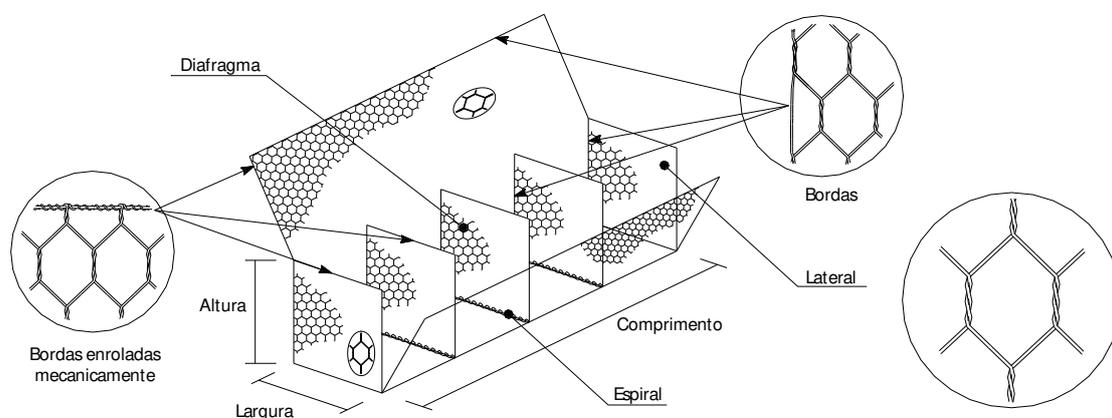


Figura 12. Esquema dos gabiões tipo caixa. Fonte: Relatório Técnico Maccaferri do Brasil

Segundo Leister P. (2008), os gabiões permitem acomodações e movimentações do terreno sem condenar sua eficiência e estabilidade. Devido a sua flexibilidade (Figura 13) é uma das únicas estruturas que independem de fundações profundas, mesmo nos casos extremos onde o solo de fundação não possui uma capacidade de suporte elevada. Outra característica do gabião é que nos casos de falha a estrutura permite um alto nível de deformação antes atingir a ruptura, propiciando assim uma detecção antecipada e possibilitando a realização de intervenções adequadas, mitigando falhas e evitando acidentes.

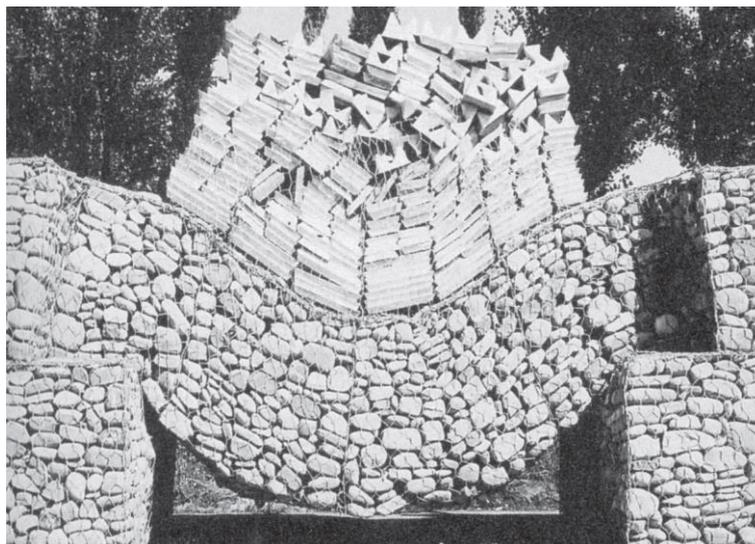


Figura 13. Prova de carga realizada pela Maccaferri, Itália, 1982. Fonte: Relatório Técnico Maccaferri do Brasil

Para o preenchimento dos gabiões são utilizadas pedras rachão com diâmetros médios entre 12 e 16cm, tais materiais devem apresentar um peso específico elevado na ordem de 2.5tf/m^3 e não devem se constituir materiais friáveis, ou seja, que tenha a possibilidade de perder massa ao longo do tempo, isto porque a estrutura trabalha com o seu próprio peso, e caso a redução do mesmo aconteça ao longo do tempo, pode-se perder a estabilidade do maciço, segundo Leister 2008. Na Tabela 1 pode-se observar alguns tipos de rochas que podem ser extraídos o rachão.

Tabela 1. Tipos de rocha que podem ser extraídos os rachões para preenchimento de Gabião. Fonte: Manual de contenções Maccaferri, 2008

Tipo de rocha	Peso específico (tf/m)
Basalto	2,5 – 3,3
Diorito	2,5 – 3,3
Gabro	2,7 – 3,1
Gnaisse	2,5 – 3,0
Granito	2,6 – 3,3
Mármore	2,5 – 3,3
Quartzito	2,65

Os Gabiões são entregues na obra dobrados em fardos. Retirado do fardo, cada elemento deve ser montado no formato paralelepípedo, para isto todas as suas arestas devem ser costuradas com um arame de mesma composição da malha hexagonal. Com a peça montada e costurada, transporta-se este material

até o local de sua implantação e então é executado o preenchimento das peças com pedras rachão, e a cada 1/3 da altura são inseridos duas linhas de tirantes que ligam a face frontal e posterior da peça. Todas as peças de Gabião são costuradas individualmente e são costuradas com as peças vizinhas gerando uma solução monolítica, ou seja, responde como um bloco único.

2.3. GABIÕES: TIPO COLCHÃO RENO

São elementos em forma de colchão confeccionados em malha hexagonal de dupla torção (NBR 10514-88), a partir de arames de aço BTC (Baixo Teor de Carbono) revestidos com a liga metálica que atua contra a corrosão (conforme a ASTM 856-98 e NBR 8964), podendo apresentar recobrimento plástico com polímero de engenharia (blenda polimérica, uma mescla de polímeros que atinge altos desempenhos a esforços mecânicos como abrasão e a ataques químicos em ambiente quimicamente agressivos) quando instalados em ambientes agressivos ou em presença constante de água. O colchão Reno é formado por um pano de base e uma tampa, ambos são confeccionados com a malha hexagonal dupla torção. A peça da base é subdividida em células por diafragma de parede dupla, localizados na transversal do colchão a cada 1m, Figura 14. A força máxima ao puncionamento da malha que constituiu o colchão deve ser de 15,5kN, com resistência da conexão de borda de 21 kN/m, ambas as resistências segundo a norma ASTM A975. Os colchões Reno (Figura 15) são indicados na aplicação de obras como, proteção de margem, canalizações, proteção contra solapamento, revestimento de taludes e bacia de dissipação.

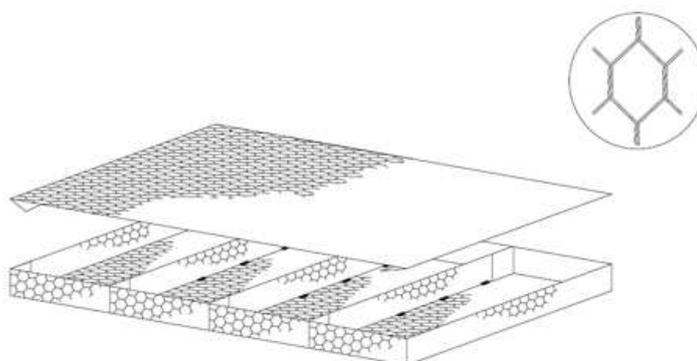


Figura 14. Desenho da peça Colchão Reno. Fonte: Maccaferri, 2008

As peças de colchão Reno chegam dobradas em fardos. Retirando a peça do fardo pode-se montar a base do colchão e seus respectivos diafragmas de

parede dupla, sendo que toda a peça deve ser costurada com um arame de mesma composição da malha hexagonal. O material de preenchimento é o rachão, porém com diâmetros menores ao aplicado no Gabião caixa, em torno de 90mm as 120mm. A diminuição do diâmetro do rachão ajuda na dissipação da energia da água que passa por dentro da peça e atinge o solo de base, visto que o colchão finalizado apresenta cerca de 40% de vazios. São executados tirantes (2 por m²) ligando a base do colchão com a tampa do mesmo, tais tirantes geram um maior confinamento das pedras de enchimento, garantindo desta forma um sistema mais estável hidraulicamente, Figura 15. Após o fechamento da peça, com a sua respectiva tampa o colchão Reno está pronto para trabalhar como proteção contra erosão. Na interface do colchão com o solo deve-se aplicar uma camada de geotêxtil (filtro que permite a passagem da água e não permite a passagem do solo). Tal geossintético tem a função de ajudar na dissipação da energia da água que passa por dentro da peça e impossibilita o bombeamento do solo de base para dentro do curso d'água. Todas peças de colchão Reno devem ser costuradas uma na outra a fim de gerar o mesmo efeito dos Gabiões caixa, ser uma solução monolítica.

O colchão Reno diferentemente do Gabião caixa não possui nenhuma função estrutural na margem a ser protegida, ou seja, o maciço deve estar estável geotecnicaamente, visto que o colchão irá trabalhar apenas hidraulicamente, impossibilitando o início de um processo erosivo que poderia ser causado pelo escoamento.

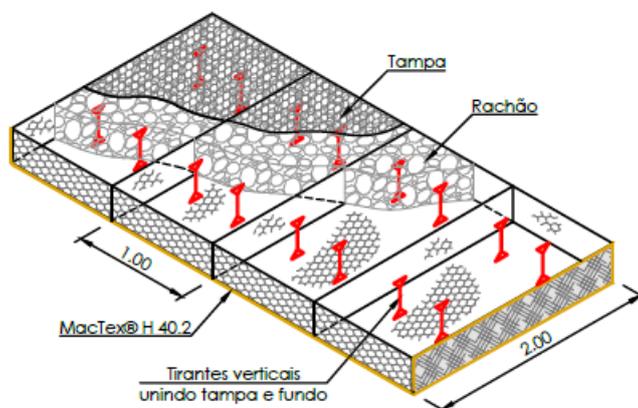


Figura 15. Tirantes aplicados no colchão Reno. Fonte: Maccaferri, 2008

2.4. BARRAGENS EM GABIÕES

As barragens em gabiões tiveram suas primeiras aplicações realizadas por volta de 1930 na Itália (Figuras 16 e 17). Segundo Agostini et al., (1981) a utilização de estruturas flexíveis como barramentos de conservação de solo, sistematização de cursos d'água e canalizações são conhecidas universalmente. Esta técnica permite a execução de pequenas e médias barragens, sendo alturas variáveis de poucos metros até 20m de altura



Figura 16. Barragem em Gabiões em Porretta, Bolonha, Itália, 1930. Fonte: Agostini et al., 1981



Figura 17. Barragem em Gabiões em Porretta, Bolonha, Itália, 1965. Fonte: Agostini et al., 1981

A maior barragem em Gabiões executada no Brasil possui cerca de 15m de altura, e foi realizada no município de Balbina, Amazonas, em 1987 (Figuras 18 e 19).



Figura 18. Execução de Barragem em gabiões, Balbina, Amazonas, Brasil. Fonte: Maccaferri do Brasil 1987

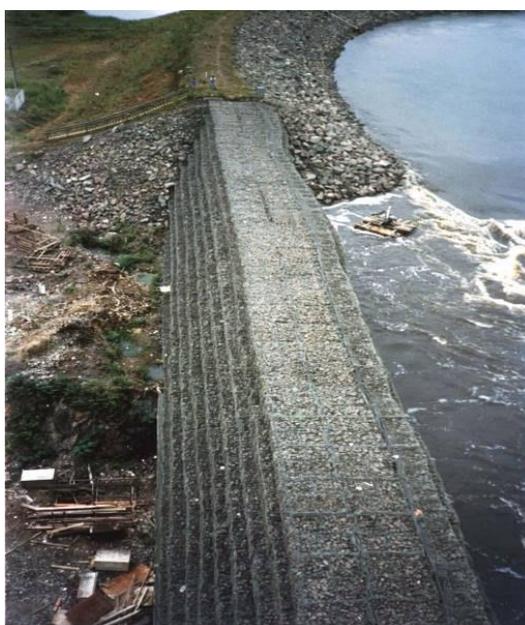


Figura 19. Barragem em gabiões executada, Balbina, Amazonas, Brasil. Fonte: Maccaferri do Brasil 1987

Outra barragem expressiva executada no território nacional é a barragem de controle de cheias do Rio Queimado (Figuras 20 a 23), logo a montante da área do Parque de Exposições do Centro de Eventos, locada a 5,5km da nascente do Rio dos Queimados (Morro da Antena do bairro São José) e a 3km da área central de Concórdia, Santa Catarina, com uma área de contribuição hidrográfica de 8,31km². O objetivo da barragem era amortecer o pico de vazão de 72m³/s, conforme estudos hidrológicos, para 17m³/s, através da retenção do volume de 199.000m³ de água e três descargas de fundo, para um tempo de recorrência de 100 anos para condições futuras. Este projeto foi desenvolvido pela MPD Saneamento LTDA para a Prefeitura Municipal de Concórdia (Projeto MPD). A elevação máxima do nível d'água a montante da barragem poderia gerar uma descarga de fundo ($\phi = 900\text{mm}$)

com velocidades em torno de 10m/s, para isso foram previstos blocos maiores de pedra ($\phi > 75\text{cm}$), por cima do colchão Reno do fundo da bacia ($e=23\text{cm}$) e ainda uma contrabarragem no final da dissipação com 1m de altura em gabiões caixa. (Projeto MPD)



Figura 20. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010



Figura 21. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010



Figura 22. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010



Figura 23. Barragem do Rio Queimado Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010

Os barramentos em Gabiões podem ser permeáveis ou impermeáveis. Os barramentos impermeáveis impossibilitam a passagem da água por dentro da estrutura de Gabião, fazendo com que o escoamento seja direcionado para o vertedor de crista, que pode ser trapezoidal ou retangular, esta estrutura se assemelha bastante a um barramento de concreto convencional, entretanto segundo Hassan (2010) a barragem impermeável muitas vezes impede o transporte longitudinal de substâncias físicas e químicas na água, tendo eventualmente um impacto negativo no ambiente aquático. O barramento permeável em Gabiões possibilita a passagem parcial do escoamento através dos vazios encontrados dentro da estrutura, que é preenchida por materiais pétreos.

As barragens em gabhões podem ser classificadas em 3 tipos, no que diz respeito ao paramento a jusante, sendo eles, paramento a jusante vertical, paramento a jusante em degraus e paramento a jusante inclinado, conforme Figura 24.



Figura 24. Barragem em Nova Lima, Minas Gerais, Brasil - Paramento vertical. Fonte: Maccaferri do Brasil



Figura 25. Barragem em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil - Paramento em degraus. Fonte: Maccaferri do Brasil



Figura 26. Barragem em Paramirim, Bahia, Brasil - Paramento inclinado. Fonte: Maccaferri do Brasil

A jusante das barragens deve-se trabalhar com uma bacia de dissipação, que pode ser realizada através de um revestimento do leito a jusante da barragem, que encerra no posicionamento de uma contrabarragem, que se constitui por estrutura transversal de baixa elevação com a finalidade de armazenar, temporariamente, um colchão de água para a dissipação da queda de água oriunda do vertedor, e a jusante da mesma mais uma proteção de pé da contrabarragem. Segundo Agostini et al., (1981) as bacias de dissipação podem ser classificadas como elevadas (figura 27) e em depressão (figura 28), sendo a primeira responsável por desvincular o funcionamento da bacia com as condições encontradas a jusante, e a segunda vincular o funcionamento da bacia com as condições encontradas a jusante.

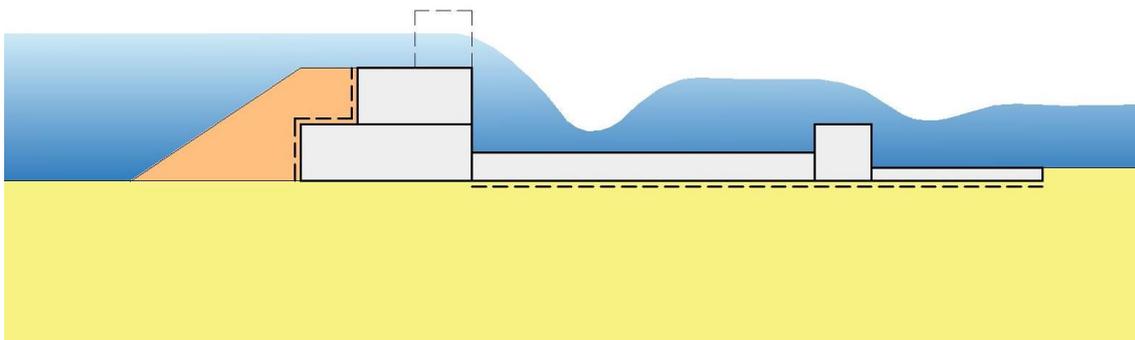


Figura 27. Esquema de barramento em gabiões com face vertical e bacia elevada. Fonte: Próprio autor

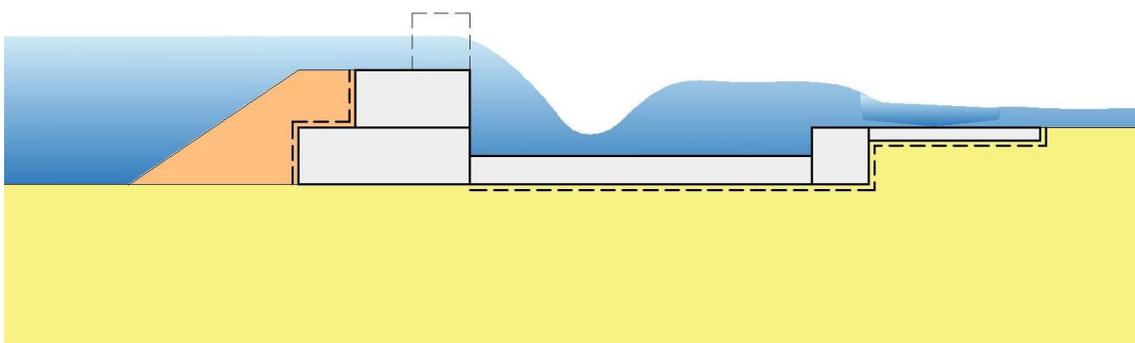


Figura 28. Esquema de barramento em gabiões com face vertical e bacia em depressão. Fonte: Próprio autor

2.5. VERTEDORES

O vertedor é uma estrutura dimensionada para extravasar o volume das cheias que possam exceder a capacidade de armazenamento dos reservatórios, com o objetivo de proteger a barragem contra o galgamento (Magela, 2015).

Em geral os vertedores são compostos por cinco elementos:

- Canal de entrada
- Estrutura de controle
- Calha de descarga
- Bacia de dissipação
- Canal de restituição

As estruturas de controle podem ser inicialmente classificadas como de superfície ou de fundo. A estrutura de controle de superfície ou soleira, permitem a passagem de água e o respectivo rebaixamento de nível acontecer até a cota superior da soleira, esvaziando parcialmente o volume a montante. Já a estrutura de controle de fundo permite o esvaziamento total do volume armazenado a montante, visto que seu posicionamento é realizado em uma cota próxima a base do barramento. (Magela, 2015).

Para as barragens em Gabiões a estrutura de controle mais utilizada é a soleira de superfície livre, posicionada na parte superior da barragem, executada com as próprias peças de Gabiões caixas. Alguns pontos são importantes se destacar em relação a soleira de gabiões, a passagem de animais ou homens sobre a soleira não provocam danos a malha hexagonal, porém a passagem de água, muitas vezes com partículas de sólidas, podem gerar abrasão no material, reduzindo assim a seção do arame que constitui a malha hexagonal dupla torção. Outro problema que pode acontecer é a corrosão química do material, visto que o escoamento pode apresentar substâncias quimicamente agressivas. Com a finalidade de prolongar a vida útil da soleira é comumente utilizado um revestimento adicional de concreto sobre a soleira em Gabiões. Como as estruturas de Gabiões são flexíveis, as mesmas podem sofrer acomodações nos primeiros períodos de obra, aconselha-se então o revestimento adicional de concreto a soleira, somente após a estabilização destas acomodações, visto que a rigidez do concreto não é

compatível com a rigidez do gabião, o que poderia iniciar um processo de fissuração com concreto caso o mesmo fosse realizado logo no início da obra, antes mesmo das acomodações do gabiões acontecerem. O revestimento adicional de concreto nas soleiras deve ser armado conforme a Figura 29 (Agostini et al., 1981).

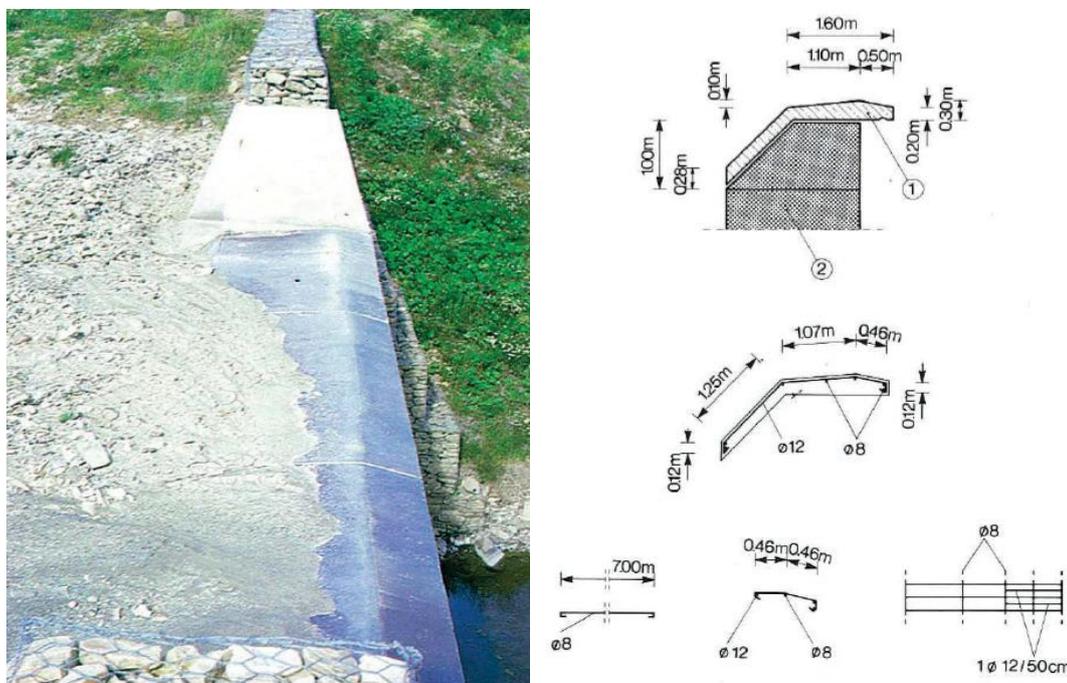


Figura 29. Soleira de Gabião revestida com concreto e detalhamento da armadura do concreto, respectivamente. Fonte: Agostini et al., 1981

2.5.1. SOLEIRAS DE SUPERFÍCIE LIVRE

A presença da soleira de superfície livre, que é essencialmente uma parede com abertura de determinada forma geométrica, colocada, na maioria dos casos, perpendicularmente à corrente, eleva o nível d'água a montante até que este nível atinja uma cota suficiente para produzir uma lâmina sobre o obstáculo, compatível com a vazão descarregada (Porto 2006).

As soleiras também podem ser classificadas como de parede delgada (Figura 30) ou espessa. A soleira de parede delgada trata-se de uma placa delgada com superfície superior horizontal e biselada, posicionada perpendicularmente ao escoamento, fazendo com que a lâmina vertente tenha pouco contato com a superfície da soleira. Este tipo de soleira tem sido exaustivamente estudado ao longo dos anos (Porto 2006). Para a classificação deste tipo de soleira, a mesma deve respeitar a seguinte condição:

$$e < \frac{2}{3} \times h \quad (1)$$

e = Espessura da parede da soleira (m)

h = Carga sobre a soleira (m)

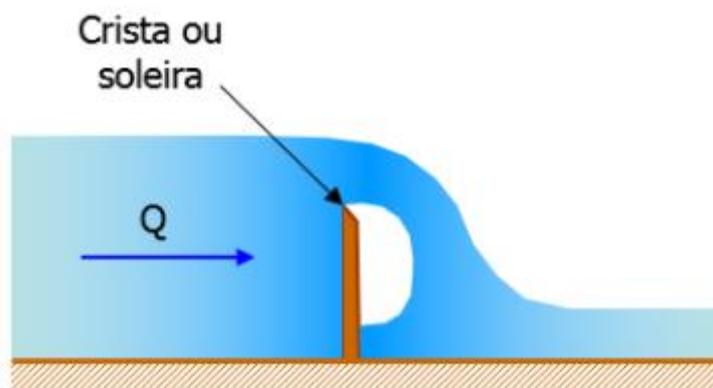


Figura 30. Soleira de parede delgada. Fonte: blackboard, 2011

A soleira de crista delgada não é somente um artifício para medição de vazão, mas também pode possuir a funcionalidade de extravasar a lâmina excedente de um barramento nos casos onde a elevação do nível d'água a montante atingi o nível máximo da barragem. O escoamento passante pela soleira pode se assemelhar a uma trajetória de projétil, onde a partícula de água se desloca a jusante com a componente horizontal da velocidade, sendo submetida a ação da gravidade. Em função do tempo de trajetória teremos um deslocamento horizontal alcançado pelo escoamento, equação 2 (Ven te Chow, 2005)

$$x = V_0 \times t \times \cos \theta \quad (2)$$

x = Distância horizontal alcançada pelo escoamento passante na soleira (m)

V_0 = Velocidade do escoamento no $x=0$ (m/s)

t = Tempo da trajetória (s)

$\cos \theta$ = Ângulo de inclinação da velocidade V_0 com a horizontal

Os vertedores denominados soleira delgada possuem uma pequena área de contato no topo com o escoamento passante, uma área não significativa (Canholi, 2014). Para a verificação da vazão passante pelo vertedor temos a seguinte equação:

$$Q = C_v \times L_u \times \sqrt{2 \times g} \times h^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Q = Vazão em m³/s

C_v = Coeficiente de vazão (adimensional)

L_u = Comprimento útil da soleira (m)

h = Carga total acima da soleira $h + \frac{v^2}{2 \times g}$ (m)

g = Aceleração da gravidade (m/s²)

O coeficiente de vazão depende do tipo de soleira, delgada (Figura 31) ou espessa, e da altura da soleira sobre o fundo e das condições de aproximação nas laterais.

Tabela 2. "Cv" para soleiras delgadas. Fonte: Próprio Autor

P/h	C _v
0,2	0,45
0,5	0,48
0,7	0,48
1,0	0,49
1,5	0,43
>2,5	0,50

Fonte: Canholi, 2014

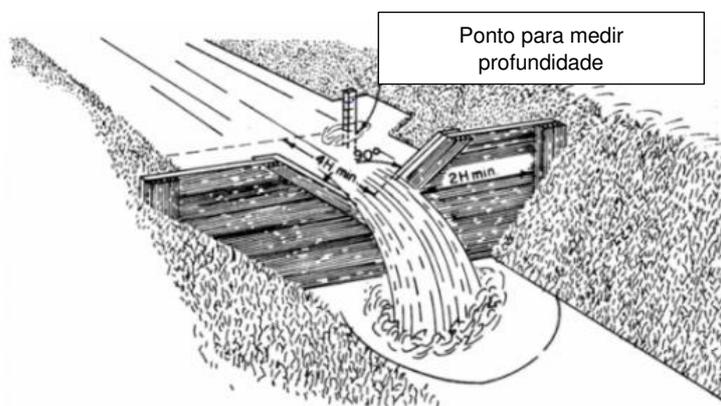


Figura 31. Soleira delgada. Fonte: Martins; Euler

Caso a espessura da parede da soleira seja superior a dois terços da carga a estrutura é classificada como soleira espessa (Porto, 2006). Conforme já abordado, a soleira de parede espessa é uma estrutura robusta que através da sua presença transversal ao escoamento é capaz de gerar um aumento do nível d'água a montante da obra (Porto, 2006). Outra forma de garantir que a soleira é de parede espessa, é avaliando a aderência do escoamento com o plano horizontal da soleira

(Canholi, 2014), pois neste caso têm-se uma aderência da veia líquida com o vertedor da soleira, além de ser observada uma depressão do nível d'água nas proximidades do bordo de montante (PORTO, 2006).

As barragens em gabiões em quase todos os casos são consideradas como soleiras de parede espessa, visto que os gabiões são estruturas que trabalham na estabilização do solo e retenção do perfil de água a montante através da gravidade. O barramento de gabião deve atender os fatores de segurança de cunho geotécnico e estrutural (Figura 32), como deslizamento, tombamento, ruptura de fundação, ruptura global do maciço e ruptura interna do maciço (Leister, 2008). Segundo Canholi (2006), quando a espessura da soleira (e) for maior do que $2h$, o vertedor é considerado como soleira francamente espessa.

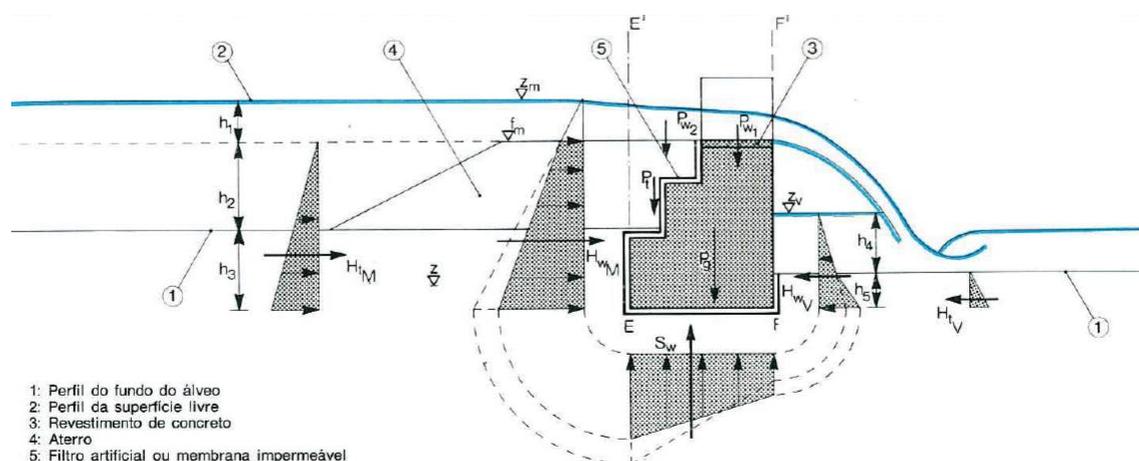


Figura 32. Empuxos atuantes em uma barragem em gabiões. Fonte: AGOSTINI et al., 1981

As barragens em gabiões comumente são projetadas com vertedores de crista de parede espessa, cuja a geometria pode ser retangular, trapezoidal, ou em casos especiais duplo trapézio figuras 33,34 e 35.



Figura 33. Barragem em gabiões com vertedor retangular, Arapongás, Paraná, Brasil.
Fonte: AGOSTINI et al., 1981

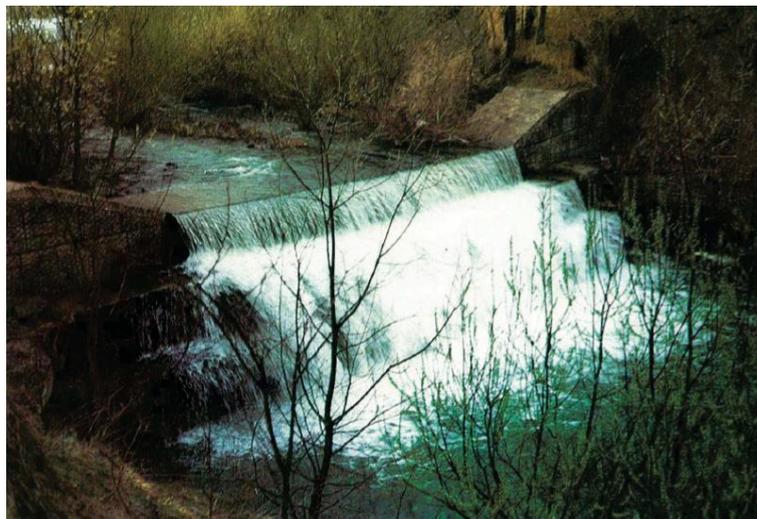


Figura 34. Barragem em gabiões com vertedor trapezoidal, Castel dell'Alpi, Bolonha, Itália. Fonte: AGOSTINI et al., 1981



Figura 35. Barragem em gabiões com vertedor duplo trapézio, Concórdia, Santa Catarina, Brasil. Fonte: Atualfm, 2010

Devido as alturas máximas das barragens em gabiões serem em torno de 20m, muitos vertedores presentes nestes barramentos podem ser classificados como vertedores de baixa queda. Segundo M. Fernandes e J. Ota (2016), os vertedouros de baixa queda são caracterizados pela pequena diferença entre os níveis de montante e de jusante, fazendo com que trabalhem em condições afogadas com conseqüente redução da sua capacidade de descarga.

Nos barramentos em gabiões os vertedores são locados na parte central superior da estrutura, com um comprimento que não gere um remanso inadmissível a montante e também seja capaz de concentrar a lâmina vertente longe das margens onde a estrutura está embutida (Agostini et al. , 1981). A cota da soleira pode ser determinada de acordo com a necessidade e intenção do projeto, visto que para armazenamento de água de um lago por exemplo, a cota será similar a cota normal do mesmo lago, já para um barramento de sedimentação e correção da declividade do talvegue, as cotas das soleiras serão definidas através do perfil de equilíbrio alcançada com a sistematização do escoamento (Agostini et al., 1981). Devido a não uniformidade do escoamento de aproximação e ao atrito gerado entre a lâmina vertente com a soleira pode-se determinar a vazão do vertedor de parede espessa através da seguinte equação (Porto, 2006).

$$Q = C_d \times \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \times \sqrt{g} \times b \times h^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

C_d = Coeficiente de vazão (adimensional)

b = Largura do canal de chegada (m)

h = Carga de água a montante (m)

No caso da soleira possuir um comprimento longo ($e > 3xh$), os filetes de água escoarão paralelamente a soleira, com pressão hidrostática, e no final da extremidade de jusante da soleira será criada uma lâmina crítica. Porém caso a carga seja muito elevada ($0,4 \times e < h < 1,5 \times e$), o vertedor torna-se estreito para que os filetes de água se alinhem paralelamente com a soleira, fazendo com que o padrão do escoamento seja curvilíneo, não atingindo a profundidade crítica na extremidade de jusante da soleira (Porto, 2006).

O coeficiente de vazão é um assunto que ainda deve ser bastante estudado e desenvolvido, visto os diversos resultados controversos obtidos através de estudos experimentais (Porto 2006). Os dados da tabela 3 foram adaptados por King (1954) para vertedores de soleira espessa.

Tabela 3. Valores de coeficiente de vazão “ C_d ” para vertedores retangulares de soleira espessa. Fonte: Próprio Autor

Carga H (m)	Comprimento “e” da soleira em metros										
	0,15	0,23	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,20	1,50	3,00	4,50
0,06	0,906	0,890	0,871	0,848	0,822	0,803	0,790	0,771	0,758	0,806	0,868
0,12	0,945	0,906	0,881	0,855	0,845	0,842	0,835	0,822	0,809	0,829	0,874
0,18	0,997	0,936	0,890	0,845	0,842	0,842	0,868	0,871	0,874	0,874	0,874
0,24	1,068	0,984	0,923	0,868	0,842	0,842	0,864	0,868	0,868	0,871	0,855
0,30	1,075	1,016	0,965	0,890	0,861	0,855	0,858	0,864	0,868	0,868	0,851
0,36	1,075	1,036	0,997	0,926	0,874	0,858	0,858	0,864	0,861	0,871	0,855
0,42	1,075	1,055	1,036	0,945	0,897	0,868	0,855	0,858	0,858	0,864	0,855
0,48	1,075	1,065	1,062	0,994	0,936	0,890	0,868	0,861	0,858	0,858	0,851
0,54	1,075	1,075	1,072	0,994	0,932	0,887	0,868	0,861	0,858	0,858	0,851
0,60	1,075	1,072	1,068	0,981	0,923	0,894	0,881	0,868	0,858	0,858	0,851

Fonte: Porto, 2006

Segundo Agostini et al. (1981), a vazão passante por um vertedor retangular simples de parede espessa pode ser determinada através da seguinte equação.

$$Q = C_d \times L \times h \times \sqrt{2 \times g \times h} \quad (5)$$

C_d = Neste caso Agostini et al. (1981), indicam os valores de 0,385 até 0,600 aproximadamente. O valor mais baixo é utilizado para vertedores de soleira espessa não afogados, com velocidade a montante muito pequena, fazendo com que as cargas totais sejam similares as piezométricas.

L = Comprimento do vertedor (m)

h = Carga a montante (m)

Quando o vertedor apresentar formas trapezoidais ou parabólicas, a relação da vazão de cheia e a carga a montante poderá ser obtida impondo a formação do estado crítico sobre a soleira, a cada valor de profundidade crítica sobre a soleira corresponde de fato a uma velocidade crítica (Agostini et al., 1981):

$$V_c = \sqrt{\frac{g \times a}{b}} \quad (6)$$

a = Área molhada m^2 , para uma profundidade crítica

b = Largura da superfície livre (m)

V_c = Velocidade crítica (m/s)

$$Q_c = V_c \times a \quad (7)$$

Q_c = Vazão crítica m^3/s

Os barramentos em Gabiões de uma forma geral são desenvolvidos com soleiras espessas, executados com as mesmas peças da estrutura da barragem, com revestimento adicional de concreto, e conforme apresentado neste item são estruturas que são utilizadas há décadas, reforçando a confiabilidade e segurança da solução.

Para as barragens em Gabiões os vertedores espessos de crista comumente apresentam contrações laterais constituídas pelas próprias peças de Gabião caixa. As situações encontradas nas obras não necessariamente são reproduzidas sempre nos modelos de laboratório. Segundo Porto 2006 uma destas situações encontradas em campo que não perfeitamente reproduzidas em um laboratório, na maioria dos casos, é a contração lateral dos vertedores, visto que na obra existe a largura do curso d'água que é maior do que a largura do vertedor. Com a finalidade de manter válidas as equações teóricas, considera-se em vez da largura da soleira,

a largura efetiva para o escoamento. Neste trabalho foi desconsiderada a contração lateral, visto que os modelos físicos reduzidos foram construídos com uma largura de 1m sem contração lateral, e os modelos numéricos foram desenvolvidos com uma largura da soleira igual a 0,1m, devido ao software utilizado solicitar um valor para a terceira dimensão, porém os resultados foram avaliados apenas em duas dimensões.

2.5.2. BACIA DE DISSIPAÇÃO

Com o aumento de energia cinética gerado no escoamento através da queda livre de vertedores retangulares de pequenas e médias barragens, faz-se necessária uma estrutura de dissipação de energia a jusante do barramento, a fim de proteger o próprio barramento assim como o leito a jusante. “A dissipação de energia de uma barragem está intimamente ligada com o dimensionamento do vertedor, particularmente à vazão específica “ q ”, à diferença de nível d’água a montante e a jusante, e às condições do leito a jusante (Novak et al., 2007). Os dissipadores de energia são classificados segundo dois conceitos básicos, aqueles nos quais a dissipação de energia acontece através de um jato no ar e no maciço rochoso, e os que geram a dissipação de energia através do ressalto hidráulico (Magela, 2015), iremos abordar com maior ênfase este último, pois o mesmo é aplicado a barragens em Gabiões. De um ponto de vista prático o ressalto hidráulico é um meio útil de dissipar o excesso de energia em um escoamento supercrítico, seu mérito é que através desta dissipação de energia pode-se minorar a força erosiva do escoamento, protegendo desta forma a base da estrutura (Chow, 2005). Segundo Porto (2006), o ressalto hidráulico é um fenômeno que ocorre na transição de um escoamento torrencial ou supercrítico para um escoamento fluvial ou subcrítico, sendo que a lâmina d’água é caracterizada por uma mudança abrupta através de uma elevação brusca em uma pequena distância, acompanhada de uma instabilidade superficial, onde é possível ver a olho nu as ondulações e perturbações geradas no escoamento através da entrada de ar. O ressalto hidráulico é um processo de transformação de energia cinética do escoamento supercrítico em energia potencial no escoamento subcrítico na bacia de dissipação (Magela, 2015). Nos mecanismos de dissipação que trabalham com o ressalto

hidráulico, incluem-se as bacias de dissipação, os quais os formatos mais conhecidos foram padronizados pelos americanos e russos (Magela, 2015). A perda de carga no ressalto é igual à diferença de carga antes e depois do salto:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2 \times g} \right) - \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2 \times g} \right) \quad (8)$$

Além da definição do ressalto, alguns itens relevantes para a determinação correta da bacia de dissipação adequada a obra são:

- Topografia
- Geologia
- Vazão
- Comparações econômicas
- Experiência do projetista

Mesmo com a utilização das bacias de dissipação, ainda se tem verificado muitas erosões a jusante da obra, erosões estas que não devem ameaçar a estabilidade de toda a estrutura (Magela, 2015). A bacia de dissipação pode ser projetada através de anos de experiência e observações de estruturas similares, ou mediante a investigações de modelo, ou através de ambos, através destas verificações prévias pode-se determinar a necessidade de acessórios adicionais a bacia, como no caso a contrabarragem, que será apresentado mais à frente (Chow, 2005).

As bacias de dissipação são responsáveis por dissipar parcialmente a energia da água oriunda da queda gerada pelo vertedor. Em muitos casos em que a obra for realizada para correção de declividade longitudinal, quando a carga a ser dissipada for pequena, e o solo da base for constituído por um material grosso ou muito consistente, pode-se evitar o revestimento da bacia de dissipação, e pode-se determinar a profundidade de erosão máxima do terreno e engastar a estrutura abaixo de tal nível, visto que a energia da água será capaz de escavar o solo da base através da erosão até um certo ponto, sendo que durante esta dinâmica forma-se um colchão de água na base da erosão capaz de dissipar a própria energia gerada pela queda da lâmina do vertedor (Figura 36, Agostini et al. , 1981). Este tipo de estrutura demonstra claramente que para manter o leito da bacia de

dissipação fixo deve-se trabalhar com materiais de revestimento que possam garantir a proteção do leito contra o processo erosivo causado pela queda d'água, neste trabalho será estudado o modelo com bacia de dissipação revestida.

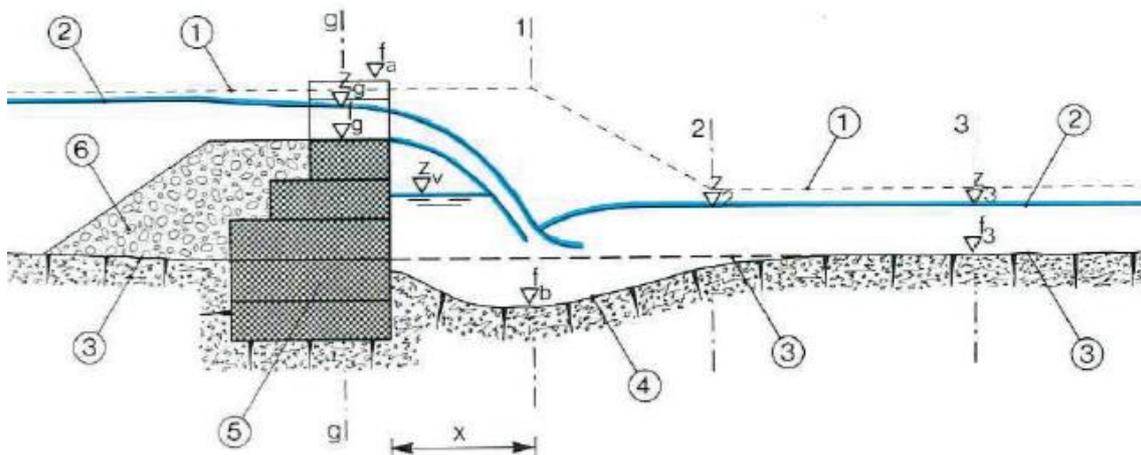


Figura 36. Esquema de barragem em Gabiões sem revestimento de bacia. Fonte: Agostini et al., 1981

A velocidade inicial horizontal da queda d'água pelo vertedor é quase a velocidade crítica:

$$v_c = \sqrt{g \times (z_g - f_g)} \quad (9)$$

V_c = Velocidade crítica (m/s)

g = Gravidade (9,81 m/s²)

z_g = Altura da Lâmina passante pela soleira espessa (m)

f_g = Altura da soleira (m)

Segundo AGOSTINI et al. (1981), a distância "X" do vertedor até o ponto de queda na bacia pode ser determinado por:

$$X = \sqrt{2 \times (z_g - f_g) \times (z_g - f_3)} \quad (10)$$

f_3 = Altura do álveo a jusante da bacia (m)

Para o cálculo da profundidade de escavação da bacia de dissipação sem revestimento, pode-se utilizar uma das equações mais conhecidas proposta por Schoklitsh (1932):

$$z_3 - f_b = 4,75 \times \frac{(z_0 - z_3)^{0,2} \times q^{0,57}}{d_t^{0,32}} \quad (11)$$

Onde o d_t é o diâmetro da peneira que permite passagem de 90% em peso do material do álveo, em mm. Através da Figura 37 pode-se determinar rapidamente a profundidade de escavação (z_3-f_b) em função de algumas vazões unitárias (4 a 10m³/s.m), diâmetros d_t , e da diferença de nível d'água de montante a jusante da estrutura (z_0-z_3).

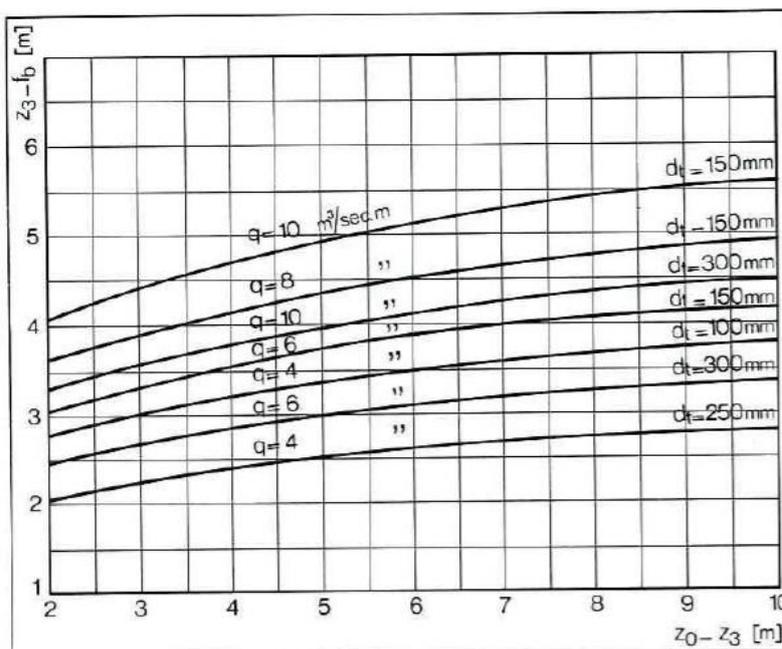


Figura 37. Ábaco para determinação da profundidade de escavação. Fonte: Agostini et al., 1981

Avaliando as equações 9, 10 e 11 pode-se observar que a profundidade de escavação pode ser reduzida se o nível d'água a jusante, controle de saída, for maior (z_3-f_3), e para isto pode-se adotar uma contrabarragem a jusante da escavação, gerando assim uma camada de água a montante capaz de ajudar na dissipação da lâmina vertente da soleira, conforme pode-se observar na Figura 38.

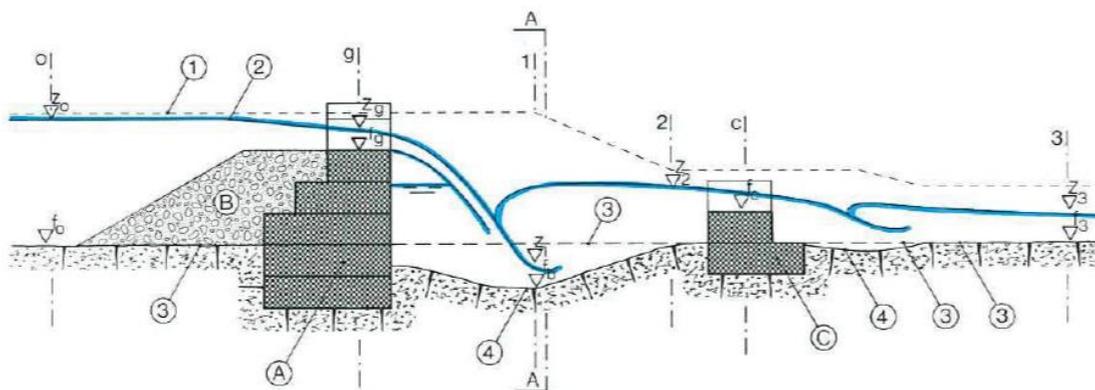


Figura 38. Soleira em gabiões com a presença de uma contrabarragem. Fonte: Agostini et al., 1981

Neste caso o escoamento sobre a contrabarragem é determinado por:

$$Q = u \times l_c \times (z_2 - f_c) \times \sqrt{2 \times g \times (z_2 - f_c)} \quad (12)$$

Q = Vazão de projeto (m^3/s)

u = Coeficiente de vazão (variável de 0,4 a 0,6)

l_c = Comprimento da soleira da contrabarragem (m)

f_c e z_2 = Cotas, VIDE Figura 38 (m)

Com a presença da contrabarragem tem-se um acúmulo de água na bacia, o que favorece a dissipação, visto que, a vazão vertente impactará primeiramente este colchão de água antes mesmo de atingir a base desprotegida. Independente do nível de dissipação gerado pela presença da contrabarragem, recomenda-se também a execução de uma plataforma de deformação logo a jusante da contrabarragem a fim de proteger a mesma contra erosões de base. Pode-se observar que a cota final do escoamento a jusante da contrabarragem, o z_3 , é de total importância para o dimensionamento da bacia de dissipação, esta cota pode ser determinada por uma aproximação, utilizando a equação de Manning, considerando um escoamento permanente uniforme no álveo a jusante, esta aplicação não se afasta muito das condições reais, a não ser que o perfil de solo seja muito acidentado, neste caso Agostini et al., indica a seguinte equação:

$$Q = \chi \times \Omega \times \sqrt{R \times i} \quad (13)$$

Q = Vazão de projeto (m³/s)

Ω = Área molhada dividida pela altura da lâmina d'água ($z_3 - f_3$), (m²)

χ = Coef. de resistência relativo à mesma profundidade (Colebrook-White) (m^{1/2} s⁻¹)

R = Raio hidráulico relativo a mesma profundidade (m)

i = Declividade do fundo

Como a equação 13 não apresenta diretamente o z_3 , a determinação da cota deverá ser realizada através de tentativas, ou seja, utilizando diversos z_3 na equação até que o resultado se iguale a vazão de projeto.

Mesmo com inúmeros ensaios de bacias de dissipação já realizados ao longo da história, pode-se perceber que, tais estudos foram realizados por profissionais diferentes, em laboratórios diferentes, além de que as estruturas ensaiadas não eram exatamente idênticas, isso gera um grau de incerteza sobre tais soluções de bacia de dissipação. Peterka, 1984, resolveu desenvolver um estudo que pudesse englobar todos os tipos de bacia em um trabalho, diminuindo assim o grau de incerteza da aplicação. Dificilmente a bacia de dissipação é projetada para confinar todo o comprimento do ressalto, primeiro porque isto deixaria a estrutura muito cara, segundo porque existem alguns recursos que podem ser utilizados na bacia de dissipação que são capazes de mudar as características do ressalto hidráulico, obtendo similar desempenho com uma bacia menor. Tais recursos podem ser utilizados nas bacias de dissipação para mudar as características do ressalto, e aumentar o desempenho da bacia, devendo ser autolimpantes. Muitos fatores podem influenciar na estabilidade da proteção com pedras, o peso individual das pedras, a geometria das grandes pedras, a graduação da camada das pedras, a espessura da camada de proteção, o tipo de filtro ou material localizada abaixo das pedras de proteção, a inclinação da proteção de pedras, entre outras variáveis. As demandas conhecidas que podem influenciar diretamente na estabilidade da proteção em pedras são as velocidades, direção do escoamento, vórtices e ondas. Um dos erros primários para a falha da proteção com pedras, é o sub dimensionamento do tamanho das pedras individuais e da camada de proteção como um todo. Outro ponto muito observado é que em algumas obras o tamanho de pedra utilizada não cumpre com o tamanho

especificado no projeto. As pedras de proteção devem ser bem graduadas e selecionadas, visto que desta forma podemos contar com o travamento, embricamento das partículas pétreas. As pedras de preferência não devem possuir faces retas, visto que esta geometria favorece o deslizamento das camadas e pouco embricamento. Foram realizados vários ensaios com tamanhos de pedras de proteção em função das velocidades atuantes.

Os testes que falharam foram indicados como “F” na Figura 39, e os demais que tiveram êxito foram plotados na Figura 36 como “S”, onde podemos observar a curva mínima para determinação do tamanho de pedra de proteção. Segundo N.K. Berry, Universidade do Colorado (1948), foi determinada uma curva gráfica ilustrada na Figura 36, e para esta curva foi apresentada a equação 14, onde as partículas possuem um peso específico de 2,65tf/m³.

$$V_b = 2.57 \times \sqrt{d} \quad (14)$$

V_b = Velocidade na base (ft/s)

d = Diâmetro médio das partículas (in)

Mavis e Laushey (1948) propuseram uma equação para usar partículas com outro peso específico:

$$V_b = \frac{1}{2} \times \sqrt{d} \times \sqrt{s - 1} \quad (15)$$

s = Peso específico (tf/m³)

Nos testes realizados no “Bureau of Reclamation hydraulic”, as observações de campo de Rip-raps (Soluções constituídas de enrocamento, utilizadas para proteção contra erosão de margem) com diâmetros de até 45cm (18’polegadas), indicaram que a curva apresentou resultados bem coerentes com os limites práticos (Peterka, 1984).

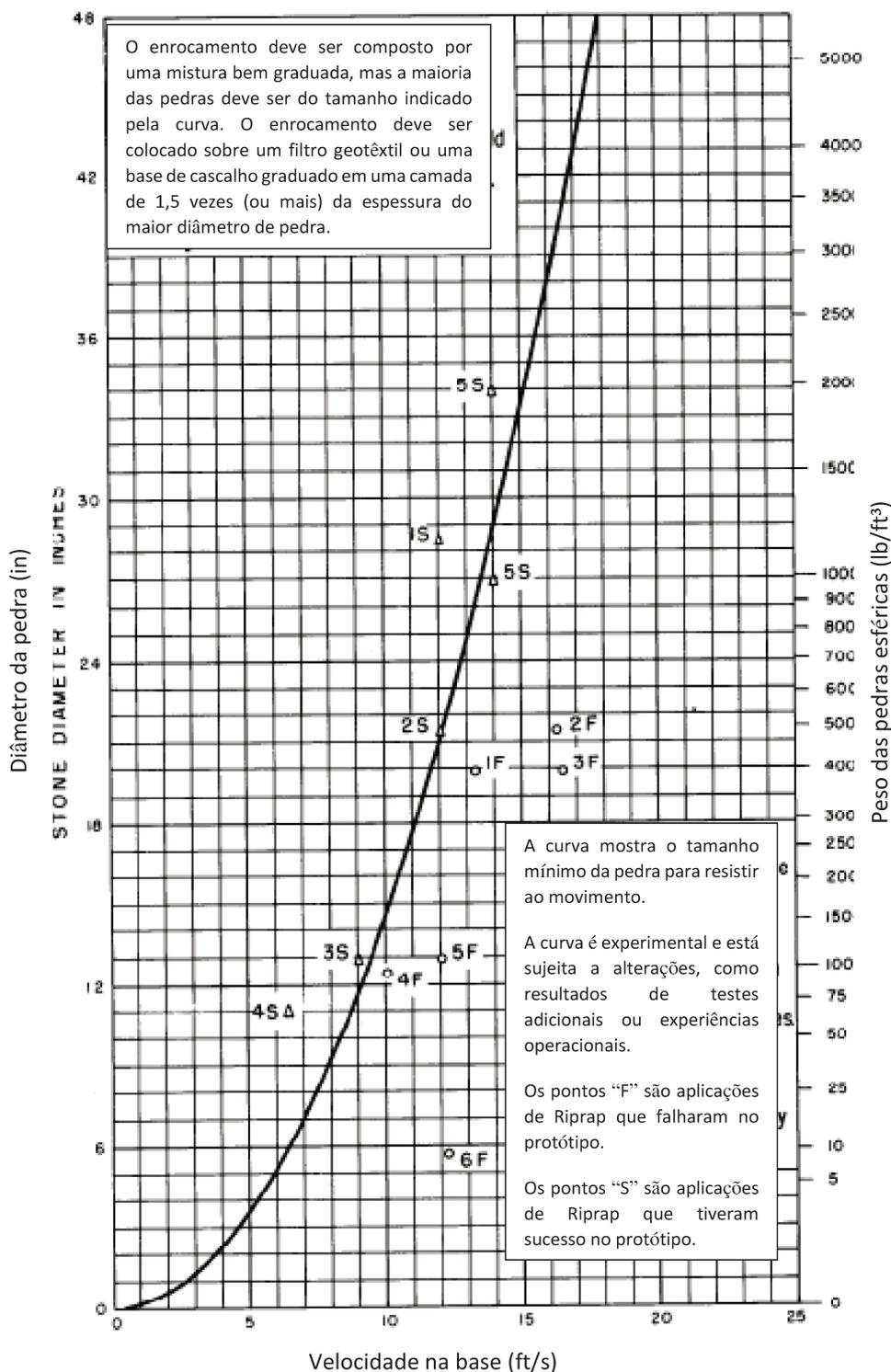


Figura 39. Curva para determinar o tamanho máximo de pedra para a mistura da bacia de dissipação. Fonte: Peterka, 1984

A colocação dos ripraps foi estudada através de testes com diversos tamanhos de pedras, avaliando a falha ou o sucesso da camada de pedra através de modelos de bacias de dissipação. Foram criados também dois protótipos de barragens (Picacho Arroyo System), a barragem sul com uma capacidade de vazão

máxima igual a $4,67\text{m}^3/\text{s}$, e a barragem norte com capacidade máxima de vazão igual a $7,78\text{m}^3/\text{s}$, tais barragens realizavam detenções a montante que aos poucos eram esvaziadas através de uma drenagem de base realizada com tubos de concreto pré-fabricados, que conectavam o volume detido a montante com o sistema de dissipação a jusante. Os resultados obtidos com os modelos e com os protótipos foram muito similares no que diz respeito a erosão criada na bacia de dissipação. (Peterka, 1984)



Figura 40. Protótipo, Barragem Norte. Fonte: Peterka, 1984



Figura 41. Modelo, Barragem Sul. Fonte: Peterka, 1984



Figura 42. Erosões ocorridas no protótipo, Barragem Norte. Fonte: Peterka, 1984

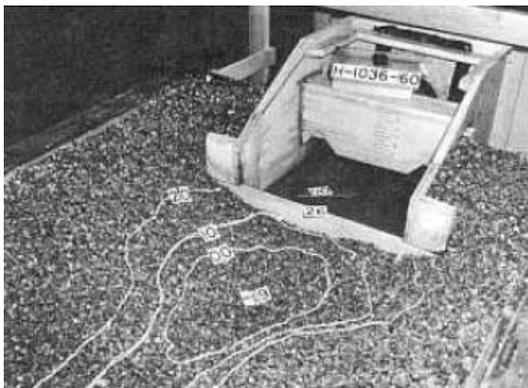


Figura 43. Erosões ocorridas no modelo, Barragem Norte Fonte: Peterka, 1984

As erosões no protótipo norte ocorreram principalmente pela alta velocidade de entrada na bacia de dissipação, visto que a mesma havia sido pré-dimensionada para velocidades limites de 9,14m/s e a velocidade estimada por cálculos no protótipo foi de 11,27m/s, ou seja, ripraps com diâmetros maiores teriam evitado a erosão da bacia. Os pesos unitários das pedras utilizadas para o protótipo variam de 7 a 227kg, e pode-se observar que no protótipo da Figura 42, as pedras próximas ao homem da direita aparentavam possuir um elevado peso (visto o tamanho das mesmas), talvez próximo ao maior peso utilizado de 227kg, e estas pedras não foram movimentadas para jusante. No modelo da Figura 44, foram utilizadas pedras com diâmetros de 23 a 45cm, tais pedras não apresentaram um movimento excessivo, porém a jusante da proteção pode-se verificar uma erosão. (Peterka, 1984).



Figura 44. Modelo hidráulico, barragem norte. Fonte: Peterka 1984

Com a utilização do gráfico da Figura 39 para este caso teríamos um diâmetro em torno de 50,8cm, tornando o modelo coerente, visto que no mesmo foram utilizadas pedras de 23 a 45cm e algumas foram deslocadas para jusante. Para que não houvesse movimentação das pedras, deveriam ser utilizados diâmetros mínimos em torno de 45cm, constituindo a camada de proteção do riprap. As análises indicam que segundo a curva da Figura 39, o riprap disposto na bacia a jusante da barragem norte iria falhar e assim aconteceu, aferindo o refinamento do gráfico da Figura 39.

Já na barragem sul, os resultados erosivos foram mínimos tanto no modelo como no protótipo, isto devido às baixas velocidades do escoamento, sendo na ordem de 1,5m/s. Segundo a Figura 39 seria necessário um diâmetro de 10cm para a estabilização do sistema, porém as pedras utilizadas tinham as mesmas dimensões dos materiais pétreos utilizados na barragem norte, diâmetros de 23 a 45cm, com isso não ocorreu nenhuma movimentação das peças posicionadas na bacia.

Todos os pontos de falha da Figura 39, foram ripraps compostos por pedras com menos de 227kg, sendo que em alguns destes testes as peças não chegaram nem mesmo a 41kg e as velocidades ensaiadas variaram de 3 a 7m/s, mostrando que a combinação de altas velocidades com pedras mais leves pode ocasionar a perda do material da bacia. Já os casos de sucesso que foram ensaiados tinham

pedras com pesos unitários que chegaram até 907kg, e velocidades de 1,5 a 4,26m/s, onde em alguns dos casos a velocidade máxima do escoamento foi capaz de movimentar as pedras de 450kg, porém não foi capaz de movimentar as pedras de 907kg, as quais ficaram estáticas, justificando desta forma o correto dimensionamento das pedras da bacia de dissipação. (Peterka, 1984). Parte dos resultados obtidos nos protótipos foram previamente previstos pelos modelos hidráulicos, e os ensaios de forma geral apresentaram bons resultados, mesmo que em alguns casos ocorreram a movimentação das pedras devido às solicitações maiores do que as previstas, todos os testes ajudaram na construção da curva da Figura 39. A curva mostra que dobrando a velocidade do ensaio temos basicamente que quadruplicar a diâmetro das pedras, ou aumentar 16 vezes o volume ou o peso, ponto este bastante impactante economicamente, visto que o custo das pedras e transporte das mesmas nos dias de hoje estão elevados. Para outros tipos de bacias podemos utilizar a velocidade de base se conhecida para o dimensionamento das pedras, ou a velocidade média baseada na vazão dividida pela área hidráulica do final da bacia, a fim de entrar no gráfico da Figura 36 com o valor da velocidade e sair com o tamanho da pedra. Destaca-se também a importância de se trabalhar com um material bem graduado e misturado, pedras com diâmetros críticos e pedras menores, afim de aumentar a dissipação de energia dentro do riprap e aumentar o embricamento das peças, sendo que a espessura do revestimento deverá ser de pelo menos 1,5 vezes maior que o diâmetro crítico, e por fim lembrar-se sempre de posicionar um filtro sobre o material pétreo, visto que sem a presença deste material pode-se ter a retirada da camada fino sob o revestimento levando-o a falha principalmente nas áreas inclinadas (Peterka, 1984).

Quando o solo do álveo apresenta uma característica muito erodível, como é o caso de uma areia fina que não possui a parcela adequada de coesão, ou até mesmo regiões de brejo, onde o material natural apresenta um baixo ângulo de atrito, e podem ser facilmente levados pela força do escoamento, Agostini et al. (1981) recomenda a utilização de um revestimento na bacia de dissipação, visto que a mesma receberá o impacto da queda d'água advinda da soleira e será a responsável pela dissipação da energia da água, e no caso da mesma ser composta por um solo frágil a erosão, a profundidade de escavação pode ser

extremamente alta, forçando o projetista a aumentar demasiadamente a profundidade do engaste da barragem, visto que a cota de apoio deverá ser posicionada abaixo da cota de escavação máxima, a fim de não expor o barramento a um solapamento e tombamento. O revestimento a ser utilizado na bacia de dissipação deverá ser adequado para suportar o impacto da água e muitas vezes a abrasão de partículas sólidas que podem ser transportadas de montante do barramento e passar pelo vertedor de crista da soleira, impactando diretamente o material de revestimento da bacia. Conforme foi estudado por Peterka, 1984, diversos materiais podem ser utilizados para o revestimento da bacia, como, enrocamentos, concreto ou até mesmo o próprio gabião.

As bacias constituídas por enrocamento são formadas por um arranjo de pedras de grandes diâmetros (superiores a 30cm), sobre uma camada de pedras de menores diâmetros (inferiores a 15cm), assentadas sobre uma camada de filtro Geotêxtil. A camada de pedras com diâmetros maiores é responsável por receber o impacto da queda d'água gerada pelo vertedor, sem que ocorra movimentação dos blocos pétreos, caso esta movimentação ocorra deve-se rever o dimensionamento de tais materiais. Já a camada de pedras menores, são responsáveis por dissipar a energia da água fazendo com que a velocidade residual que atinge o solo de base (visto que a solução é permeável e a água passa por entre as pedras alcançando a base em solo com uma velocidade conhecida como velocidade residual) seja reduzida. Por fim o geotêxtil cumpre com a funcionalidade de impedir o "bombeamento de finos" (suspensão dos sedimentos do solo sob toda a estrutura, através da velocidade residual da água) para dentro da bacia de dissipação, ponto este que pode gerar uma erosão na base bacia e leva-la a ruptura.

As bacias constituídas por colchão Reno ou Gabiões são formadas pelas peças apresentadas nos itens 2.2 e 2.2.1. Tais peças metálicas são preenchidas por rachão (o rachão possui um diâmetro que varia de 90mm a 160mm). Diferente da solução de enrocamento, os gabiões não necessitam de pedras de menores diâmetros na face inferior da peça, visto que todo o preenchimento do colchão já é realizado com materiais pétreos que apresentam diâmetros capazes de dissipar a energia da água e reduzir a velocidade residual. Outra alteração significativa das duas soluções é referente ao coeficiente de Shields (coeficiente do início do

movimento) das soluções em gabiões e em pedras soltas ou enrocamento. O coeficiente e Shields encontrado para enrocamento é na ordem de 0,047, enquanto o coeficiente de Shields encontrado para os Gabiões é na ordem de 0,10 a 0,14 (estes valores podem ser encontrados nos ensaios hidráulicos desenvolvidos pela Maccaferri no laboratório de Fort Collins e no próprio CTH da USP). Esta diferença de coeficiente de Shields garante a solução de Gabiões uma menor espessura visto que o efeito da malha dupla torção gera uma estabilização do revestimento que é equiparado apenas com uma camada de enrocamento 3 vezes mais espessa, como pode ser observado na Figura 45.

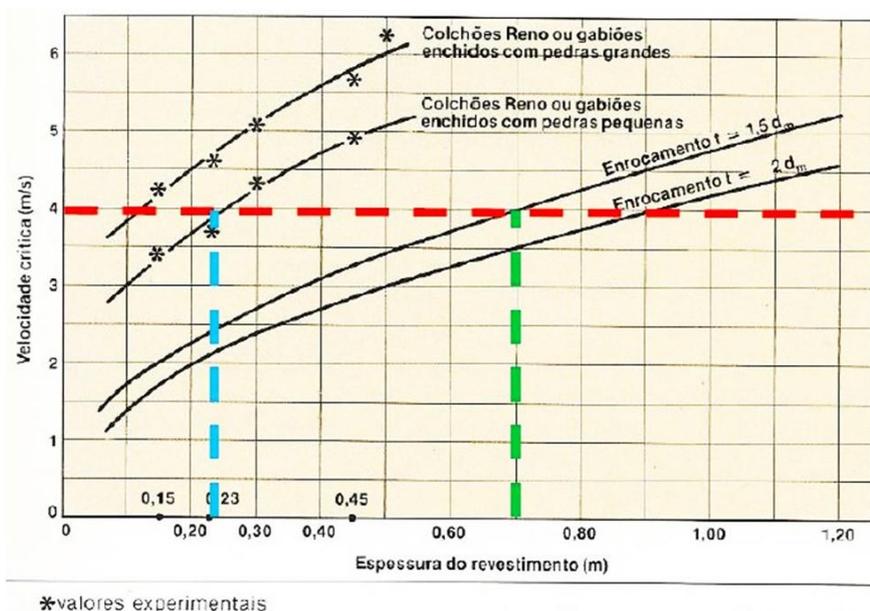


Figura 45. Ensaio hidráulico. Fonte: Maccaferri em Grenoble, França

Na Figura 45 nota-se que para a mesma velocidade de escoamento existe uma diferença de espessura de materiais de aproximadamente 3 vezes, entre os Gabiões e o enrocamento. Pode-se observar também que os gabiões possuem uma velocidade admissível na ordem de 6m/s. Tais velocidades limites dos Gabiões podem ser visualizadas em maiores detalhes através da Figura 46.

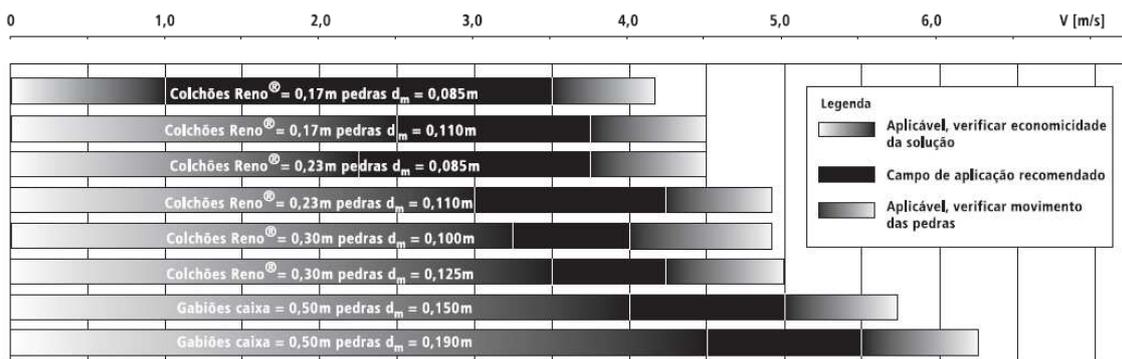


Figura 46. Velocidades limites dos Gabiões. Fonte: Maccaferri, 2017

Na Figura 46 pode-se avaliar as soluções em três níveis de eficiência para revestimento:

- Faixa degradê branco para o preto: Material está superdimensionado, ou seja, não ocorrerá nenhum problema técnico devido às solicitações oriundas do escoamento, porém o custo deste revestimento ficará elevado.
- Faixa preto sólio: Faixa ótima do material, ou seja, a solução de revestimento atenderá tecnicamente as solicitações do escoamento e apresentará um custo apropriado para a obra.
- Faixa degradê preto para o branco: Material está subdimensionado, ou seja, não resistirá aos esforços do escoamento e poderá apresentar deformações, mesmo que o custo para tal solução fique barato.

Acima da velocidade 6m/s não há nenhuma categoria de Gabiões que possa suportar os esforços gerados pelo escoamento, com isso, pode-se recorrer a soluções em concreto, ou até mesmo revestir a face dos Gabiões com concreto, a fim de proteger as pedras de preenchimento e impossibilitar a movimentação das mesmas.

Na Figura 47 será apresentada uma geometria bastante utilizada para bacia de dissipação em Gabiões.

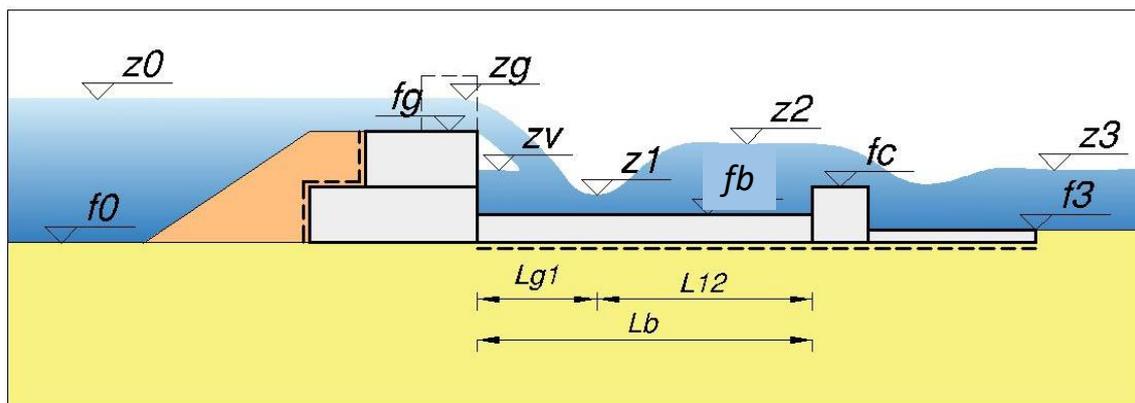


Figura 47. Barragem com bacia revestida com Gabiões. Fonte: Agostini et al., 1981

Neste caso a cota limite superior da bacia pode ser igualada ao nível natural do terreno, e a contrabarragem posicionada com um nível superior acima do nível natural do terreno, justamente para criar um colchão de água a montante, auxiliando desta a forma a dissipação da energia da queda d'água, e também desvincular a dinâmica da bacia com a trecho a jusante. Observando o trecho da contrabarragem pode-se notar que a presença da mesma gera mais um desnível, uma pequena queda d'água, bem inferior a queda gerada pelo barramento principal, porém também susceptível aos efeitos da erosão em sua base logo a jusante, a fim de proteger e garantir a estabilidade da contrabarragem, Agostini et al. (1981) indica estender uma plataforma de proteção na base da pequena estrutura, ou engastar a contrabarragem a níveis inferiores ao da própria escavação. O dimensionamento deste tipo de dissipador pode ser realizado com a teoria do ressalto, a lâmina vertente gera uma profundidade de regime rápido ($z_1 - f_b$), e desprezando as resistências passivas a favor da segurança têm-se:

$$(z_0 - f_b) + \frac{Q^2}{2 \times g \times \Omega_0^2} = (z_1 - f_b) + \frac{Q^2}{2 \times g \times (z_1 - f_b)^2 l_b^2} \quad (16)$$

Q = Vazão de projeto (m^3/s)

Ω_0 = Área molhada (m^2)

l_b = Largura da bacia de dissipação (m)

Esta é uma equação, onde a velocidade a montante do barramento e o desnível ($z_1 - f_b$) são variáveis pouco representativas, pois normalmente

apresentarão valores muito baixos, desprezando estas variáveis pode-se obter a seguinte equação simplificada:

$$(z_1 - f_b) \cong \frac{Q}{l_b \sqrt{2 \times g \times (z_0 - f_b)}} \quad (17)$$

Para a determinação do z_2 , que é a profundidade do regime subcrítico (Figura 47), tem-se a seguinte equação:

$$(z_2 - f_b) = -\frac{(z_1 - f_b)}{2} + \sqrt{\frac{2 \times Q^2}{g \times l_b^2 \times (z_1 - f_b)} + \frac{(z_1 - f_b)^2}{4}} \quad (18)$$

Agostini et al. (1981) aconselha que seja verificado se a contrabarragem trabalha efetivamente como uma seção de controle e que o funcionamento da bacia seja desvinculado ao escoamento de jusante, e para isto a carga total a jusante deve ser inferior a carga crítica na contrabarragem. Como se pode observar na Figura 45, logo a jusante da barragem gera-se um nível d'água representado como z_v , este nível fica concentrado logo abaixo da queda de água e camada de ar.

$$(z_v - f_b) = (f_g - f_b) \times \left[\frac{Q^2}{g \times l_b^2 \times (f_g - f_b)^3} \right]^{0,22} \quad (19)$$

Determinadas todas as cotas de superfícies livres d'água, pode-se calcular os comprimentos da bacia de dissipação, a fim de saber o volume de material necessário para a construção da bacia. Estes comprimentos podem ser divididos em dois trechos, sendo o primeiro a distância da soleira até a formação do regime rápido (L_{g1} é maior do que a distância X), e o segundo trecho subsequente contemplando o ressalto hidráulico (L_{12}). Para o cálculo de L_{g1} Agostini et al. (1981) indica a seguinte equação:

$$L_{g1} = \frac{(z_g + f_g - 2 \times f_b) \times \sqrt{z_g - f_g}}{\sqrt{z_g + f_g - 2 \times z_v}} \quad (20)$$

Para o comprimento do ressalto temos:

$$L_{12} = 6,9 \times [(z_2 - f_b) - (z_1 - f_b)] \quad (21)$$

Simplificando:

$$L_{12} = 6,9 \times [z_2 - z_1] \quad (22)$$

Determinados os comprimentos L_{g1} e L_{12} pode-se calcular o comprimento da bacia de dissipação, que pode ser revestida com enrocamento, concreto ou Gabiões. Para a determinação do comprimento da bacia (L_b) basta somente somarmos L_{g1} e L_{12} :

$$L_b = (z_g + f_g - 2 \times f_b) \times \sqrt{\frac{z_g - f_g}{z_a + f_a - 2 \times z_v}} + 6,9 \times (z_2 - z_1) \quad (23)$$

Simplificando:

$$L_b = L_{g1} + L_{12} \quad (24)$$

Os barramentos em gabiões muitas vezes utilizados para correção de cursos d'água com alta declividade, acabam ao longo do tempo retendo os sedimentos advindos de montante e gerando um perfil de solo similar ao da Figura 46.

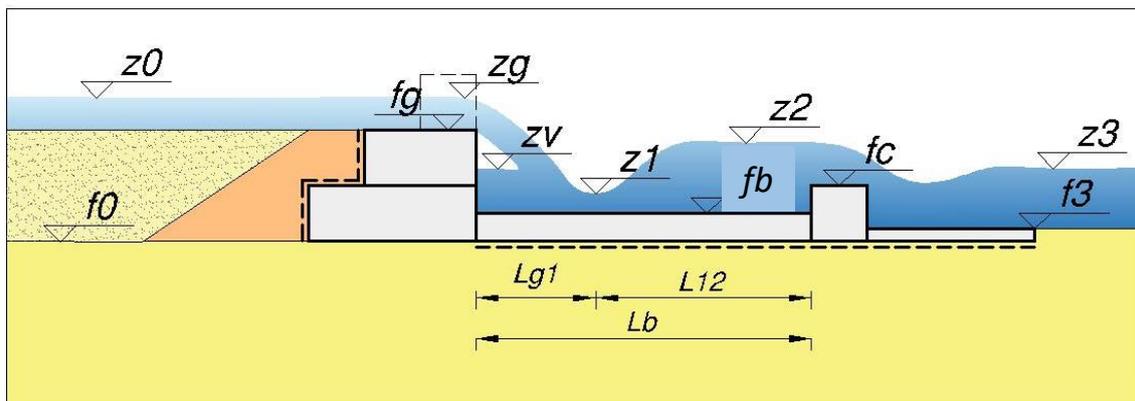


Figura 48. Barramento com sedimentação completa

Nesta condição Chow (2005) destaca que a geometria de queda livre (Figura 49) pode ser descrita através de seu número de queda (Drop Number).

$$D = \frac{q^2}{g \times h^3} \quad (25)$$

q = Vazão unitária (m^2/s)

h = Altura da queda (m)

D = Drop number

Com o valor do Drop number podem ser obtidas muitas variáveis que descrevem a geometria da bacia de dissipação:

Comprimento de queda (L_D), é a distância entre a abcissa do final do vertedor até a abcissa do impacto da queda de água sobre a bacia de dissipação, quanto maior o Drop Number e quanto maior a altura de queda, maior é este comprimento.

$$\frac{L_D}{h} = 4.3 \times D^{0.27} \quad (26)$$

Altura do nível d'água logo a jusante do vertedor (y_p), cria-se um nível d'água superior ao nível de queda da água sobre a bacia, este ponto é caracterizado por uma parcela de ar que fica contido sob o escoamento da queda. A partir do momento que esta parcela de ar é invadida completamente por água, tem-se um cenário de barramento afogado. A medida que o NA vai aumentando o vertedor poderá ir ficando em condições afogadas.

$$\frac{y_p}{h} = 1.0 \times D^{0.22} \quad (27)$$

Altura de impacto do escoamento sobre a bacia (y_1), é justamente o desnível da superfície da lâmina d'água e a base da bacia de dissipação, na abcissa onde o jato de água impacta a bacia, gerando uma menor elevação e conseqüentemente uma maior velocidade.

$$\frac{y_1}{h} = 0.54 \times D^{0.425} \quad (28)$$

A altura final é encontrada a jusante do ressalto hidráulico (y_2), esta lâmina d'água é superior ao y_1 , determinado no passo anterior.

$$\frac{y_2}{h} = 1.66 \times D^{0.27} \quad (29)$$

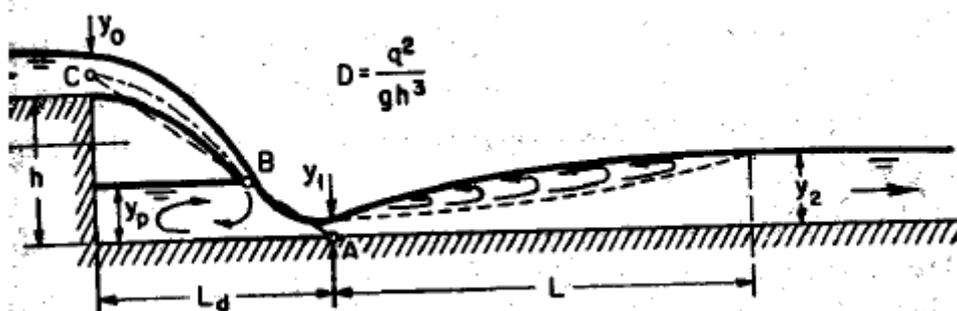


Figura 49. Ressalto hidráulico em queda livre. Fonte: Chow, 2005

As análises realizadas por Chow (2005) consideram que a largura do vertedor é igual a largura do canal, ou seja, não temos contração lateral. Caso a largura do vertedor seja menor do que a largura do canal, teremos uma contração nas extremidades que pode ser capaz de projetar o escoamento a uma distância de queda (L_D) maior, concentrando um maior nível de velocidade na porção central do vertedor, que pode ser o responsável por uma erosão na bacia de dissipação, para amenizar este problema de contração, pode-se conformar as paredes laterais de forma que a geometria final gere uma menor interferência no escoamento.

Além das opções de bacias de dissipação com e sem revestimento, também é comumente aplicada a técnica da bacia em depressão, onde para este caso a superfície da barragem fica em uma cota inferior a do terreno natural, e o escoamento a jusante trabalha diretamente como controle de saída da bacia, Figuras 50 e 51.

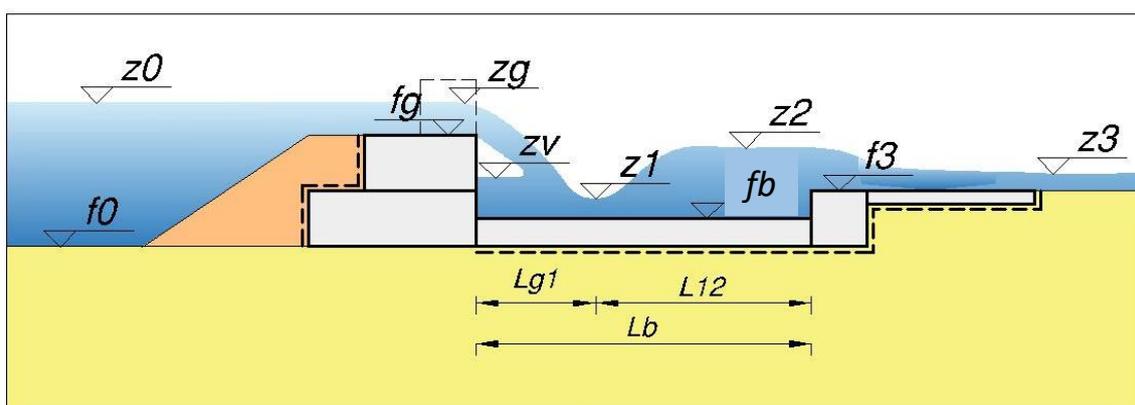


Figura 50. Barragem com bacia de dissipação em depressão. Fonte: Agostini et al., 1981.

Os cálculos de níveis d'água e comprimento da bacia são similares aos apresentados para a bacia elevada revestida, sendo que no caso da bacia em depressão sempre teremos um desnível maior da soleira comparado com os outros

métodos. Para o cálculo da profundidade de jusante do sistema Agostini et al. (1981) assegura que na seção 2 a carga total seja inferior ao remanso de jusante, fazendo com que o ressalto fique confinado dentro da bacia de dissipação.

$$(z_3 - f_b) + \frac{Q^2}{2 \times g \times \Omega_3^2} \geq (z_2 - f_b) + \frac{Q^2}{2 \times g \times l_b^2 \times (z_2 - f_b)^2} \quad (30)$$

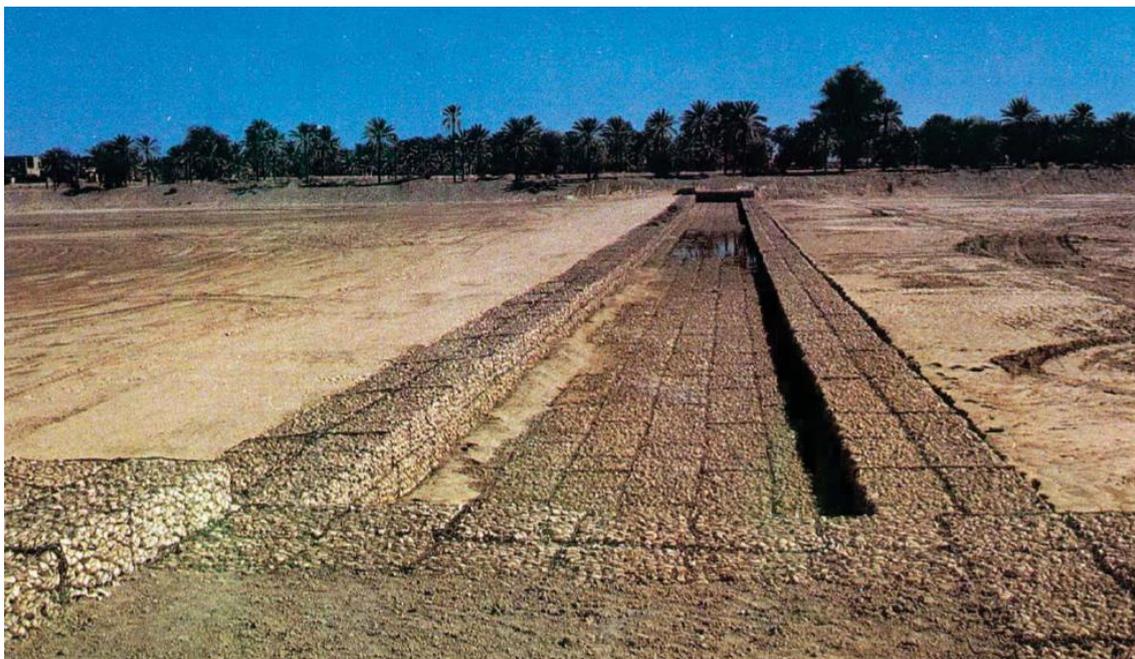


Figura 51. Barragem em gabiões com bacia em depressão, Bandar Abbas, IRAN. Fonte: Agostini et al., 1981

No modelo físico reduzido desenvolvido pelo CTH, as barragens ensaiadas que possuíam bacia de dissipação elevada são conhecidas como P e as barragens ensaiadas que possuíam a bacia de dissipação em depressão são conhecidas como P'. De uma forma geral poderá se observar que os modelos com bacia em depressão apresentaram resultados bastante representativos. Os modelos físicos reduzidos são de total importância para a avaliação de condições de escoamento complexos, visto que os mesmos possuem a capacidade de reproduzir com certa aproximação os resultados obtidos em campo, assim como as geometrias utilizadas para as obras hidráulicas. Tendo em vista a relevância da modelagem hidráulica física, serão abordados no próximo capítulo as motivações, diretrizes e cuidados que são primordiais para uma boa investigação de modelagem física.

2.6. MODELAGEM HIDRÁULICA FÍSICA

Com o avanço de métodos matemáticos para solução de problemas hidráulicos, tem-se também o aumento da confiança em tais métodos, visto que ao longo dos anos os refinamentos das metodologias técnicas evoluíram exponencialmente, porém mesmo com o avanço significativo nas técnicas matemáticas, ainda hoje existem fenômenos hidráulicos complexos que mesmo a matemática avançada não apresenta resultados confiáveis e suficientes devido a complexidade de tais fenômenos. Além da limitação da matemática em diversos cenários hidráulicos, têm-se também em alguns casos a falta de precisão refinada para a determinação de padrões de escoamento, visto que muitas equações conhecidas mundialmente trabalham com aproximações de valores, e simplificações de processos para que a solução do problema seja criada no âmbito técnico matemático. Com estas duas principais demandas de limitação do uso da matemática para reprodução de fenômenos hidráulicos e falta de precisão devido a aproximações e simplificações matemáticas, os modelos físicos sempre foram utilizados como medidas de avaliação dos fenômenos dentro da engenharia, visto que são capazes de reproduzir fenômenos complexos no âmbito hidráulico, como é o caso de uma soleira seguida por uma bacia de dissipação, sendo ela elevada ou em depressão.

Segundo Kanashiro (2013) os modelos físicos reduzidos são ferramentas que auxiliam no estudo da interação direta de estruturas hidráulicas com escoamento complexos, como pode ser o caso de um vertedor, bacia de dissipação, ressaltos hidráulicos, etc. Tal técnica pode ser utilizada para otimização de projetos, refinamentos de resultados em cenários complexos e solução de problemas que são insolúveis pelos métodos numéricos. Em muitos casos necessita-se de uma solução concreta para problemas encontrados durante ou após a execução da obra, e neste cenário os modelos físicos reduzidos também cumprem este papel. Outra função dos modelos físicos é de otimizar a geometria das estruturas hidráulicas, segundo Kanashiro (2013), o uso dos modelos físicos foi consagrado através de diversas obras cujos comportamentos foram previstos com precisão através da modelagem física. A representação de um fenômeno através de modelos é baseada na lei das semelhanças, e para que o modelo

funcione e responda de forma precisa é necessário que o fenômeno seja representado de forma confiável. Além destes benefícios conseguidos através da modelagem física, tem-se ainda um estímulo para que os pesquisadores possam problematizar, investigar, pesquisar, buscar e avaliar resultados, nos problemas que emergem da realidade do pesquisador, o que desperta motivação para o aprendizado o que propicia uma melhor compreensão dos conceitos e como se dá a solução (Barbosa, 2008). A modelagem também é uma estratégia de desenvolver habilidades como o hábito da pesquisa e da capacidade de levantar hipóteses, bem como selecionar dados e posteriormente adequá-los a suas necessidades (Machado J.; Santo, 2008). Segundo (Novak et al., 2007) a engenharia hidráulica foi marcada no século XX pelo extraordinário desenvolvimento de métodos experimentais que levaram ao uso generalizado de modelos físicos em escala e técnicas computacionais. O uso de experimentos em solução de problemas hidráulicos pode ser verificado desde a metade do século XIX, onde a ideia de utilizar modelos experimentais em escala começaram a ganhar espaço e gradativamente foram ganhando a confiança dos pesquisadores da época (Novak et al., 2007). Em 1869 W. Froude construiu o primeiro modelo para testes de navios, e em 1885 O. Reynolds desenvolveu um modelo de maré para Upper Mersey. Na virada do século surgiram dois pioneiros no estudo de rios e estruturas hidráulicas em laboratórios, Hubert Engels em Dresden (1898) e Theodor Rehbok em Karlsruhe (1901), estes foram seguidos pela maioria dos laboratórios da época que tinham começado a trabalhar com modelagem física, mas foi na primeira metade do século XX. Os modelos devem ser projetados a fim de atender a lei das escalas, ou seja, condições que devem ser atendidas para atender a semelhança necessária, para isso tem-se o fator escala (novak et al., 2007). John Smeaton (1724-1792) foi o primeiro a ter recorrido a testes em modelo para resolver um problema prático, o seu modelo foi utilizado para verificar o comportamento de rodas de água e moinhos de vento (Ivicsics, 1975).

Nas figuras 50 e 51 pode-se observar dois modelos físicos reduzidos desenvolvidos por Hassan, 2010, sendo que o primeiro se trata da avaliação do perfil de água passante por uma estrutura de Gabiões preenchido com pedras, e a segundo a mesma avaliação realizada para uma estrutura com geometria de Gabião porém preenchida com concreto. Nota-se que na figura 52, devido ao

preenchimento ter sido realizado com material pétreo, parte do escoamento passa por dentro da estrutura suavizando a inclinação do perfil de água de jusante. Já na figura 53, devido ao preenchimento ter sido realizado com concreto, todo o escoamento passa pela crista da peça locada na transversal do escoamento, acentuando a inclinação do perfil de água a jusante.



Figura 52. Modelo reduzido utilizando gabião. Fonte: Hassan, 2010

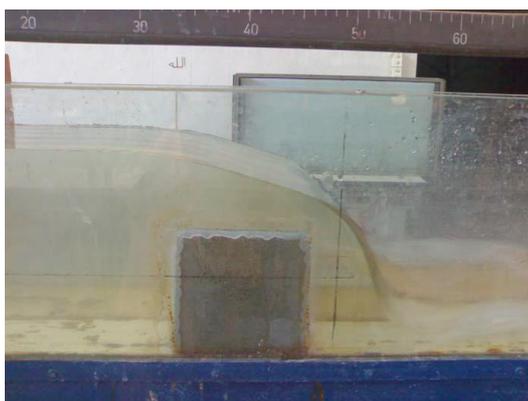


Figura 53. Modelo reduzido utilizando soleira em concreto. Fonte: Hassan, 2010

Segundo Chanson (1999), o modelo físico é uma reprodução em escala de um fenômeno real, e são muito utilizados em processos de otimização de estruturas, e também para garantir um maior nível de segurança na futura obra, ajudando desta forma os engenheiros nas tomadas de decisões, visto que com o modelo físico os tomadores de decisões (muitas vezes o engenheiro cumpre este papel) podem visualizar previamente o cenário que será resultado da sua própria decisão. Segundo Yalin (1989) o modelo físico é uma ótima ferramenta para reprodução de fenômenos físicos, porém o mesmo só cumpre com esta função quando é projetado corretamente. Caso o modelo reduzido não seja bem projetado, apresentará resultados errados ao pesquisador, e todas as instrumentações utilizadas, sendo sofisticadas ou não só servirão para medir e avaliar resultados

errôneos. Para que o modelo reduzido apresente bons resultados o mesmo deverá respeitar algumas proporções constantes que satisfaçam as condições definitivas, estas proporções são conhecidas como escalas, que deverão atender a teoria da semelhança, que ainda será abordada neste trabalho. Anteriormente os critérios de similaridades foram desenvolvidos através de métodos matemáticos, normalmente utilizando equações diferenciais, descrevendo a natureza do fenômeno sob investigação, com isso a confiabilidade da teoria da semelhança depende inteiramente da confiabilidade das formulações matemáticas. Caso a formulação matemática de um fenômeno não é conhecida, então seus critérios de similaridade também não podem ser conhecidos, segundo Yalin (1989). Para os casos onde as equações matemáticas são incapazes de reproduzir os fenômenos, tem-se a aplicação dos estudos contemporâneos da modelagem física que utilizam a similaridade dimensional do modelo.

2.6.1. TEORIA DA SEMELHANÇA

Um modelo reduzido só poderá ser declarado como válido caso suas características quantitativas estejam em conformidade com os fenômenos reais através de proporções, estas proporções são conhecidas como escala. O comprimento, tempo e a massa são conhecidas como entidades fundamentais, qualquer coisa que possa ser medida em função do comprimento, tempo e massa (L, T e M, respectivamente) pode ser considerada como composições diferentes das mesmas três entidades fundamentais Yalin (1989). Uma outra base utilizada é conhecida como FLT, onde temos as grandezas fundamentais como Força, Comprimento e Tempo, respectivamente.

Além das grandezas fundamentais, como a base MLT e FLT, tem-se as grandezas derivadas que são basicamente a combinação das grandezas fundamentais, velocidade, aceleração, etc. Na teoria da semelhança temos as equações dimensionais, que são aquelas que não dependem das grandezas fundamentais, como por exemplo:

Velocidade

$$v = \frac{ds}{dt} \quad [v] = \frac{L}{T} \quad [v] = L \times T^{-1} \quad (31)$$

Aceleração

$$a = \frac{dv}{dt} \quad [a] = \frac{L}{T^2} \quad [a] = L \times T^{-2} \quad (32)$$

Tensão

$$t = \frac{F}{a} \quad [t] = \frac{F}{L^2} \quad [t] = F \times T^{-2} \quad (33)$$

Existem números que são adimensionais, como é o caso do $[\pi]$, visto que o mesmo não depende das grandezas fundamentais:

$$[\pi] = M^0 \times L^0 \times T^0 = 1 \quad (34)$$

Para a determinação de quantos adimensionais estarão envolvidos no sistema pode-se adotar o Teorema de π ou de Buckingham da Análise Dimensional, onde partindo de uma função característica, a qual possui todas as variáveis do sistema, exemplo:

$$f(x_1; x_2; x_3; \dots; x_n) = 0 \quad (35)$$

Temos uma segunda função, que são compostas por adimensionais independentes através da relação entre as grandezas envolvidas no fenômeno:

$$f(\pi_1; \pi_2; \pi_3; \dots; \pi_m) = 0 \quad (36)$$

Tais adimensionais independentes são aqueles que possuem pelo menos uma das suas variáveis diferentes, exemplo:

$$E_u = \frac{F}{\rho \times V^2 \times D^2} \quad R_e = \frac{\rho \times V \times D}{\mu} \quad (37)$$

Neste caso, com as equações de Euler e Reynolds, temos a variáveis F (força) na equação de Euler porém não temos na equação de Reynolds, da mesma forma que temos a variável μ (viscosidade) na equação de Reynolds, e não temos a mesma variável na equação de Euler. Para se determinar a quantidade de adimensionais envolvida no sistema (m), deve-se determinar primeiramente a quantidade de grandezas fundamentais (FLT neste caso) envolvidas nas variáveis. Exemplo, caso a função seja composta por tais variáveis:

$$f = (v; D; \rho; u; F) = 0 \therefore n = 5 \quad (38)$$

$$[F] = F; [u] = F \times L^{-2} \times T; [\rho] = F \times L^{-4} \times T^2; [D] = L; [v] = L \times T^{-1} \therefore r = 3 (F; L; T) \quad (39)$$

Aplica-se a quantidade de grandezas fundamentais como “r” na equação 40:

$$m = n - r \therefore m = 5 - 3 \therefore m = 2 \quad (40)$$

Sabendo-se a quantidade de adimensionais, deve-se determinar quais são os adimensionais, para isto é necessário escolher as variáveis de base, podendo-se adotar a base comumente utilizada na mecânica dos fluidos, o $(\rho; v; D)$, que são dimensionalmente independentes. Com isso teremos:

$$f = (v; D; \rho; u; F) = 0 \quad (41)$$

$$Base = (\rho; v; D) \quad (42)$$

$$Não\ incluídas = (F; u) \quad (43)$$

A Teoria nos indica que cada adimensional será o produto das variáveis de base elevado a um expoente, sendo acrescentado ao final da equação as variáveis não incluídas na base, com isso temos:

$$\pi_n = x_1^{\alpha_1} \times x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n} \quad (44)$$

$$\pi_1 = \rho^{\alpha_1} \times v^{\alpha_2} \times D^{\alpha_3} \times F \quad (45)$$

$$\pi_2 = \rho^{\beta_1} \times v^{\beta_2} \times D^{\beta_3} \times u \quad (46)$$

Transformando a expressão em linguagem FLT, teremos:

$$F^0 L^0 T^0 = (\rho)^{\alpha_1} (v)^{\alpha_2} (D)^{\alpha_3} (F) \quad (47)$$

$$F^0 L^0 T^0 = (FL^{-4}T^2)^{\alpha_1} (LT^{-1})^{\alpha_2} (L)^{\alpha_3} (F)^1 \quad (48)$$

Algebricamente:

$$F^0 L^0 T^0 = (F)^{\alpha_1+1} (L)^{-4\alpha_1+\alpha_2+\alpha_3} (T)^{2\alpha_1-\alpha_2} \quad (49)$$

Os expoentes de FLT do lado esquerdo é "0", logo os expoentes de FLT do lado direito da equação também deverá ser "0", com isso teremos um sistema com 3 equações para a resolução:

$$\begin{cases} \alpha_1 + 1 = 0 \\ -4\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0 \\ 2\alpha_1 - \alpha_2 = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha_1 = -1 \\ \alpha_2 = -2 \\ \alpha_3 = -2 \end{cases} \quad (50)$$

$$\pi_1 = \rho^{-1} \times v^{-2} \times D^{-2} \times F \quad (51)$$

$$\pi_1 = \frac{F}{\rho \times v^2 \times D^2} \therefore \pi_1 = E_u \quad (52)$$

Seguindo o mesmo processo para o segundo adimensional teremos:

$$\pi_2 = \frac{u}{\rho \times v \times D^2} \therefore \pi_2 = \frac{1}{R_e} \quad (53)$$

Existem diversos outros adimensionais como pode-se verificar na sequência:

Froude

$$Fr = \frac{V^2}{Lg} \quad (54)$$

Mach

$$M = \frac{V}{c} \quad (55)$$

Nos modelos aerodinâmicos, estudos de asas, aviões, jatos de vento incidindo em automóveis usa-se a semelhança de Mach. Nos modelos hidrodinâmicos em condutos forçados, como bombas, turbinas, etc, usa-se a semelhança de Reynolds. Já nos condutos livre, que é o foco deste trabalho, como canais, vertedores, bacias de dissipação, descidas d'água, lagos, etc, as semelhanças de Reynolds e Froude são muitos importantes, porém para manter as

duas semelhanças teríamos que trabalhar com a escala modelo/protótipo de 1:1, o que inviabiliza o desenvolvimento dos estudos, com isso é dada preferência a semelhança de Froude, porém devemos estar cientes de que a falta de semelhança de Reynolds gera um erro embutido.

Para que exista semelhanças entre o modelo e o protótipo pode-se observar:

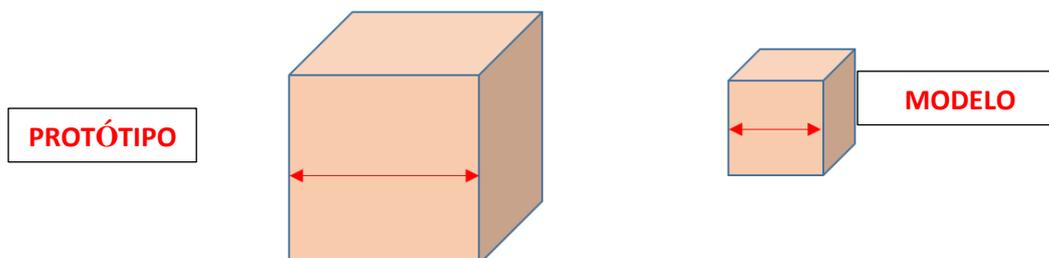


Figura 54. Semelhança de medidas (L). Fonte: Próprio autor

Semelhança geométrica

$$\frac{a_m}{a_p} = \frac{b_m}{b_p} \quad (56)$$

Grandeza linear no modelo dividida pela mesma grandeza linear no protótipo devem ser constantes, assim como uma outra grandeza linear do modelo se dividida por uma grandeza linear no protótipo, também devem ser constantes.

Semelhança cinemática

$$\frac{v_{1m}}{v_{1p}} = \frac{v_{2m}}{v_{2p}} \quad (57)$$

Velocidade no ponto 1 do modelo dividida pela velocidade no ponto homólogo no protótipo devem ser constantes, assim como uma outra velocidade do modelo se dividida por uma velocidade no ponto homólogo no protótipo, também devem ser constantes.

Semelhança dinâmica

$$\frac{F_{1m}}{F_{1p}} = \frac{F_{2m}}{F_{2p}} \quad (58)$$

Razão entre as forças em pontos homólogos no modelo e no protótipo deve ser igual a razão entre as forças de dois outros pontos homólogos entre o modelo e protótipo.

Caso seja atendida as três semelhanças, diz-se que o modelo e protótipo são semelhantes, logo os adimensionais do modelo são iguais os adimensionais do protótipo. Existem alguns tipos de escalas como:

Escala Geométrica

$$K_L = \frac{L_m}{L_p} \quad (59)$$

Escala de velocidades

$$K_v = \frac{V_m}{V_p} \quad (60)$$

Escala de viscosidade

$$K_u = \frac{u_m}{u_p} \quad (61)$$

Como a semelhança de Froude é a semelhança aplicada para casos de escoamentos livres, como é o caso deste trabalho, devemos adotar a semelhança de Froude para os estudos dos modelos.

$$Fr_m = Fr_p \quad (62)$$

$$\frac{v_m^2}{L_m g_m} = \frac{v_p^2}{L_p g_p} \quad (63)$$

$$\left(\frac{v_m}{v_p}\right)^2 = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)\left(\frac{g_m}{g_p}\right) \quad (64)$$

Pode-se concluir que a escala de velocidade é igual ao produto da escala geométrica vezes a escala de aceleração da gravidade:

$$K_v^2 = K_L K_g \quad (65)$$

Como todos os experimentos são realizados sob a condição da gravidade, a variação de “g” será muito pequena a ponto de ser considerado “1” na equação.

2.6.2. SEMELHANÇA DE FROUDE E EFEITO DE ESCALA

Nos estudos de escoamentos de superfície livre, uma igualdade que sempre é respeitada é o número de Froude do modelo e do protótipo, com isso tem-se relações de extrapolação para o protótipo das grandezas obtidas no modelo. Dando sequência a equação 65 tem-se a escala de velocidades conforme as equações 66 e 67, onde é representada a escala geométrica entre os dois sistemas:

$$K_v^2 = K_L \quad (66)$$

$$K_v = (K_L)^{\frac{1}{2}} \quad (67)$$

A escala de tempo pode ser descrita como a relação entre as escalas de comprimento e velocidades:

$$K_t = \frac{K_L}{K_v} \quad (68)$$

$$K_t = \frac{K_L}{(K_L)^{\frac{1}{2}}} \quad (69)$$

$$K_t = (K_L)^{\frac{1}{2}} \quad (70)$$

Para a escala da vazão tem-se o produto das escalas de velocidade e comprimento elevado ao quadrado, conforme equação 71:

$$K_Q = K_v \times K_L^2 \quad (71)$$

$$K_Q = K_L^{\frac{1}{2}} \times K_L^2 \quad (72)$$

$$K_Q = K_L^{\frac{5}{2}} \quad (73)$$

Alguns casos em que é considerada um tipo de força principal sobre o escoamento de superfície livre, podem ser submetidos a influência de forças de outras naturezas, neste caso pode ser constatado erros embutidos, este erro (efeito

de escala) é decorrente da impossibilidade de modelar todas as forças de forma semelhante, segundo Motta, 1972.

Uma das formas pouco usuais de se verificar se o efeito de escala possui relevância nos resultados obtidos em uma modelagem, é montar diversos modelos com diferentes escalas geométricas, do mesmo protótipo, com a motivação de avaliar qual é a escala geométrica mínima para que os resultados não sejam impactados pelo efeito de escala. Entretanto conforme comentado, está uma prática pouco usual no meio da engenharia.

Com o avanço do CFD, tem-se um novo horizonte de possibilidades investigativas, visto que com as ferramentas computacionais pode-se validar um modelo numérico com um modelo em escala, e após esta validação tem-se a possibilidade de novas modelagens com escalas diferentes, inclusive a escala real do protótipo, o que é quase impossível ser realizado com modelos físicos em laboratórios.

2.7. MODELAGEM HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Novak et al., (2007) comenta que o uso de técnicas computacionais teve um aumento a partir dos anos 60, este fato abriu possibilidade para os pesquisadores que sempre haviam utilizado os modelos físicos reduzidos, porém não eliminando tal técnica mais tradicional na solução de problemas hidráulicos, visto que os desafios são cada vez maiores e mais desafiadores para o método matemático.

Novak et al., (2007) destaca que a base dos modelos computacionais é o modelo matemático, ou seja, um conjunto de equações algébricas e diferenciais que representem o fenômeno (Navier-Stokes e Saint Venant).

Os modelos podem ser classificados como:

- Matemáticos (Algébricos, Diferenciais, Integrais...)
- Numéricos (Diferenças finitas, elementos finitos, volumes finitos...)
- Computacionais

Ferziger; Peric, (2002) explica que a Computacional Fluid Dynamic (Fluído Dinâmica Computacional) que é conhecida como CFD, está passando por um

período muito interessante no ponto de vista de interesse e busca por conhecimento de técnicas, softwares e cursos sobre o assunto, visto o número de treinamentos, disciplinas e palestras tem aumentado significativamente nas universidades e no âmbito profissional. Em algumas áreas técnicas os modelos computacionais já tiveram um avanço considerável na aplicação, confiabilidade e disseminação do conhecimento, porém como o CFD normalmente busca soluções de problemas mais complexos, tem-se um atraso ainda nesta área, porém pouco a pouco o CFD ganha espaço na área industrial e a confiança dos profissionais e pesquisadores, tanto no âmbito acadêmico como no cenário profissional.

Segundo Jasak (1996), a precisão dos algoritmos utilizados nas simulações numéricas do CFD é uma das principais preocupações do método, ponto este que precisa ser estudado e desenvolvido com excelência. O julgamento da precisão do modelo deve ser realizado comparando-o com a solução exata, porém tal solução muitas vezes ainda não existe, o que gera um grau de importância elevado a estimativa de erros do sistema. Apesar do CFD ser utilizado em diversas áreas da engenharia, ainda não é uma ferramenta amplamente aceita.

Versteeg; Malalasekera (1995), explica que o CFD é a análise de sistemas de fluxo de fluidos, transferência de calor e reações químicas, utilizando simulação computacional. Esta técnica abrange uma grande área de atuação como, aerodinâmica, hidrodinâmica, química, hidrologia, meteorologia, biomedicina, engenharia civil, oceanografia, elétrica, eletrônica, mecânica, entre outras áreas. Desde os anos 60 o CFD começou a ser aplicado na indústria aeroespacial na criação de aeronaves e jatos, o CFD também foi aplicado na área de motores a combustão, a com o passar do tempo o CFD começou a fazer parte do processo de produção de diversas soluções mecânicas. Mesmo com o avanço da técnica CFD, ainda existe um atraso muito grande na utilização dos modelos, e um dos principais motivos para este atraso é a complexidade dos problemas que buscam solução com esta técnica, o que exige do pesquisador/profissional um embasamento profundo na área de mecânica dos fluidos e conhecimento dos fenômenos.

Maliska (1995) comenta que, a utilização de técnicas numéricas com o auxílio de computadores é uma realidade da engenharia, visto que com o avanço da tecnologia tivemos um desenvolvimento exponencial na área computacional, o

que gerou uma base sólida para o crescimento de algoritmos para solução de problemas. Para a solução prática de um problema de engenharia existem os métodos analíticos, métodos de modelos físicos reduzidos e métodos numéricos, este último é responsável por resolver problemas de geometrias, fenômenos e condições de contorno complexas, com uma velocidade de obtenção de resultado bastante expressiva quando comparado com os métodos convencionais. Mesmo com esta tecnologia avançada, os métodos numéricos computacionais também podem levar o usuário ao erro, caso o pesquisador não se atente às premissas conceituais que garantem ao processo resultados confiáveis, para isto deve-se evitar dois níveis de erros que podem acontecer na modelagem. O primeiro erro a se atentar é resultado da má solução das equações diferenciais e o segundo é o uso de equações diferenciais que não representem corretamente o fenômeno físico.

Ferziger; Peric (2002) afirmam que para se trabalhar com CFD faz-se necessário um conhecimento vasto na área de mecânica dos fluidos e análise numérica, e muitos erros já aconteceram devido a falta destes conhecimentos, seja um ou outro. Hoje em dia existem códigos que resolvem em questão de minutos problemas simples, como o escoamento dentro de uma tubulação, porém também existem modelos mais complexos que exigem a utilização de supercomputadores e a disposição de muitas horas e as vezes dias para a solução de um problema. O CFD tem sido utilizado com êxito para economia e redução de custos em equipamentos, energia e poluição ambiental.

Fortuna (2000), define o CFD como uma área computacional que estuda processos que envolvem fenômenos (de transporte), fluidos em movimento e troca de calor e transporte de massa. Atualmente o CFD tem sido utilizado por diversas empresas como alternativa mais barata para o desenvolvimento e estudo de novos projetos (Lombardi, 2005). Wendt (2009), diz que a aplicação do CFD é uma maneira de reduzir o número de experimentos de modelos físicos e de explorar de uma forma mais proveitosa os estudos de fenômenos que não poderiam ser estudados de forma prática em laboratórios.

Hoje em dia a comunidade técnica tem buscado resultados mais precisos e representativos para os experimentos e estudos práticos na área de hidráulica, e esta busca tem encontrado no CFD uma ótima oportunidade de refinar os

resultados, otimizar sistemas, e comparar as avaliações com modelos físicos convencionais. Com o confronto dos resultados físicos e numéricos (CFD), os técnicos ganham poder na conclusão, e tomada de decisão em estudos hidráulicos. A demanda crescente e busca por ferramentas computacionais que atuam como CFD, fez com que surgisse no mercado diversos softwares de código aberto ou fechado, gratuitos ou pagos, criando assim opções para que o usuário avaliando todos os benefícios de cada ferramenta possa escolher um código para trabalho ou estudo. Com tantas ferramentas disponíveis o uso dos computadores para resolver problemas de engenharia vem aumentando gradativamente, transformando as simulações menos onerosas e mais rápidas. Algumas ferramentas que podem ser encontradas hoje para simulações CFD:

- ANSYS CFX
- STARS-CD
- FLOW-3D
- FLUENT
- PHOENICS CFD
- NUMECA
- OPENFOAM

Devido ao programa OpenFOAM apresentar um pacote bastante robusto, ser gratuito, o mesmo tem recebido contribuições da comunidade científica que necessitava de uma ferramenta de código aberto. Devido também aos ótimos resultados obtidos através desta ferramenta em trabalhos técnicos como os desenvolvidos por Lobosco (2013), Huerta; Casarín (2016), Vasquez; Robb (2016), entre outros, esta foi escolhida para a resolução do modelo numérico deste trabalho.

A ferramenta CFD pode ser dividida em 4 etapas:

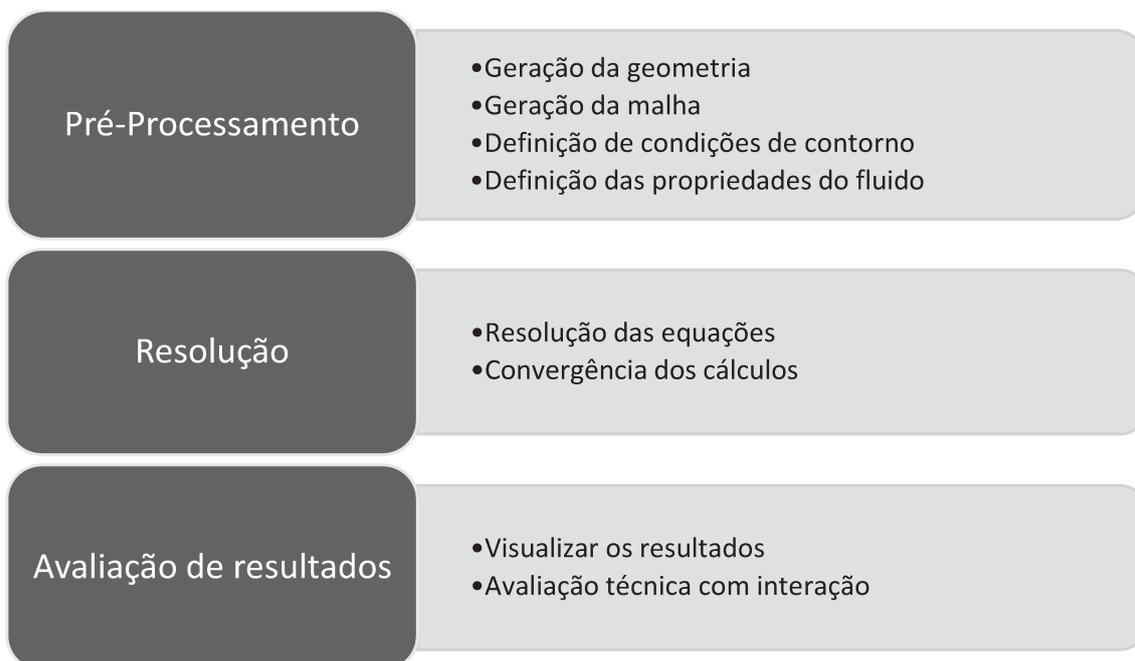


Figura 55. Etapas do processo CFD. Fonte: Próprio autor

Para exemplificar a quantidade de aplicações de CFD em solução de problemas, pode-se citar o trabalho realizado por Fernandes; Junji Ota (2016), que estudaram através de modelo numérico o escoamento sobre o vertedor da UHE de Belo Monte utilizando o Flow 3D, para reproduzir as principais características de escoamento sobre vertedores afogados a jusante, para este trabalho foram utilizadas três refinamentos de malhas, sendo a malha menos densa para um tempo maior de ensaio e as malhas mais densas foram utilizadas sequencialmente a partir dos resultados das anteriores através do comando Restart do Software, para o modelo de turbulência foi utilizado o RNG (Renormalized Group Model), os autores concluem que a modelagem matemática exige muitos cuidados para que os resultados obtidos sejam coerentes, exigindo do modelador conhecimento avançado na área hidráulica e CFD. Segundo o modelo matemático apresentou um ótimo resultado na definição do perfil do escoamento livre, quando comparado ao modelo físico, já na distribuição de pressão encontrada na crista da Ogiva, pode-se perceber que os resultados não foram tão representativos quando comparados com o modelo físico, mostrando a necessidade de se trabalhar com uma malha mais refinada neste ponto. Comparando os resultados de capacidade de descarga pode-se verificar que o aperfeiçoamento das malhas gerou um refinamento muito

relevante, deixando uma diferença mínima de 2% entre os modelos em escoamentos complexos com afogamento por jusante.

Lobosco (2013), estudou a aeração que ocorre em vertedores em degraus com uso de software OPENFOAM, produzido pelo OpenCFD Ltda, onde foi utilizada uma malha hexaédrica, cartesiana, estruturada, geradas através do software Salome, através da importação da geometria do formato CAD. Para as definições de parede foram utilizados o modelo de turbulência κ - ϵ . Pode-se verificar que este trabalho apresentou resultados fisicamente coerentes para o estudo de aeração do ar em vertedores escalonados.

Arantes (2007) em sua tese de doutorado pela universidade de São Carlos, também estudou o tema de vertedor em degrau, tema este bastante conhecido no âmbito físico experimental, porém pouco explorado no âmbito computacional ainda. Neste trabalho foi utilizada uma malha triangular não estruturada próxima aos degraus, geradas através do CFX-Mesh que é uma atualização do antigo CAD2Mesh e o ICEM-CFD, visto que o mesmo é compatível com o Ansys CFX 10.0. O modelo de turbulência utilizado neste trabalho foi o SSG Reynolds Stress, para condições anisotrópicas com a possibilidade do uso da lei de parede. Olinger (2001), o qual deixou sua contribuição através dada sua tese de doutorado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através de um estudo da distribuição de pressão no vertedores em degraus de 12 x 9 cm (Altura e Largura) e declividade de 1V:0,75H de declividade com escoamento totalmente submerso, onde tal escoamento atingia velocidades de 10 a 12m/s os perfis de pressões dos degraus e os perfis de velocidades tiveram um ótimo resultado. Foi realizado também neste estudo uma avaliação da mudança do escoamento de nappe flow para skimming flow, porém para esta análise os resultados não foram conclusivos devido à dificuldade de visualização do início da mudança, necessitando de futuros estudos complementares.

Dias (2011), estudou o comportamento hidrodinâmico de uma soleira lateral utilizando o CFD, validando os resultados através de ensaios físicos realizados no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da USP. Neste estudo foram utilizadas três tipos de refinamento de malhas e três tipos de modelos de turbulência (κ - ϵ , κ - ϵ (RNG) e SST κ - ω), sendo que o modelo computacional foi validado com uma malha hexaédrica com refinamento de 342000 elementos e modelos de

turbulência κ - ϵ (RNG), pois apresentaram os melhores resultados. O software de CFD utilizado para este trabalho foi o ANSYS CFX, devido o mesmo apresentar um pacote robusto e completo de solução, desde a definição do problema até a apresentação dos resultados. Nesta literatura foram comparados os coeficientes de descarga com outras pesquisas nacionais e internacionais, mostrando uma ótima representatividade do modelo criado para diferentes condições.

Pereira (2015) estudou roller bucket através da ferramenta Flow 3D e calibrou os resultados com um modelo físico também desenvolvido no CTH em SP. O número de células variou de 911.014 a mais de 4 milhões. Os resultados obtidos pela ferramenta computacional foram satisfatórios.

Ainda no tema de vertedores existe o trabalho realizado por Campos (2011), que estudou o escoamento sobre o vertedor da UHE São Salvador, onde os modelos numéricos foram realizados através do software pago FLOW-3D que usa o método de volumes finitos para solução de problemas hidráulicos e mecânicos, através de malhas retangulares. O modelo de turbulência adotado foi o κ - ϵ , devido o mesmo ter apresentado bons resultados para escoamentos tridimensionais sem a necessidade de aumentar demasiadamente o tempo de processamento. Pode-se concluir com este trabalho que os resultados numéricos da simulação dependem muito do tamanho da malha escolhida para o processamento, outro ponto de total importância para validação dos resultados é a calibração da rugosidade do sistema, mesmo que muitas vezes não se tenha um modelo físico realizado, a calibração deverá partir da literatura já existem que aborde o tema.

Além das aplicações de CFD para estudos de vertedores, pode-se encontrar estudos realizados com a temática focada em reações químicas e bioquímicas que ocorrem no interior de reatores para tratamento de água, que foram desenvolvidos através de modelagens numéricas com CFD, como é o caso do Costa (2015), também desenvolvida na universidade de São Carlos. Para esta pesquisa foi utilizada a ferramenta de software Vensim 6.3 da Ventana Systems, com este modelo criado e validade pode-se concluir que o mesmo apresentou um comportamento hidrodinâmico de reatores em condições de regime não-permanente com variação senoidal cíclica de vazão mais adequado.

Silva et al. (2016), estudaram o comportamento hidrodinâmico e qualidade da água, incluindo Oxigênio Dissolvido (DO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e nitrogênio amoniacal do Rio Perequê e da Enseada de Porto Belo, SC. Para este trabalho foram utilizados os módulos FLOW e WAQ do sistema DELFT3D, com malha mais refinada na região próxima foz do Rio Perequê, que resultou em 3568 nós no rio e 6307 nós no oceano, com um volume estimado no trecho de modelagem de aproximadamente 325.370m^3 , e na parte da enseada 1.572km^3 . Este modelo foi calibrado com a batimetria local, visita nos pontos críticos de qualidade de água e Apesar das limitações impostas pela falta de dados de vazão e batimetria do rio, a comparação dos dados medidos em campo com os dados modelados, que pôde ser feita nos pontos de controle, apresentou resultados semelhantes ocasionalmente. Conclui-se com este trabalho que a qualidade da água em diversos pontos, principalmente próximos à foz eram ruins, o que deveria desestimular o banho de mar da população local, assim como pesca comercial e outras atividades. Outra conclusão apresentada pelo trabalho foi a necessidade de um maior rigor no tratamento do esgoto local e a descentralização do lançamento dos mesmos, para não sobrepular a capacidade do meio ambiente em se recuperar.

Uma das áreas que tem explorado o uso de CFD é a hidráulica marítima, devido à complexidade da avaliação de correntes, ações de ondas, e maré, o CFD tem sido uma das ferramentas que tem auxiliado nas pesquisas e estudos de proteções costeiras, como o trabalho desenvolvido por Calvo L. E. G. ; Colonna, P. C. R. (2016), que utilizou um modelo de elementos finitos para propagação de ondas em áreas costeiras, com auxílio do modelo hidrodinâmico SisBahia. O modelo de malha utilizada foi a retangular, que resultaram em bons resultados quando comparado com modelos hidrostáticos existentes de propagação e transformação de ondas integradas a profundidade.

Huerta; Casarín (2016) utilizaram a modelagem CFD para avaliação de revestimentos superficiais de praias com características porosas, visto que tais soluções apresentam vantagens técnicas frente às soluções impermeáveis, como a menor reflexão de ondas e menor pressão interna no material de revestimento, pontos estes que foram comprovados com o modelo numérico desenvolvido no

trabalho. Neste estudo foram aplicados os modelos wavePoreGeoFoam, baseado na literatura waves2foam e o software OpenFOAM, e modelo de turbulência κ - ϵ .

Vasquez; Lima (2016) também estudaram ação de ondas com auxílio de CFD, porém neste caso o estudo foi focado em ondas geradas por deslizamento de solo em margens de represas, minerações e lagos, para isto os autores trabalharam com o software Flow-3D com calibração de um modelo físico, tal trabalho demonstrou que a ferramenta CFD apresentou ótimos resultados nas etapas de geração, propagação e run-up das ondas, ficando em uma margem de erro de aproximadamente 10%, quando comparado com o modelo físico. Para esta pesquisa foi utilizada malha estruturada ortogonal.

Estudos de barragens para armazenamento de água ou de sedimentos são constantemente desenvolvidos com o auxílio da combinação de modelos físicos e computacionais, com o suporte do CFD.

Granados; Trujillo (2016), aproveitaram os resultados do modelo físico realizado para a barragem Cantarrana, no laboratório de hidráulica da Escola Colombiana de Engenharia em 2008, que era composto por um vertedor Creager, uma descida rápida e um dissipador esqui, e deu sequência aos estudos comparando os resultados do modelo físico com os novos resultados obtidos através de uma modelagem numérica, onde foi utilizado o software Fluent 17.0 que foi capaz de apresentar resultados de coeficiente de descarga com uma variação de 0,5% entre o modelo físico ($C_{df}=2,17$) e o modelo numérico ($C_{dn}=2,18$).

A gravidade dos problemas encontrados pela ruptura de barragens, como foi o caso da barragem de Mariana, MG, que deixou mortos e desabrigados, está sendo um dos fatores decisivos para o aumento de estudos mais refinados sobre este tema.

Vasquez; Robb (2016), estudaram propagação da onda de inundação gerada por uma possível ruptura de barragem, levando em consideração obstáculos sólidos a jusante do barramento, através das ferramentas OpenFoam e Flow-3D, onde foi constatado que a aplicação de um modelo 3D nestes casos específicos, apresenta um resultado muito mais realístico do fenômeno real, visto que o estudo foi calibrado com um modelo físico desenvolvido pelo Centro

Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI), que simulou a construções com diversos blocos individuais posicionados em alinhamentos diferentes.

Castillo et al. (2016), também estudo o tema de barragem porém sua maior preocupação foi com a erosão gerada a jusante da mesma, resultado do dissipador em esqui, tal barramento estudado era a barragem do rio Toachi (Equador), que tinha 59m de altura e uma extensão máxima em torno de 4,5km, neste estudo foram considerados quatro tipo de análises, modelo físico reduzido com escala de Froude 1:50, equações empíricas obtidas em modelos, metodologia semi-empírica e simulações CFD, e neste processo comparativo de resultados pode-se concluir que, os quatro métodos de trabalho apresentaram resultados muito similares a ponto de garantir neste caso, que a modelagem numérica pode ser um complemento aos métodos tradicionais, baseados nas equações empíricas e modelagem física. Neste trabalho foram utilizadas malhas com diferentes refinamentos, onde, próximo do extravasor, foram utilizadas malhas com 0,005m, e na bacia de dissipação foi utilizada uma malha com refinamento menos denso de 0,020m, e o software utilizado para o processamento foi o FLOW-3D.

As bacias de dissipação cumprem com um papel essencial para a segurança de uma barragem e para os estudos de eficiência das bacias de dissipação o CFD juntamente com modelos de turbulência tem sido uma das ferramentas que tem aberto diversas possibilidades de validação de geometrias, e análise do comportamento dos ressaltos hidráulicos.

Amante et al. (2005), desenvolveram um estudo de avaliação de bacias de dissipação por ressalto hidráulico utilizando um modelo numérico CFD, através da ferramenta Flow-3D, comparando e calibrando os resultados como pressões, velocidades e níveis d'água, com dois modelos físicos que representavam a UHE de Porto Colômbia, tal avaliação pode demonstrar que a ferramenta CFD é um método adequado para estudos desse tipo de escoamento, visto que o modelo reproduziu a recirculação devida a formação do rolo associado ao ressalto hidráulico, a recirculação a jusante da soleira, e a variação do início do ressalto. Para este caso em específico as simulações bidimensionais comparadas com o modelo físico apresentaram ótimos resultados, com um tempo médio de 4 horas, enquanto simulação do modelo 3D para uma faixa de 37m de largura do vertedor

levou muito tempo, e não apresentou resultados tão representativos como o modelo bidimensional.

Borja, (2009), estudou as características macroturbulentas do escoamento em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico com condição de entrada aerada advinda de um vertedor em degraus, este estudo teve como base um modelo físico reduzido desenvolvido no laboratório do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Neste contexto pode-se observar a ampla aplicação dos modelos computacionais possibilitando o aprofundamento nos estudos técnicos de hidráulica, e quando aplicado na escala de 1:1 auxilia na verificação de efeitos escala do modelo físico devido a impossibilidade de igualdade de todos os adimensionais, e favorece o suporte para avaliação de imperfeições técnicas passíveis de acontecer no modelo físico reduzido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos estudos experimentais são comumente utilizados dois formatos de modelos físicos, sendo o primeiro 2D (bidimensional) e o segundo 3D (tridimensional). No primeiro formato tem-se uma simplificação do escoamento, desconsiderando os esforços ocorridos na terceira dimensão “Z”, desta forma é estabelecida uma largura fixa para o modelo 2D (que no caso deste trabalho foi considerado um modelo com 1 m de largura), e avalia-se os resultados oriundos dos esforços do eixo “X” e “Y”. Neste formato deve-se destacar que o modelo não representa globalmente os fenômenos envolvidos no processo, justamente por não admitir a avaliação dos esforços na terceira dimensão, e salienta-se também a necessidade de algumas adaptações que serão abordadas neste trabalho, como a necessidade de incluir uma entrada de ar lateral para o descolamento da lâmina da face frontal do vertedor. Para a o modelo 3D tem-se uma avaliação global dos fenômenos, sendo considerados os esforços nos 3 sentidos, podendo ser verificada a linha de corrente nos 3 planos de ação. Uma das principais dificuldades em se trabalhar com o modelo tridimensional é a relação fator escala x custo. Quanto maior o fator de escala do modelo maior é custo de construção do mesmo, visto

que com um fator de escala grande o modelo tende a ficar com amplas dimensões, impactando diretamente no custo de montagem e na disponibilidade de espaço para construção do mesmo. Quanto menor o fator de escala menor o custo do modelo físico, porém tem-se um menor refinamento nos parâmetros de investigação, visto que as medidas do modelo ficam pequenas.

Visto os dois formatos de modelos físicos usuais, suas respectivas vantagens e desvantagens, foi utilizado para este trabalho a opção de modelagem hidráulica bidimensional, onde a largura do experimento se manteve fixa do início ao término, para isto viabilizou-se um maior fator de escala do modelo, resultando no aumento das dimensões e melhor refinamento nos resultados. As barragens em Gabiões possuem a soleira de parede espessa, visto que a mesma é composta por uma peça de Gabião revestida com concreto (com largura mínima de 1m na escala real), e apresentam em sua maioria ombreiras laterais que são responsáveis por direcionar o escoamento para o centro da estrutura, a fim de concentrar a lâmina vertente. Devido a soleira ser livre, sem interferências de pilares ou estruturas transversais, pode-se utilizar um modelo físico reduzido para a faixa de 1m, porém foi desconsiderada a ação das ombreiras laterais no modelo, ponto este que poderia ser avaliado num modelo tridimensional. Na Figura 56 pode-se observar a faixa de estudo do modelo físico desenvolvido.

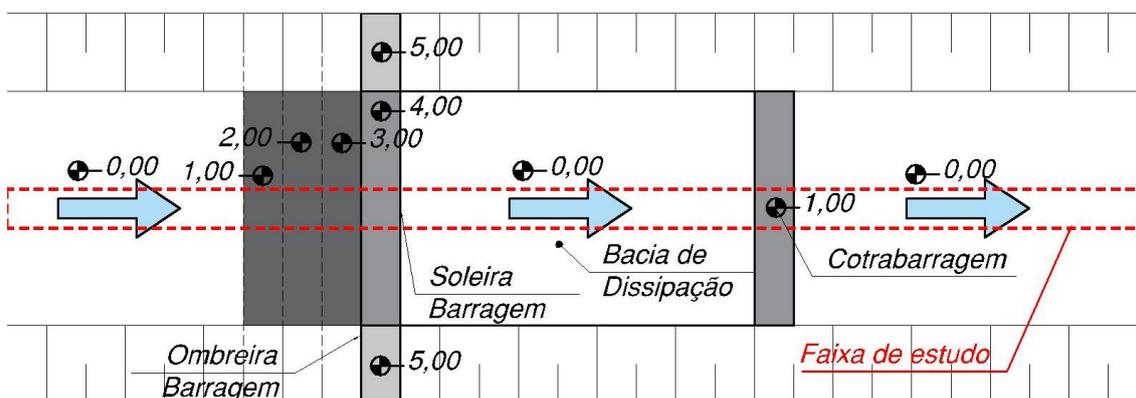


Figura 56. Faixa de estudo do modelo físico desenvolvido. Fonte: Próprio autor

O modelo físico bidimensional da barragem com geometria em Gabiões revestida de concreto, foi desenvolvido pela equipe técnica do CTH (Centro Tecnológico de hidráulica) no ano de 2004, a pedido da empresa Maccaferri do Brasil. Neste estudo foram mantidas as premissas geométricas de uma estrutura em Gabiões, com o aumento a base de acordo com o aumento da altura da

barragem. Respeitando a geometria e a forma dos Gabiões, o modelo foi construído com alvenaria.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Calibração e Refinamento de malha do OpenFoam

O software OpenFoam é comumente utilizado entre pesquisadores hidráulicos e mecânicos, esta ferramenta propicia a montagem de um modelo numérico e a resolução de escoamento de ar, água ou até mesmo escoamentos bifásicos. Mesmo sua aplicabilidade já sendo amplamente testada e validada, antes de iniciar um processo de avaliação de resultados comparativos entre os modelos físicos e numéricos, faz-se necessária a calibração e validação deste novo modelo numérico. A calibração de um modelo numérico acontece através da reprodução computacional de um modelo físico, com a inserção de todas as variáveis já conhecidas, e a partir deste ponto realizam-se testes variando itens ainda não conhecidos como rugosidade, modelo de turbulência e controle de jusante a fim de aproximar ao máximo os resultados obtidos no ambiente numérico computacional com os resultados capturados no modelo físico reduzido.

Para o refinamento da malha, sabe-se que quanto mais refinada maior é a precisão dos resultados, porém também é maior o tempo de processamento. Para um cenário ótimo faz-se necessário balancear a qualidade do resultado com o tempo de processamento.

Para a construção dos primeiros modelos numéricos na escala 1:6 (Mn) foram aplicadas malhas retangulares com espaçamento de 0,02m x 0,02m (x, y) até malhas mais refinadas com maiores tempos de processamento com espaçamentos de 0,005m x 0,005m (x,y). No OpenFoam assim como em outros programas de CFD as malhas bidimensionais são criadas utilizando um tamanho fixo na 3ª dimensão (y) com apenas uma célula nesta direção. Na maior parte dos modelos aqui estudados foi utilizada uma dimensão de 0,1m para a dimensão y.

Foram obtidas as cotas de água registradas no modelo físico que a partir de agora serão conhecidas como, carga d'água de montante da barragem "H" e o nível d'água de jusante da contrabarragem como "h", conforme pode-se observar na

Figura 57. Após a avaliação dos níveis d'água de montante da barragem e de jusante da contrabarragem, foram avaliadas as velocidades médias de jusante da contrabarragem afim de colaborar com a avaliação dos modelos.

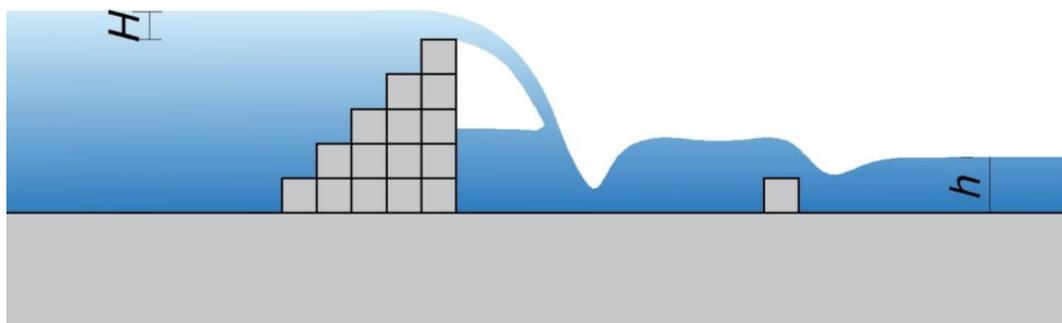


Figura 57. Níveis d'água medidos no modelo físico utilizados para calibração do modelo numérico. Fonte: Próprio autor

No modelo físico foi implantada uma entrada de ar próxima a soleira, afim de descolar a lâmina d'água da parede vertical da barragem e assim reproduzir resultados similares a casos reais. Para o modelo físico foi necessária também a utilização desta entrada de ar. No modelo numérico a entrada de ar foi definida como uma superfície onde a pressão é igualada a atmosférica (Figura 58).

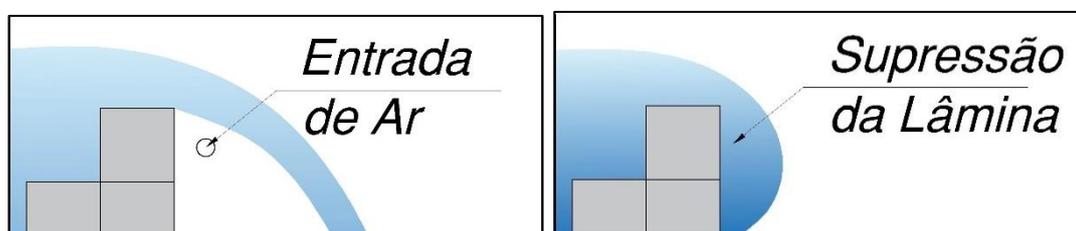


Figura 58. Ilustração da lâmina d'água com e sem entrada de ar. Fonte: Próprio autor

Outro parâmetro avaliado foi o comprimento da bacia do modelo físico, que a partir de agora será conhecido como " L_{b_e} ". Após a passagem da água pela soleira tem-se uma queda livre até a base da bacia de dissipação, neste impacto forma-se o ressalto hidráulico que auxilia na dissipação da energia cinética da água, e para o modelo físico reduzido foram utilizados alguns comprimentos para as bacias de dissipação (Figura 59).

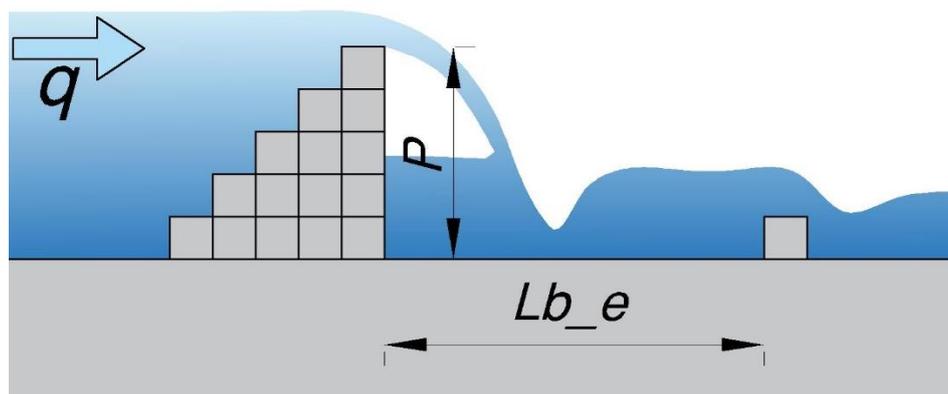


Figura 59. Ilustração do comprimento da bacia. Fonte: Próprio autor

4.2. Avaliação de distorções devido à condição de semelhança incompleta

Conforme já abordado no item 2.5.1. deste trabalho, para a modelagem física foi utilizada uma escala de 1:6, tendo em vista o espaço disponível no CTH, os custos de construção do modelo e o refinamento dos resultados a serem obtidos. Com a presença da escala adotada sabe-se que a semelhança entre o modelo e o protótipo é incompleta, já que não se pode manter uma semelhança do número de Reynolds e Froude ao mesmo tempo. Com a adoção da semelhança de Froude tem-se uma possível distorção nos resultados obtidos entre os modelos em escala real e reduzida. Para avaliar se estas distorções são relevantes nos resultados, foi montado um modelo numérico computacional na escala 1:1, e os seus respectivos resultados foram comparados diretamente aos resultados obtidos no modelo numérico com escala de 1:6.

5 MODELAGENS

5.1. Modelagem física FCTH/USP

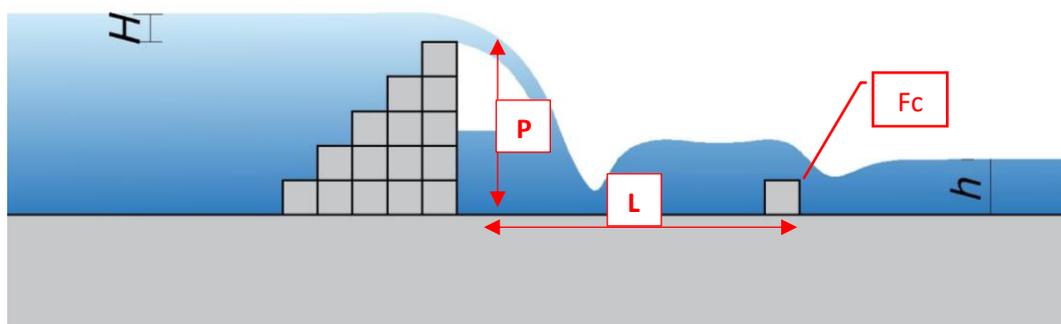
O modelo físico reduzido utilizado como base comparativa neste trabalho foi desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (na Universidade de São Paulo), mais conhecida como CTH. A modelagem foi desenvolvida a pedido da empresa Maccaferri, com o intuito de avaliar o comportamento hidráulico das barragens com geometrias em Gabiões e a respectiva bacia de dissipação locada a jusante da estrutura, para com isso otimizar e dar lastro os dimensionamentos empíricos deste tipo de estrutura.

Na Tabela 4 pode-se observar um resumo das principais geometrias ensaiadas no modelo físico, e na figura 60 fica claro o posicionamento de cada variável.

Tabela 4. Geometrias ensaiadas no modelo físico. Fonte: Próprio autor

Fc (m)	L (m)	P (m)			
0,3	4,5	2	3	4	5
0,3	6	2	3	4	5
0,3	7,5	2	3	4	5
0,3	9	2	3	4	5
0,5	4,5	2	3	4	5
0,5	6	2	3	4	5
0,5	7,5	2	3	4	5
0,5	9	2	3	4	5
0,75	4,5	2	3	4	5
0,75	6	2	3	4	5
0,75	7,5	2	3	4	5
0,75	9	2	3	4	5
1	4,5	2	3	4	5
1	6	2	3	4	5
1	7,5	2	3	4	5
1	9	2	3	4	5
0,5*	9	2	3	4	5

*Bacia rebaixada



Figura

60. Ilustração das variáveis da tabela 4. Fonte: Próprio autor

A escala geométrica do canal foi fixada em 1:6, sendo que foi respeitada a semelhança de Froude nas condições de escoamento previstas, como vazões, profundidades e velocidades do escoamento. As dimensões e geometria das barragens e das contrabarragens foram fornecidas pelo fabricante contratante do estudo, sendo que tais medidas são comumente utilizadas em soluções hidráulicas e se encaixam em dimensões padronizadas de mercado (Figura 61).

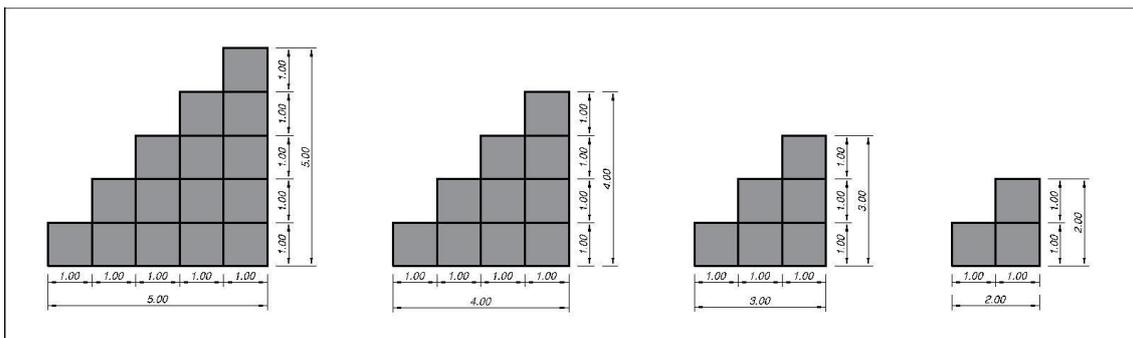


Figura 61. Dimensões das barragens ensaiadas (Escala de 1:1). Fonte: Próprio autor

Para o desenvolvimento do estudo foi utilizado um canal de alvenaria com largura fixa e 1m (visto que o modelo é bidimensional), com fundo horizontal. Para uma melhor visualização dos fenômenos envolvidos no modelo foi instalado um visor de acrílico somente em uma das paredes na zona de dissipação de energia (Figura 62).



Figura 62. Visor acrílico no trecho de dissipação. Fonte: CTH

O canal foi construído para suportar a instalação de uma barragem de 5m de altura (1:1), mais uma carga de água (“H”) de 1m passante sobre a crista da estrutura. O modelo era alimentado pelos reservatórios superiores. Esta alimentação de vazão chega até um vertedor triangular (na Figura 64 nota-se um vertedor similar ao utilizado no modelo), onde é feita a medição de vazão. Neste

caso foi escolhido o vertedor com a geometria triangular pois o mesmo possui maior eficiência na medição de vazões pequenas, como é o caso deste modelo.



Figura 63. Vertedor triangular similar ao modelo físico da barragem em gabiões Fonte: CTH

Com a entrada da água no canal o escoamento chega muito concentrado e para uma melhor distribuição do mesmo, entre o vertedor e a barragem o escoamento foi instalado um sistema de tranquilização e distribuição uniforme do escoamento (Figura 65). Este sistema é composto por uma caixa metálica retangular, onde as faces são constituídas de grelhas metálicas e o núcleo preenchido por pequenas pedras arredondadas. Quando o escoamento (ainda concentrado) passa por dentro deste tranquilizador, o fluxo é forçado a se distribuir entre os vãos do obstáculo poroso, ocorrendo assim uma melhor distribuição do escoamento. Alguns tipos de tranquilizadores também utilizados no CTH podem ser preenchidos com bolinhas de gude, visto que o efeito é bastante similar.



Figura 64. Tranquilizador de escoamento Fonte: CTH

A barragem também foi montada em alvenaria, seguindo as geometrias ilustradas na figura 65. Esta geometria denota o paramento a montante em degraus e o paramento de jusante vertical, propiciando desta forma uma queda livre da vazão vertente. Foram ensaiadas barragens com alturas de 2,0m, 3,0m, 4,0m e 5,0m, sendo medidas da crista da estrutura até o fundo do canal, esta altura a partir de agora será conhecida como “P”.



Figura 65. Barragem com $P=4\text{m}$, modelo físico reduzido Fonte: CTH

Devido à modelagem física ser construída no formato bidimensional pode-se verificar que o escoamento seria responsável por transportar para jusante a quantidade de ar presente na região próxima a face vertical da barragem, e isto ocasionaria uma supressão da lâmina vertente, não representando adequadamente o funcionamento da estrutura como ocorre nos casos reais ou até mesmo em modelos físicos tridimensionais. Houve a necessidade de adicionar na parede lateral do modelo físico uma entrada de ar próxima à soleira da barragem, fazendo com que a lâmina d'água vertente fosse descolada da parede vertical da barragem, e reproduzisse um perfil de água similar aos casos reais (Figura 66).



Figura 66. Entrada de ar na soleira Fonte: CTH

Um dos principais pontos de avaliação do modelo físico reduzido é a dissipação de energia gerada no escoamento através da bacia de dissipação localizada logo a jusante do paramento vertical da barragem, visto que existe um alto grau de turbulência, e deve-se criar condições propícias para que a dissipação ocorra de forma segura. Visando a dissipação de energia, sabe-se que a presença de um colchão de água na área da bacia favorece a dissipação e amortece o impacto da queda de água na base da bacia. Para a formação do colchão de água foi implantada uma linha de contrabarragem que foi instalada no final a bacia com a função de deter parcialmente a vazão gerando um pequeno remanso e garantindo a formação do colchão de água destacado. A contrabarragem foi representada no modelo com caixas de madeira preenchidas com pedras e travadas lateralmente (Figura 67). A decisão de fazê-las em madeira foi justamente a necessidade de locomoção das mesmas para os diferentes comprimentos de bacias ensaiados o modelo.



Figura 67. Contrabarragem localizada a jusante da bacia de dissipação. Fonte: CTH

5.1.2 ASSOREAMENTO

Conforme destacado no item 4.1, foi considerada a possibilidade de um assoreamento a montante, já que uma das finalidades da barragem em gabião é a retenção de sedimentos, para isto foi instalada uma placa de madeira (horizontal) ao tardo da barragem alinhada com a crista da estrutura (Figura 68) de forma a simular a elevação do fundo através da sedimentação. Com esta alteração no modelo foram verificadas a interferência da placa de madeira (barragem sedimentada) no nível d'água de montante e na capacidade de vazão da estrutura.

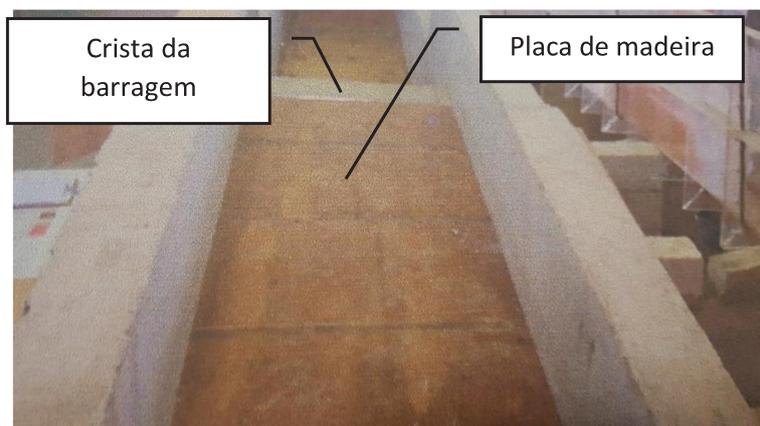


Figura 68. Placa de madeira para simular sedimentação. Fonte: CTH

5.1.3. REBAIXAMENTO DO NÍVEL DA BACIA

Conforme citado no item 2.4.2., existe um outro formato de bacia de dissipação que é comumente utilizada, e é capaz de gerar o colchão de água para dissipação sem necessitar da presença da contrabarragem, este formato é conhecido como bacia em depressão. No modelo físico foi contemplada esta opção aprofundando em 1m (0,17cm na escala 1:6) o leito do canal na região definida como bacia de dissipação (Figura 69). O comprimento do trecho rebaixado foi fixado em 9m (maior comprimento de bacia utilizado em todo o ensaio) para todas as alturas de barragens. Com o rebaixamento da bacia tem-se um maior desnível da soleira com a base da bacia, ou seja, o desnível ganha mais um 1m. Para o modelo físico a altura da barragem é conhecida como P , porém neste caso da bacia em depressão a altura da barragem ficou conhecida como P' .



Figura 69. Bacia em depressão. Fonte: CTH

5.2. Instrumentação

5.2.1. MEDIÇÃO DE NÍVEL D'ÁGUA

Um dos principais pontos a serem medidos no modelo é o nível d'água do escoamento em pontos estratégicos. A medição do nível d'água (NA) foi realizada em 2 pontos, sendo o primeiro a montante da barragem e o segundo a jusante da contrabarragem. Para a medição foram utilizadas pontas limnimétricas com precisão de 0,0001m. A escolha deste tipo de equipamento foi decorrente da necessidade da verificação do nível d'água médio do escoamento. Para esta medição é utilizada uma mangueira que é acoplada em uma saída da parede lateral do modelo, e é posicionada na vertical até o nível da linha d'água, onde é inserido um recipiente metálico. Com a variação do NA dentro do modelo tem-se também a variação do NA dentro do recipiente, e acima deste recipiente é instalada a ponteira limnimétrica, e assim consegue-se uma medição do nível d'água (Figura 70).



Figura 70. Sistema de medição de nível d'água. Fonte: CTH

5.2.2. MEDIÇÃO DE VAZÃO

A medição de vazão foi realizada através de um vertedor triangular. Devido a vazão do modelo ser pequena optou-se por este equipamento. Para a determinação da vazão, além do vertedor triangular fez-se uso de pontas limnimétricas para a medição da altura, com esta medição encontra-se a vazão passante. No ano do ensaio do modelo físico (2004), não foi registrada nenhuma foto do vertedor triangular presente no ensaio, porém através de uma visita técnica realizada no ano de 2018, pode-se registrar fotos de vertedores triangulares comumente utilizados no CTH, onde tem-se uma percepção melhor da peça (Figura 71).



Figura 71. Vertedor triangular similar ao utilizado no modelo físico. Fonte: CTH

Para cada condição de bacia de dissipação foi imposta a vazão máxima possível de escoar com condições admissíveis de energia, ou seja, mantendo todo o ressalto confinado entre o trecho da barragem e a contrabarragem subsequente. No ensaio físico esta etapa foi aferida com verificação visual do posicionamento do ressalto.

5.2.3. MEDIÇÃO DE VELOCIDADE

As medições das velocidades foram feitas em 3 pontos imediatamente a jusante da contrabarragem, no relatório desenvolvido pela equipe técnica do CTH não é apresentado o posicionamento exato destes medidores, mas pela descrição “imediatamente a jusante da contrabarragem”, que consta no relatório, entende-se que os medidores foram implantados numa distância pequena em referência a contrabarragem. O intuito da verificação da velocidade é avaliar a eficiência da bacia de dissipação em dissipar a energia da água, e com isso garantir um escoamento a jusante da contrabarragem com menor agressividade hidráulica. O equipamento utilizado para a medição da velocidade foi o micromolinete desenvolvido pelo CTH (Figura 72), sendo constituído de haste metálica com uma hélice em sua extremidade, além de um condicionador e módulo com contador. As medições das velocidades foram realizadas a uma altura de 0,6h, ou seja, a 60% a altura da lâmina d’água de jusante da contrabarragem.

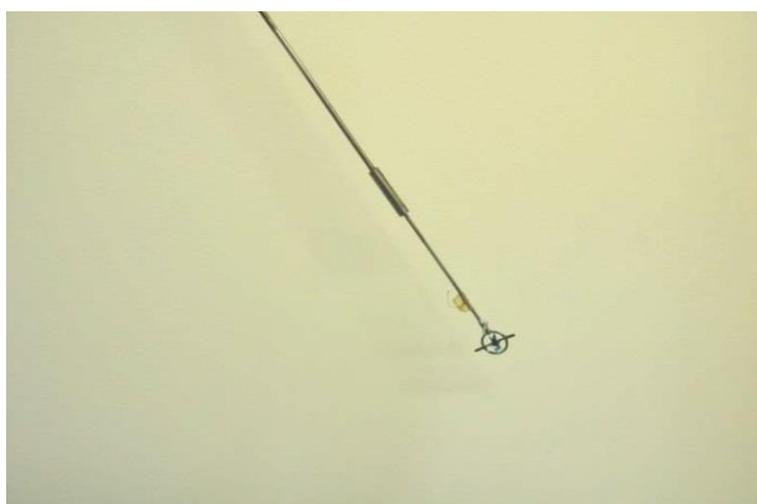


Figura 72. Micromolinete desenvolvido pelo CTH. Fonte: Morais 2015

5.3. Modelo Numérico – OpenFoam 4.0

Para a modelagem numérica computacional foi utilizada uma máquina com as seguintes configurações:

- Intel(R) Core (TM) i7-5500U
- CPU @ 2.40 GHz
- RAM 8,00 GB
- Sistema operacional 64 bits
- Placa de vídeo dedicada NVIDIA GEFORCE

Conforme as premissas adotadas no modelo físico reduzido, para o modelo numérico reduzido foram impostas como premissas as vazões de entrada, e os níveis de jusante da bacia de dissipação.

O tempo total de simulação do modelo numérico foi determinado por tentativa e erro afim de verificar a quantidade de etapas necessárias para a estabilização do escoamento estudado, visto que após a estabilização o modelo entra em regime permanente, e caso a duração configurada ultrapasse muito a etapa de estabilização, tem-se um tempo adicional desnecessário. Nas simulações o início dos cálculos com o modelo numérico foi considerado o espaço a montante do barramento parcialmente preenchido com água no instante “t=0” (Figura 73), esta adoção foi realizada após a verificação de que o modelo totalmente vazio no “t=0” e o modelo parcialmente cheio no “t=0” não representava mudanças consideráveis na etapa de estabilização do escoamento, mas somente na etapa inicial de enchimento. Outro motivo da adoção do preenchimento parcial do modelo no “t=0” foi a economia de tempo de resolução mantendo os resultados na etapa onde o escoamento se encontrava estabilizado.

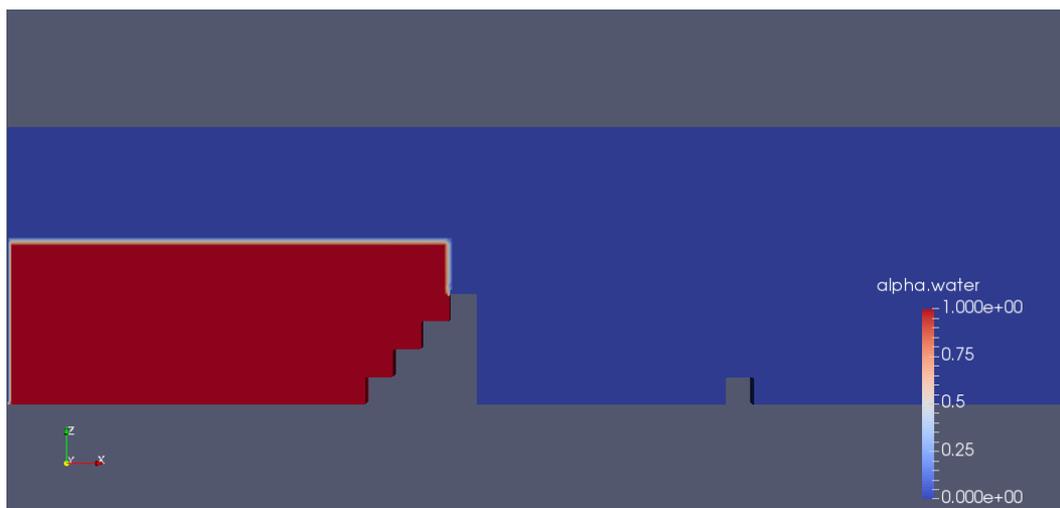


Figura 73. Preenchimento parcial de montante no $t=0$, modelagem numérica, Software para visualização Paraview 5.1.2 64bit. Fonte: Próprio Autor

No período inicial da modelagem computacional o nível d'água e as velocidades do escoamento apresentam grandes variações visto que ainda não foi alcançado o regime permanente. Após a estabilização do escoamento, começa-se a avaliar os resultados como válidos na comparação.

Nas figuras 74 e 75 podem-se observar os gráficos extraídos do Software Paraview 5.1.2 64bit, o visualizador gráfico normalmente utilizado com o OpenFoam, onde o modelo em questão se trata de um barramento com altura de 68cm (representa uma barragem de 4m de altura na escala real) com comprimento de bacia de 1,5m (representando uma bacia de 9m na escala real). Nos gráficos da figura 74 pode-se observar a variação do perfil de velocidades no trecho a jusante da bacia de dissipação ao longo do tempo, até a estabilização do escoamento, com pequenas variações da velocidade. Nota-se que a partir do passo 300 temos uma estabilidade no perfil de velocidade do escoamento, com velocidade máxima de 1,8m/s.

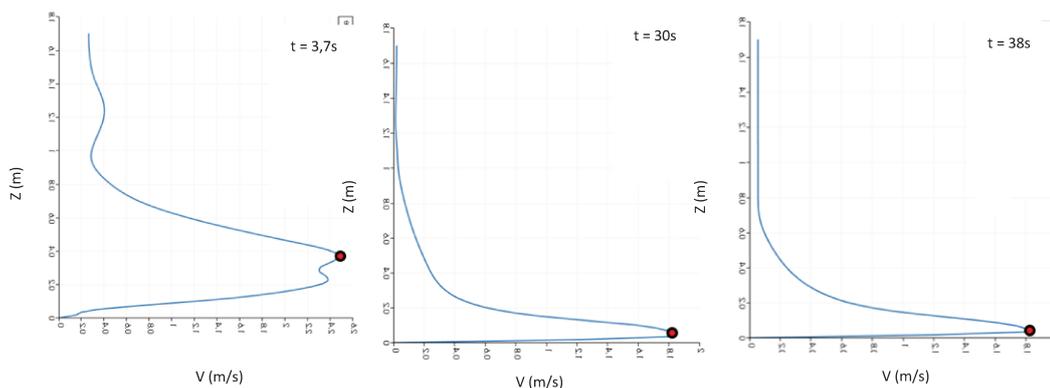


Figura 74. Gráficos de velocidade por nível vertical do corte, dos instantes de tempo de 3,7s, 30s e 38s. Fonte: Próprio Autor

Nos gráficos da figura 75 podem-se observar a variação de nível d'água ao longo do tempo, até a estabilização do escoamento, com pequenas variações de nível. No eixo “z” tem-se altura do corte realizado no modelo (base até topo), e no eixo “NA” tem-se a quantidade de água nas células, sendo “1” para totalmente cheia de água e “0” totalmente cheia de ar, e os valores intermediários o escoamento sendo bifásico. Nota-se que a partir do passo 300 temos uma estabilidade no perfil de nível d'água.

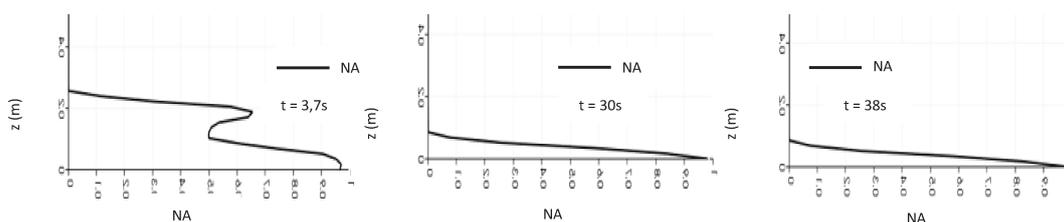


Figura 75. Gráficos da quantidade de água por nível vertical do corte, dos instantes de tempo de 3,7s, 30s e 38s. Fonte: Próprio Autor

5.3.1. CARACTERIZAÇÃO GERAL

Para a modelagem numérica computacional foi utilizada a ferramenta OpenFOAM 4.0 (Open Source Field Operation and Manipulation), um software de código livre, gratuito e desenvolvido pela “The OpenFOAM Foundation Ltda”. Além do software ser gratuito tem-se a vantagem de a ferramenta ser aberta, e com isso, ao longo dos anos vem recebendo melhorias e contribuições frequentes de diversos grupos de pesquisadores, onde tais pesquisas e estudos de diversos países podem ser incorporados na ferramenta. Este software resolve as equações de Navier-Stokes utilizando a média de Reynolds em nível de volumes elementares.

Dentro do OpenFOAM existe uma vasta biblioteca com inúmeros modelos de fluxos bidimensionais, tridimensionais, compressíveis e incompressíveis. Além das diversas geometrias e tipos de escoamentos, tem-se a possibilidade de utilizar diversos modelos de turbulência como k- ω , k-e, k- ω SST. A sequência de trabalho com o OpenFOAM está representada na Figura 76.

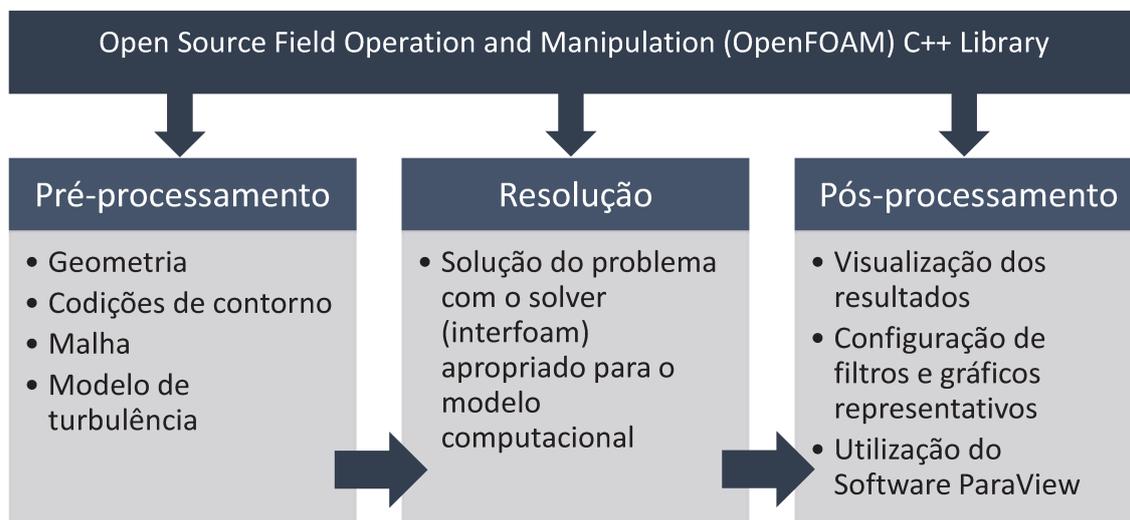


Figura 76. Sequência de trabalho com OpenFOAM. Fonte: Próprio Autor

5.3.2. GEOMETRIA

Para as geometrias a serem modeladas no OpenFOAM, respeitou-se adequadamente as medidas utilizadas no modelo físico reduzido. Conforme já abordado neste trabalho, para as peças de gabiões foram utilizadas medidas comumente conhecidas e padronizadas. Para a bacia de dissipação foram configurados 4 comprimentos, sendo eles: 4,50m(esc. Real), 6,00m(esc. Real), 7,50m(esc. Real) e 9,00m(esc. Real) . Como a geometria do Gabião é um pouco complexa e trabalhosa para ser modelada diretamente no OpenFOAM, escolheu-se ferramentas auxiliares para o desenho 3D. Foram utilizadas as ferramentas Autocad 2015 e Civil 3D 2015, ambos softwares da Autodesk, para a elaboração do desenho da barragem, da contrabarragem e da comporta para regular o nível de jusante. Com os desenhos 3D montados nas ferramentas da Autodesk, exportou-se os arquivos no formato STL, e após a exportação concluída, tais arquivos foram utilizados para a criação da superfície de contorno das estruturas dentro do OpenFOAM.

As barragens modeladas possuem alturas de 2m(esc. Real) a 5m(esc. Real), e com a geometria em Gabiões, quanto maior é a altura maior também se torna a base proporcionalmente ($V: 1m - H: 1m$). Com o intuito de economizar no tempo gasto para os desenhos das barragens nos softwares da Autodesk, tomou-se a decisão de desenhar uma única barragem com 5m de altura, e exportar o STL com esta altura máxima, pois conforme as alturas dos modelos computacionais diminuía, o STL poderia ser movido para baixo reduzindo desta forma também sua respectiva altura e atendendo o nível da barragem a ser modelada, Figura 77.

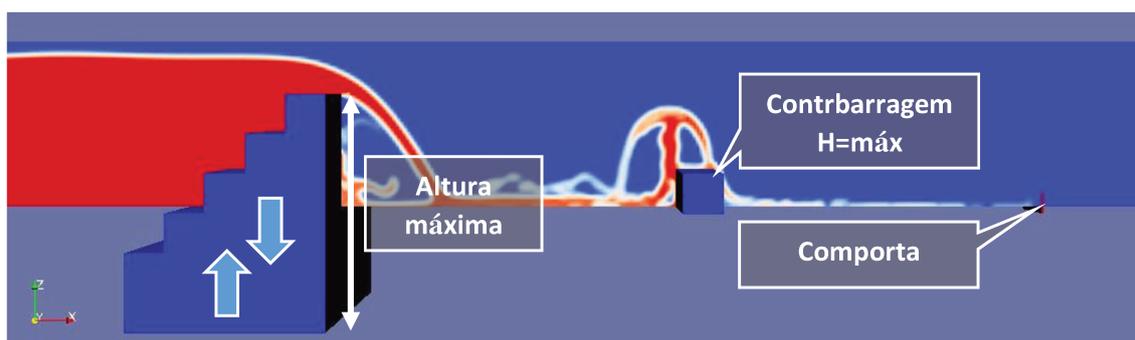


Figura 77. Geometria dos Gabiões. Fonte: Próprio Autor

A mesma estratégia foi realizada para a contrabarragem e para a comporta de jusante, ou seja, foi criado um único STL contemplando a altura máxima ensaiada fisicamente, e conforme os modelos computacionais de menores alturas eram construídos, deslocava-se as estruturas para fora do campo onde seria criada a malha computacional.

5.3.3. MALHA COMPUTACIONAL

A malha computacional, também conhecida como discretização do modelo numérico, foi configurada através do sistema cartesiano, e com formato quadrilátero. Os pontos de conexão das células são conhecidos como nós. Para a definição da malha computacional foi utilizado o utilitário Blockmesh do OpenFoam. A entrada de dados nos programas e aplicativos do OpenFoam são feitas editando arquivos de dados chamados dicionários, para o Blockmesh é utilizado o BlockmeshDict. Para a definição da malha foi necessário incluir todas as coordenadas dos vértices que compunham o espaço da malha computacional (Figura 78). Para a modelagem da malha levou-se em consideração as medidas

ensaiadas no modelo físico reduzido. O tamanho da malha passou por um processo de refinamento várias vezes, partindo de uma malha de quase 3cm para uma malha de 1,5cm, a qual representou os resultados de forma coerente com os resultados obtidos no modelo físico. Com o refinamento da malha chegou-se a aproximadamente 25.000 células e 45.000 pontos. Devido ao ensaio físico ter sido realizado no formato bidimensional, mantivemos uma espessura em “y” para o modelo físico de 0,1m(1:6).

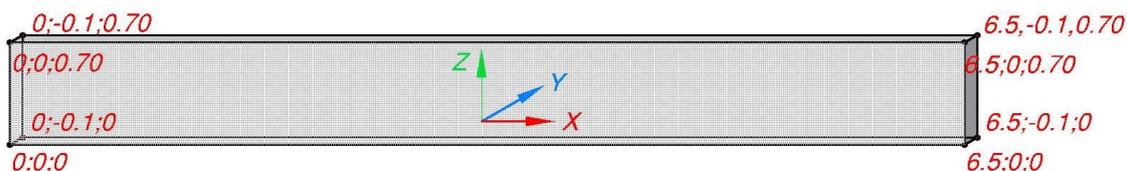


Figura 78. Coordenadas da malha utilizada na escala 1:6. Fonte: Próprio Autor

Após a estruturação da malha através do BlockMeshDict, foi necessária a inclusão dos arquivos STLs que constavam a barragem, a contrabarragem e a comporta de jusante para dentro do ambiente já modelado. Com a inclusão das estruturas supracitadas, executou-se um aplicativo capaz de adequar a malha configurada pelo BlockMeshDict com o contorno das estruturas inseridas em STL, com isso foi possível a modelagem dos Gabiões e seus respectivos escalonamentos, sem a necessidade de configurar cada vértice de estrutura, etapa esta que tomaria muito tempo. Nas Figuras 79 e 80 podem-se notar as malhas construídas pelo BlockMeshDict e já adequada com as estruturas em gabiões.

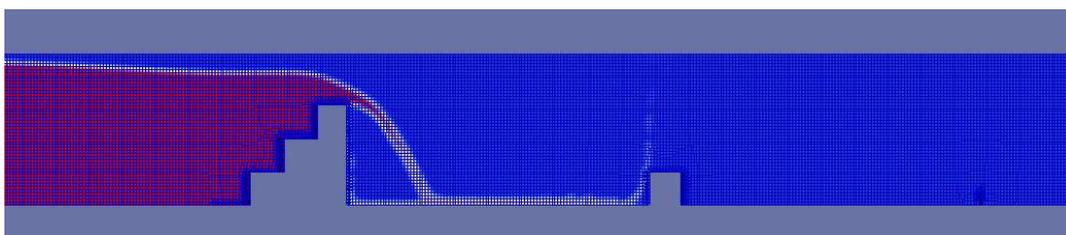


Figura 79. Malha computacional utilizada no modelo. Fonte: Próprio Autor

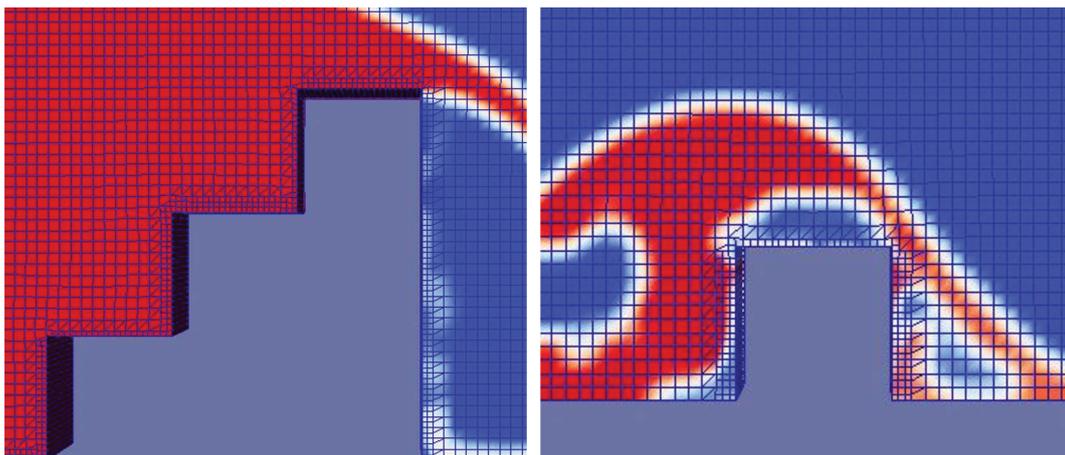


Figura 80. Detalhe da malha na região da barragem e na região da contrabarragem.
Fonte: Próprio Autor

Com o intuito de otimizar o tempo de resolução do modelo, adotou-se no eixo “y” (espessura do modelo numérico) somente uma divisão, visto que, pelo modelo ser bidimensional esta superfície não tem muita influência no resultado do modelo, e desta forma diminui-se a quantidade de células e consequentemente o tempo de solução do modelo, figura 81.

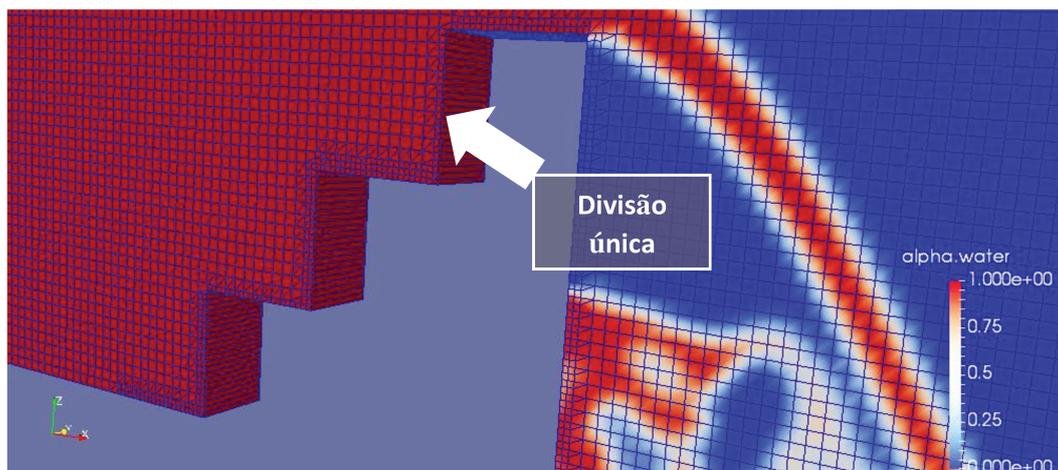


Figura 81. Única divisão no eixo “y” . Fonte: Próprio Autor

Pode-se observar que a malha apresenta um refinamento nas proximidades do contorno da barragem. As células neste trecho são gradativamente menores, sendo que se aproximam com cerca de metade do seu tamanho, e ao chegar na superfície de contorno da barragem (dam) apresentam 1/6 do seu tamanho real. Este refinamento é justamente para uma melhor qualidade de resultado nesta transição do escoamento com a superfície de contorno da barragem.

5.3.4. MODELO DE TURBULÊNCIA

Alguns autores dizem que uma das características que denotam um escoamento turbulento é a diversidade de escalas que o caracteriza (Silveira Neto, 2007). Segundo Versteeg; Malalasekera, 1995, escoamentos com número de Reynolds abaixo de 2300 apresentam características suave com camadas de água que se deslizam uma sobre a outra e pode ser caracterizado como escoamento laminar, porém caso o número de Reynolds fique acima deste valor (2300) o escoamento sofre com uma série de eventos que levam a uma mudança drástica no escoamento, neste caso o regime é conhecido como turbulento.

O grau de liberdade do escoamento está diretamente ligado às instabilidades geradas ou nas escalas nas quais elas acontecem, e a determinação do número de graus de liberdade está intrinsecamente ligado com o número de Reynolds. Mesmo em escoamentos onde o número de Reynolds é baixo torna-se basicamente impossível realizar a solução para todos os graus de liberdade, ou seja, o número de nós de uma malha teria que ser muito grande (conforme pode-se observar na equação XX) encarecendo muito o custo da modelagem numérica, mesmo utilizando um super-computador, segundo (Lobosco 2013).

$$N_{gl} = \left(\frac{L}{l_d}\right)^3 = Re_L^{\frac{9}{4}} \quad (74)$$

L = Maior comprimento característico do escoamento

l_d = Menor comprimento característico do escoamento

Re = Número de Reynolds

N_{gl} = Número de graus de liberdade

Em um canal plano com $Re=105$ o número de pontos da malha computacional deveria ser de 109, agora se o número de Reynolds aumentar para 106 o número de pontos deve aumentar para 1012, com este número de pontos a malha computacional fica praticamente inviável de ser modelada e avaliada, segundo Rodi (1994). Visando a viabilidade da modelagem começou-se a avaliar o comportamento médio do escoamento e modelagem de suas respectivas flutuações, conhecido como modelagem da turbulência com equações de fechamento. Para esta avaliação pode-se adotar dois caminhos, sendo o primeiro

com um custo computacional ainda muito elevado (LES – Large Eddy Simulation), devido às malhas computacionais terem que apresentar um alto grau de refinamento, e o segundo caminho é uma abordagem que teve início numa proposta de decomposição de Reynolds, onde variáveis instantâneas do escoamento turbulento são destacadas como a soma do valor médio no tempo e um flutuante. Para os termos não lineares aparecem novas incógnitas ao sistema de equações conhecida como tensões de Reynolds. Com o avanço dos estudos chegou-se aos modelos “heurísticos” que são utilizados para fechar os sistemas de equações devido à presença de termos não lineares que aparecem nas equações do movimento e de transportes de escalares, segundo Lobosco, 2013. Os modelos de turbulência são basicamente utilizados para a resolução das tensões de Reynolds, e os mesmos atuam modificando as equações originais de Navier-Stokes, inserindo valores médios e flutuantes, reconfigurando as equações de Navier-Stokes pelas médias de Reynolds, fazendo com que não seja necessária a resolução das flutuações turbulentas e desta forma reduzindo o esforço computacional, segundo Dias 2011.

Diversos modelos de turbulência são disponíveis no software OpenFOAM, e o modelo escolhido para a modelagem numérica foi o $k-\omega$ SST, visto que o mesmo tem recebido grande atenção recentemente devido a sua precisão principalmente nas regiões com descolamento do escoamento e tem sido utilizado em trabalhos técnicos como o de Dias (2011). Segundo Alencar, 2007 uma das grandes diferenças entre o modelo $k-\omega$ SST para o modelo $k-\epsilon$ é que o primeiro pode ser utilizado para descrever o comportamento do escoamento na camada limite, já o segundo é capaz de descrever somente o comportamento do escoamento fora da área da camada limite. Como a escala nos escoamentos turbulentos é bastante variada, sendo que existem escalas maiores e escalas consideravelmente menores no escoamento, o modelo SST $k-\omega$ pode avaliar este comportamento do fluxo. Caso o modelo possua uma interface bem definida entre os fluidos (ar/água) os resultados dos modelos de turbulência $k-\omega$ SST e $k-\epsilon$ são similares, considerando que o modelo é homogêneo.

O modelo $k-\omega$ SST associado com a vorticidade de Von Karman (ω) é apresentado conforme a equação 75.

$$\omega = c \times \frac{k^2}{l} \quad (75)$$

l = Comprimento de mistura de Prandtl pela coordenada y ($l = K \times y$). K sendo a constante de Von Karman utiliza-se o valor experimental de 0,41.

c = Constante de proporcionalidade

$$k = \frac{1}{2} \times (V_i \times V_j)$$

Já a viscosidade turbulenta num escoamento turbulento é apresentada pela equação 76.

$$u_t = \rho \times \frac{k}{\omega} \quad (76)$$

ρ = massa específica da água

Com isso é possível substituir as equações 75 e 76 nas equações de transporte para a obtenção das duas equações de k e ω .

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + (\rho k) \frac{\partial V_i}{\partial x_i} = \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \left[u_k \times \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \tau_i}{\partial x_i} \times V_j \right) - \beta^* \times \rho \times k \times \omega \quad (77)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \times \omega \times V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_\varepsilon \times \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \alpha \times \frac{\omega}{k} \times \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \tau_i}{\partial x_i} \times V_j \right) - \beta \times \rho \times \omega^2 \quad (78)$$

Onde:

ω = Vorticidade associada a vorticidade ω de Von Karman

$\alpha = 0,556$ (constante)

$\beta = 0,074$ (constante)

$\beta^* = 0,09$ (constante)

5.3.5. CONDIÇÕES CONTORNO

As condições de contorno, como o próprio nome já diz, é a configuração adotada para as superfícies limítrofes do modelo a ser estudado. Sem as configurações correta das condições de contorno se torna impossível a solução do sistema de equações pelo solver adotado. O tema “condições de contorno” é bastante complexo, visto que não se trata apenas de uma geometria, mas sim de uma parte importante para a solução numérica. No OpenFOAM a condição de contorno pode ser definida por 3 conjuntos de dados, figura 82.



Figura 82. Divisão da condição de contorno. Fonte: Próprio Autor

Para explicar melhor cada etapa da definição da condição do contorno utilizado no OpenFOAM, tal assunto será abordado separadamente nos itens 2.1.5.1, 2.1.5.2, e 2.1.5.3.

5.3.6. NOME DO CONTORNO

Cada superfície de contorno a ser configurada terá uma posição específica na região limite do modelo numérico computacional. As regiões limites indicadas no modelo são posteriormente conectadas ao tipo de contorno e às condições específicas de cada limite. Dentro do OpenFOAM existem diversas nomenclaturas de contorno a serem utilizadas e na figura 83 estão sendo demonstradas todas as nomenclaturas utilizadas para as superfícies de contorno do modelo estudado.

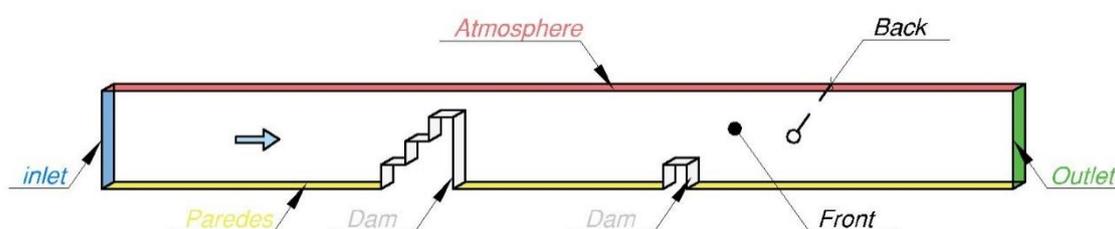


Figura 83. Contorno do modelo numérico. Fonte: Próprio Autor

5.3.7. TIPOS DE CONTORNO

Os tipos de contornos utilizados no modelo são configurados de acordo com a função e interferência de cada contorno na resolução dos sistemas de equações. Dentro do software existem diversos tipos de contornos, mais conhecidos como “patches”. Estes patches determinam como tais superfícies devem estar programadas para agir durante a modelagem. Abaixo pode-se observar diversos tipos de contorno disponíveis no OpenFOAM, além dos tipos de contornos

abordados neste item existem outros tantos mais que não serão abordados neste trabalho.

Patch

Tipo genérico que não contém informações geométricas ou topológicas sobre a malha.

Tipo utilizado para a configuração da face de entrada (Inlet), de saída (Outlet) e Topo do modelo (Atmosphere).

Wall

Usado no contorno que coincide com as paredes sólidas necessárias em modelos físicos.

Utilizado na base do modelo computacional, visto que no modelo físico se tratava de uma base de concreto.

SymmetryPlane

Usado para plano de simetria.

Este tipo de patch não foi utilizado em nenhum limite de controle dos modelos computacionais.

Empty

Utilizado nos limites de modelos 2D, onde a terceira dimensão não é necessária. Também pode ser utilizada em modelos 2D.

Este tipo foi utilizado na parede anterior e na parede posterior do modelo. Como o modelo foi ensaiado de forma bidimensional, avaliou-se desta forma o fluxo sem a interferência das paredes frontal e posterior, desprezando os esforços realizados no eixo “Y”, cartesiano.

Um patch pode incluir uma ou mais áreas fechadas da superfície de contorno que não precisam necessariamente estar fisicamente conectadas.

5.3.8. CONDIÇÕES DE CONTORNO OPENFOAM

Todo Patch inclui uma entrada de condição limite, e estas condições vão desde simples “fixedvalue” para condições inlet, por exemplo, até um complexo

“waveTranmissive” aplicado no outlet. Dentro do OpenFOAM existe uma vasta biblioteca de condições de contorno que podem ser utilizadas e configuradas nos modelos numéricos. Esta não é uma lista completa de todas as condições de contorno presentes no OpenFOAM, mas sim as principais e mais usuais.

FixedValue

O valor da velocidade é especificado pelo valor inserido.

Esta condição foi utilizada na base do modelo e no contorno da barragem. Para a configuração desta condição de contorno, deve-se informar as velocidades no eixo x, y e z de tais contornos. Conforme figura 84.

```

42
43   paredes
44   {
45       type          fixedvalue;
46       value         uniform (0 0 0);
47   }
48
49   dam
50   {
51       type          fixedvalue;
52       value         uniform (0 0 0);
53   }
54

```

Figura 84. Condições de contorno e suas respectivas velocidades. Fonte: Próprio Autor

zeroGradient

O gradiente normal variável é zero.

Esta configuração de contorno foi utilizada no modelo numérico justamente o limite de saída, mais conhecido como Outlet. Com o gradiente da superfície de saída igual a zero, tem-se um deslocamento do escoamento de montante para jusante. Na figura 85, pode-se observar a configuração do outlet.

```

30   }
31
32   outlet
33   {
34       type          zeroGradient;
35   }
36

```

Figura 85. Condições de contorno no outlet. Fonte: Próprio Autor

pressureInletOutletVelocity

A aplicação é extremamente comum para patches onde algum fluxo de entrada acontece, e a velocidade de entrada não é conhecida. Isto inclui a aplicação em limites “Atmosphere” em diversos tutoriais do OpenFOAM, onde somente a pressão é conhecida e saídas onde o fluxo reverso pode acontecer.

Esta condição de contorno foi utilizada na parte superior do modelo numérico. A posição deste contorno foi definida de forma que não ficasse muito elevada a ponto de gerar uma região com grande número de células desnecessárias, as quais não afetariam em nada o escoamento e obrigariam o programa a demorar mais tempo para a solução do cenário, e de forma que não ficasse muito baixa a ponto de interferir na lâmina d’água do modelo, alterando desta forma erroneamente os resultados. Para isto foi calculada a altura da barragem + o nível d’água de montante “H” e acrescentado uma folga de segurança, figura 86.

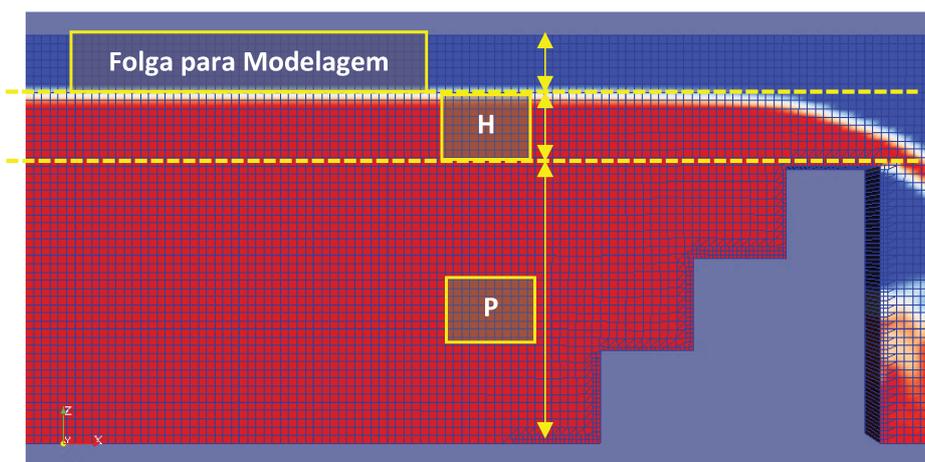


Figura 86. Alturas necessárias para a configuração do contorno Atmosphere – pressureInletOutletVelocity. Fonte: Próprio Autor

Houve também a necessidade de ser criada mais um contorno que foi chamado de “Entradaar”. Este contorno foi configurado próximo a crista da barragem, e possuía a função de injetar ar no sistema afim de impedir com que a lâmina oriunda do vertedor colasse na face a estrutura. Como o modelo foi elaborado de forma bidimensional, e com as condições de front e back limitando terceiro eixo do modelo, todo o ar presente no caminho do escoamento era transportado para jusante, até um ponto onde se criava uma subpressão na lâmina vertente e a mesma se apresentava colada na face da barragem. Após

configuração da superfície de contorno “Entradaar”, a lâmina descolou da face da barragem e teve novamente sua queda livre na bacia. Na figura 80 pode-se notar a presença da entrada de ar no modelo.

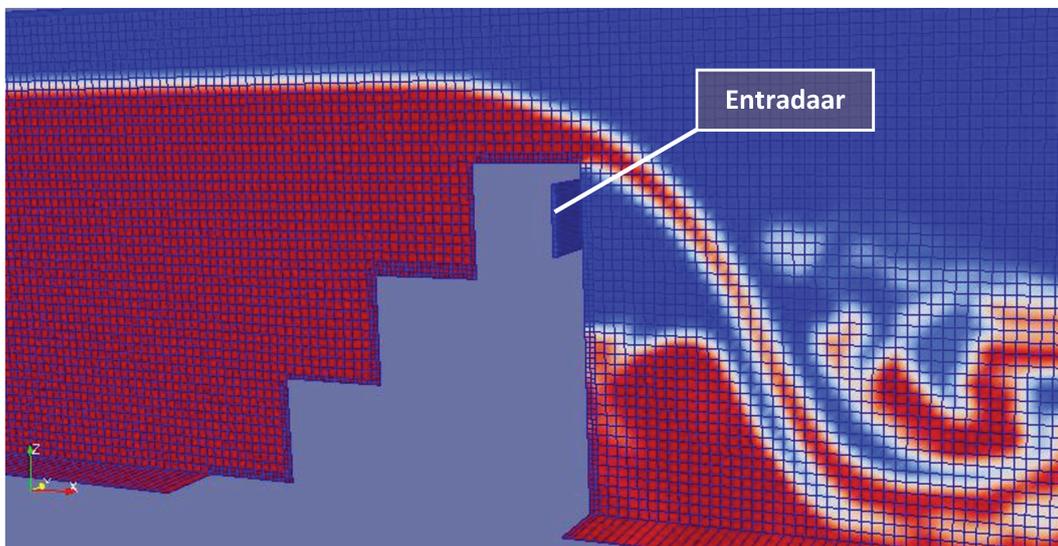


Figura 87. Condição de contorno da “Entradaar”. Fonte: Próprio Autor

variableHeightFlowRateInletVelocity

Condição de contorno que possibilita a configuração de uma vazão de entrada.

Esta configuração foi utilizada no “inlet”, ou seja, no contorno de entrada do modelo. Para a configuração deste valor foram utilizadas as vazões descritas no relatório de ensaio físico da FCTH. Neste relatório as vazões são apresentadas em $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ (q) para o protótipo. Com isso foi realizada uma conversão da vazão de protótipo para uma vazão de modelo na escala 1:6 (equação 79), e após esta transformação foi encontrada a vazão do modelo numérico, levando em consideração a espessura do modelo (eixo “y”) de 0,1m (equação 80).

$$\frac{q_p}{6^{1,5}} = q_m \quad (79)$$

$$Q_n = q_m \times e \quad (80)$$

Onde:

q_p = Vazão unitário do protótipo ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

q_m = Vazão unitário do modelo ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)

Q_n = Vazão do modelo numérico (m^3/s)

e = Espessura do modelo numérico (m)

Na tabela 5 pode-se verificar um resumo de todas as condições de contorno utilizadas na criação dos modelos numéricos utilizando a ferramenta OpenFOAM.

Tabela 5. Condições de contorno utilizadas para o modelo numérico. Fonte: Próprio Autor

	Nome	k	Nut	Omega	p_rgh	U
Condição	inlet	FixedValue	calculated	FixedValue	fixedFluxPressure	variableHeightFlowRateInletVelocity
	outlet	zeroGradient	calculated	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
	atmosphere	inletOutlet	calculated	inletOutlet	totalPressure	pressureInletOutletVelocity
	paredes	kqRWallFunction	nutkWallFunction	omegaWallFunction	zeroGradient	fixedValue
	front	empty	empty	empty	empty	empty
	back	empty	empty	empty	empty	empty
	dam	kqRWallFunction	nutkWallFunction	omegaWallFunction	zeroGradient	fixedValue
	entradaar	inletOutlet	calculated	inletOutlet	totalPressure	pressureInletOutletVelocity

5.3.9. COLETA DE RESULTADOS

Para a leitura dos resultados e visualização gráfica do modelo foi utilizado o software Paraview, esta ferramenta possui código aberto indicada pelo próprio OpenFOAM. O Paraview usa o Visualization Toolkit (VTK), e pode abrir qualquer arquivo neste formato. O OpenFOAM inclui o utilitário foamToVTK para converter dados de seu formato nativo para o formato VTK, o que significa que qualquer ferramenta gráfica baseada em VTK pode ser usada para pós-processar casos do OpenFOAM.

Para acessar o Paraview e analisar os resultados oriundos do OpenFOAM, basta dar o comando 'parafoam' na linha geral de comando do terminal, que a ferramenta abrirá automaticamente no computador. Uma vez aberto o Paraview, pode-se notar que ele concentra as informações gerais do modelo em uma coluna localizada na extremidade esquerda (ver figura 88), opções de filtros, ferramentas, vistas, e botões para avançar no tempo do modelo na parte superior, e na extremidade direita o programa apresenta sua interface gráfica, onde é possível visualizar o modelo 2D ou 3D.

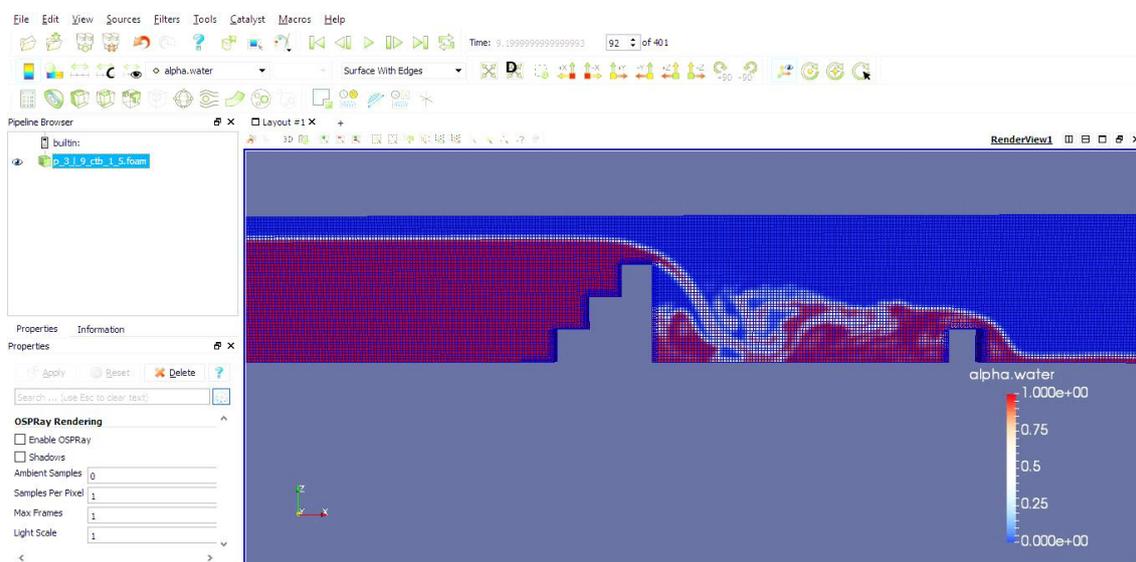


Figura 88. Visualização geral do Paraview. Fonte: Próprio Autor

O comando 'parafoam' pode e deve ser dado durante as etapas de construção o modelo numérico, pois caso haja algum erro de malha, superfícies de contorno, geometrias ou qualquer outro ponto do modelo, a visualização prévia desta

ferramenta pode auxiliar na identificação destes erros e numa pronta ação de correção.

O programa possibilita a visualização das malhas externas e internas do modelo, assim como diversas vistas e uma interação livre com o cursor na área gráfica localizada a direita do Paraview. Com o avanço no tempo do modelo pode-se observar a mudança do escoamento em concordância com os passos no tempo localizados na parte superior do programa. Na parte gráfica do modelo tem-se a possibilidade de selecionar qual variável será apresentada no modelo nos passos de tempo, na figura 89 estão sendo apresentadas visualizações diferentes do mesmo modelo.

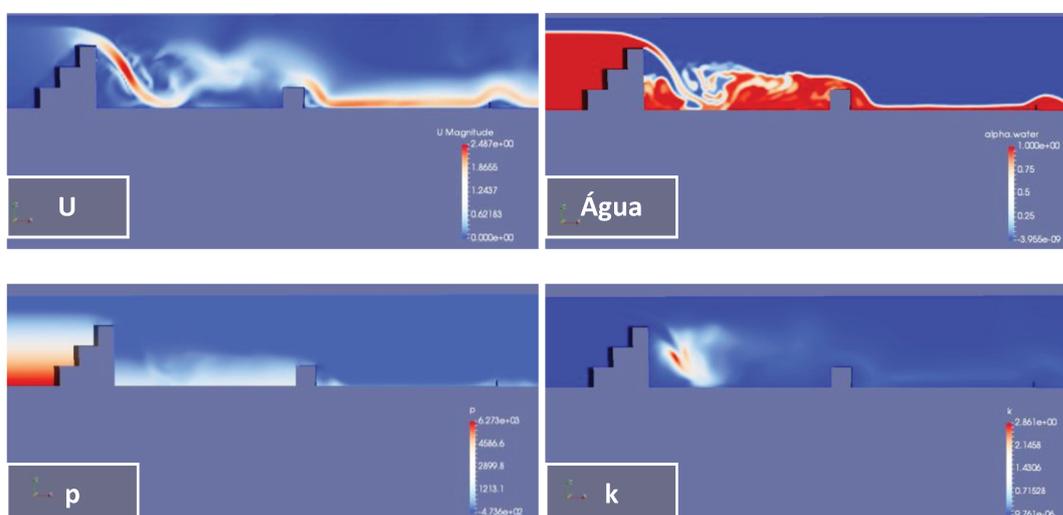


Figura 89. Visualizações de diversas variáveis para o mesmo modelo. Fonte: Próprio Autor

Com a ferramenta Paraview é possível obter claramente os resultados de níveis d'água, velocidades, pressões, etc. Através desta ferramenta foi realizado um levantamento de dados de saída dos modelos para que fosse possível a validação da ferramenta para este tipo de aplicação.

No item 2.1.6.2 serão apresentadas as formas adotadas dentro do Paraview para a coleta de dados de saída do modelo.

5.3.10. COLETA DE DADOS NO PARAVIEW

A coleta dos resultados do Paraview pode ser realizada de algumas formas e neste item serão abordadas as principais formas que foram utilizadas para esta extração de dados. Uma das maneiras mais simples de extrair os resultados do Paraview é através de um filtro chamado 'PlotOverLine'. Este filtro é basicamente uma linha de medição que pode ser configurada em qualquer espaço do modelo, nesta linha pode-se indicar as coordenadas de início e término em todas as direções, figuras 90 e 91.

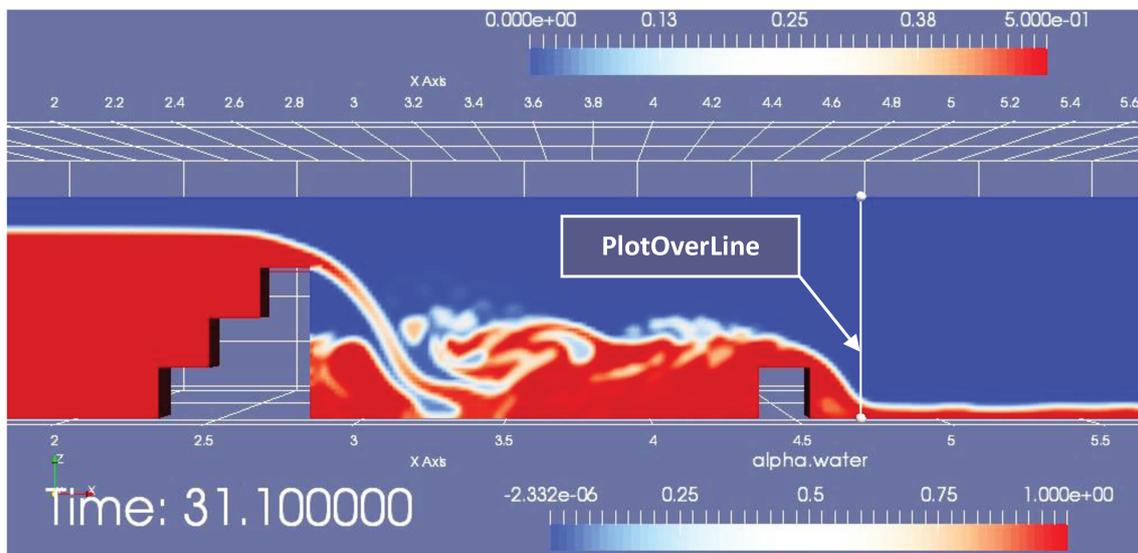


Figura 90. Localização do 'PlotOverLine'. Fonte: Próprio Autor

Line Parameters			
Length:	0.75		
<input checked="" type="checkbox"/> Show Line			
Point1	4.7	-0.10000000	0
Point2	4.7	-0.1	0.75
Pick Both Points			

Figura 91. Coordenadas de início e término nos 3 eixos (x, y e z) . Fonte: Próprio Autor

Como o PlotOverLine configurado pode-se avaliar diversas variáveis em função do tempo: Neste filtro o Paraview é capaz de mostrar um gráfico, onde o eixo "y" se caracteriza pela variável a ser avaliada e o "x" se caracteriza pela altura do corte PlotOverLine. As variáveis a serem avaliadas podem ser pressão, velocidades, níveis d'água, etc. Na figura 92 tem-se um gráfico extraído do filtro

PlotOverLine que apresenta as velocidades e níveis d'água da seção do corte num determinado tempo de modelagem.

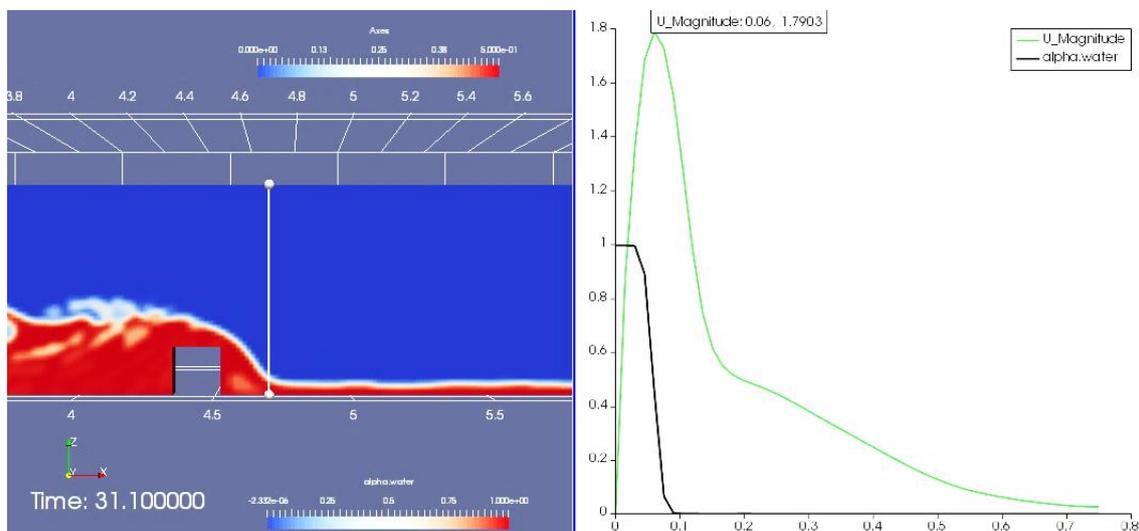


Figura 92. Gráfico extraído no PlotOverLine. Fonte: Próprio Autor

O lado direito da figura 92 mostra os níveis de velocidade e lâmina d'água no eixo "y" e a altura do corte PlotOverLine no eixo "x". Neste caso por exemplo pode-se verificar que a velocidade máxima da seção é na ordem de 1,80m/s na cota 0,06m, e que a altura da lâmina d'água a jusante da contrabarragem é algo em torno de 0,1m.

O filtro PlotOverLine pode ser executado em qualquer lugar do modelo computacional e pode ser repetido em lugares distintos ao mesmo tempo. Nos modelos que foram produzidos neste trabalho foram feitas 3 medições para a calibração com o modelo físico reduzido. Abaixo podem ser verificados as coordenadas de captura de dados para o modelo com comprimento de bacia de 4,5m (esc. Real).

Nível d'água a montante da Barragem (H)

$$X = 2,5$$

$$Y = -0,10$$

$$Z = 0 \text{ a } 0,75$$

Velocidade a jusante da contrabarragem (Vm)

$$X = 4,7$$

$$Y = -0,10$$

$$Z = 0 \text{ a } 0,75$$

Nível d'água a jusante da contrabarragem (h)

$$X = 5,5$$

$$Y = -0,10$$

$$Z = 0 \text{ a } 0,75$$

6 Resultados

Para a avaliação dos resultados foi necessário um processo de estudo e captação de dados dos modelos físicos reduzidos desenvolvidos pela FCTH no ano de 2004. Como a modelagem física havia sido desenvolvida há mais de 15 anos, a estrutura do modelo já tinha sido desmontada, o que exigiu algumas reuniões com os técnicos responsáveis pelo ensaio desenvolvido na época, assim como uma avaliação minuciosa do relatório desenvolvido pela equipe do FCTH. Com os dados oriundos do modelo físico reduzido em mãos, foram desenvolvidos diversos modelos numéricos com a escala reduzida (1:6, igualmente a escala utilizada no modelo físico), com a finalidade de se obter resultados de velocidades e níveis d'água semelhantes aos encontrados no modelo físico. Os modelos numéricos inicialmente desenvolvidos através do software OpenFoam apresentaram resultados expressivamente distintos dos coletados nos modelos físicos, com isso foram necessários ajustes nestes modelos iniciais como, refinamento da malha e determinação do controle de jusante (visto que no modelo físico, a equipe técnica trabalhou com uma comporta de jusante). Com os devidos ajustes realizados nos modelos numéricos, os resultados dos mesmos se aproximaram dos resultados obtidos nos modelos físicos, com isso iniciou-se então uma bateria de modelagem numéricas com as variações de altura da barragem, comprimento da bacia, altura da contrabarragem, etc.

Para a comparação dos resultados foram utilizados os valores apresentados no relatório final do CTH, para os modelos físicos reduzidos, e planilhas montadas através da extração de dados do modelo numérico produzidos no OpenFoam com interface gráfica do software Paraview. Antes de realizar a comparação direta entre os valores, foi necessário realizar algumas conversões nos valores apresentados no relatório final do CTH, visto que o mesmo apresenta valores para protótipo, mesmo que o modelo estudado foi montado numa escala de 1:6. Além das conversões, o relatório do CTH apresentava o dado vazão como unitária, ou seja, para cada metro de largura de base. O modelo físico reduzido possuía uma largura fixa de 1m, porém o modelo numérico reduzido foi construído com uma largura de 0,10m, visto que a análise era 2D e se recomenda que as células tenham dimensões semelhantes nas 3 direções durante a geração da malha. Como o software numérico solicita como dado de entrada a vazão (Q) e não a vazão unitária (q), foi necessária a determinação de tal vazão para a construção correta do modelo. Para exemplificar melhor todas as conversões realizadas nos dados de saída do relatório do CTH, pode-se observar os valores apresentados nas tabelas 6 e 7.

Na tabela 6 nota-se os resultados apresentados pelo CTH referentes aos modelos físicos e apresentados com valores de protótipos. Esta tabela apresenta apenas parte de todo resultado extraído dos modelos físicos. Os resultados apresentados nesta tabela fazem referência a um barramento de altura de 2m, comprimento de bacias variados de 4,5m, 6m, 7,5m e 9m, e contrabarragens com altura fixa de 0,3m.

Tabela 6. Resultados apresentado pelo CTH para barragens com $CTB=0,3$ (1:1) .
Fonte: Próprio Autor

		P = 2m			
CTB (m)	L (m)	H_p (m)	q_p (m³/s/m)	Vm_p (m/s)	h_p (m)
0,3	4,5	0,52	0,52	3,11	0,6
0,3	6	0,65	0,75	3,32	0,66
0,3	7,5	0,69	0,83	3,39	0,72
0,3	9	0,71	0,89	3,41	0,74

Para a conversão dos valores apresentados na tabela 6, em valores de modelo numérico na escala 1:6 e com a determinação da vazão (Q) do modelo foram utilizadas as conversões apresentadas nas equações 81 a 84.

$$H_m = \frac{H_p}{6} \quad (81)$$

$$h_m = \frac{h_p}{6} \quad (82)$$

$$Vm_m = Vm_p \times \sqrt{\frac{1}{6}} \quad (83)$$

$$Q_m = \left(\frac{q_p}{6^{1,5}}\right) \times 0,1 \quad (84)$$

Na tabela 7 pode-se observar os resultados de saída (Altura a montante – H, Vazão – Q, Velocidade média – Vm e Altura de jusante – h) com as devidas conversões para o modelo numérico na escala de 1:6.

Tabela 7. Resultados apresentado pelo CTH para barragens com CTB=0,05 (1:6) .
Fonte: Próprio Autor

		P = 2m			
CTB (m)	L (m)	H _m (m)	Q _m (m ³ /s)	Vm _m (m/s)	h _m (m)
0,05	0,75	0,09	0,0035	1,27	0,100
0,05	1	0,11	0,0051	1,36	0,110
0,05	1,25	0,12	0,0056	1,38	0,120
0,05	1,5	0,12	0,0061	1,39	0,123

Neste exemplo das tabelas 6 e 7 foram apresentadas somente como uma amostra da conversão dos resultados apresentados pelo CTH, sendo que tais conversões foram realizadas de forma geral para todos os valores de saída dos modelos físicos (Verificar tabelas 8 e 9)

Tabela 8. Tabela resumo dos modelos físicos desenvolvidos pelo CTH na escala de protótipo. Fonte: CTH

		P = 2m				P = 3m				P = 4m				P = 5m			
CTB (m)	L (m)	H (m)	q (m ³ /s/m)	Vm (m/s)	h (m)	H (m)	q (m ³ /s/m)	Vm (m/s)	h (m)	H (m)	q (m ³ /s/m)	Vm (m/s)	h (m)	H (m)	q (m ³ /s/m)	Vm (m/s)	h (m)
0,3	4,5	0,52	0,52	3,11	0,6	0,44	0,4	3,03	0,44	0,49	0,43	2,9	0,45	-	-	-	-
0,3	6	0,65	0,75	3,32	0,66	0,56	0,58	3,18	0,53	0,61	0,62	3,06	0,57	0,45	0,36	2,59	0,41
0,3	7,5	0,69	0,83	3,39	0,72	0,61	0,66	3,29	0,56	0,65	0,69	3,2	0,64	0,46	0,37	2,64	0,42
0,3	9	0,71	0,89	3,41	0,74	0,63	0,7	3,52	0,61	0,66	0,71	3,3	0,68	0,47	0,38	2,88	0,45
0,5	4,5	0,56	0,59	3,62	0,55	0,48	0,44	3,29	0,5	0,49	0,42	3,17	0,49	-	-	-	-
0,5	6	0,78	1,05	3,94	0,77	0,54	0,54	3,51	0,57	0,61	0,61	3,46	0,6	0,55	0,5	3,31	0,54
0,5	7,5	0,84	1,22	4,11	0,95	0,64	0,71	3,72	0,65	0,68	0,75	3,61	0,68	0,66	0,68	3,54	0,65
0,5	9	0,9	1,36	4,15	1,04	0,76	0,94	3,82	0,77	0,79	0,96	3,78	0,8	0,78	0,91	3,72	0,87
0,75	4,5	0,49	0,48	4,03	0,55	0,46	0,42	4,26	0,51	0,44	0,36	3,03	0,62	-	-	-	-
0,75	6	0,56	0,6	4,34	0,61	0,64	0,73	4,48	0,72	0,54	0,52	3,65	0,6	0,6	0,58	3,57	0,72
0,75	7,5	0,69	0,83	4,39	0,75	0,73	0,88	4,43	0,78	0,67	0,73	3,94	0,73	0,73	0,81	3,96	0,75
0,75	9	0,77	1,01	4,59	0,85	0,84	1,1	4,34	0,9	0,79	0,96	4,1	0,83	0,84	1,04	4,12	0,88
1	4,5	0,54	0,55	3,69	0,61	0,59	0,62	4,76	0,7	0,45	0,37	3,2	0,62	-	-	-	-
1	6	0,62	0,69	4,38	0,69	0,66	0,75	5,05	0,75	0,54	0,5	3,76	0,57	0,61	0,6	3,97	0,76
1	7,5	0,66	0,78	4,96	0,75	0,71	0,85	5,14	0,79	0,67	0,72	4,13	0,72	0,68	0,72	4,24	0,77
1	9	0,7	0,86	5,02	0,84	0,76	0,95	4,94	0,83	0,72	0,82	4,43	0,78	0,81	0,97	4,55	0,89
0,5	9	1	1,6	4,4	1,18	1	1,54	-	1,17	6,46	1,37	-	-	1	1,36	-	-

Tabela 9. Tabela resumo dos modelos físicos desenvolvidos pelo CTH na escala corrigida. Fonte: Próprio Autor

		P = 0,33m				P = 0,5m				P = 0,67m				P = 0,83m			
CTB (m)	L (m)	H (m)	Q (m ³ /s)	Vm (m/s)	h (m)	H (m)	Q (m ³ /s)	Vm (m/s)	h (m)	H (m)	Q (m ³ /s)	Vm (m/s)	h (m)	H (m)	Q (m ³ /s)	Vm (m/s)	h (m)
0,05	0,75	0,09	0,0035	1,27	0,100	0,07	0,0027	1,24	0,073	0,08	0,0029	1,18	0,075	-	-	-	-
0,05	1	0,11	0,0051	1,36	0,110	0,09	0,0039	1,30	0,088	0,10	0,0042	1,25	0,095	0,08	0,0024	1,06	0,068
0,05	1,25	0,12	0,0056	1,38	0,120	0,10	0,0045	1,34	0,093	0,11	0,0047	1,31	0,107	0,08	0,0025	1,08	0,070
0,05	1,5	0,12	0,0061	1,39	0,123	0,11	0,0048	1,44	0,102	0,11	0,0048	1,35	0,113	0,08	0,0026	1,18	0,075
0,08333	0,75	0,09	0,0040	1,48	0,092	0,08	0,0030	1,34	0,083	0,08	0,0029	1,29	0,082	-	-	-	-
0,08333	1	0,13	0,0071	1,61	0,128	0,09	0,0037	1,43	0,095	0,10	0,0042	1,41	0,100	0,09	0,0034	1,35	0,090
0,08333	1,25	0,14	0,0083	1,68	0,158	0,11	0,0048	1,52	0,108	0,11	0,0051	1,47	0,113	0,11	0,0046	1,45	0,108
0,08333	1,5	0,15	0,0093	1,69	0,173	0,13	0,0064	1,56	0,128	0,13	0,0065	1,54	0,133	0,13	0,0062	1,52	0,145
0,125	0,75	0,08	0,0033	1,65	0,092	0,08	0,0029	1,74	0,085	0,07	0,0024	1,24	0,103	-	-	-	-
0,125	1	0,09	0,0041	1,77	0,102	0,11	0,0050	1,83	0,120	0,09	0,0035	1,49	0,100	0,10	0,0039	1,46	0,120
0,125	1,25	0,12	0,0056	1,79	0,125	0,12	0,0060	1,81	0,130	0,11	0,0050	1,61	0,122	0,12	0,0055	1,62	0,125
0,125	1,5	0,13	0,0069	1,87	0,142	0,14	0,0075	1,77	0,150	0,13	0,0065	1,67	0,138	0,14	0,0071	1,68	0,147
0,16667	0,75	0,09	0,0037	1,51	0,102	0,10	0,0042	1,94	0,117	0,08	0,0025	1,31	0,103	-	-	-	-
0,16667	1	0,10	0,0047	1,79	0,115	0,11	0,0051	2,06	0,125	0,09	0,0034	1,54	0,095	0,10	0,0041	1,62	0,127
0,16667	1,25	0,11	0,0053	2,02	0,125	0,12	0,0058	2,10	0,132	0,11	0,0049	1,69	0,120	0,11	0,0049	1,73	0,128
0,16667	1,5	0,12	0,0059	2,05	0,140	0,13	0,0065	2,02	0,138	0,12	0,0056	1,81	0,130	0,14	0,0066	1,86	0,148
0,08333	1,5	0,17	0,0109	1,80	0,197	0,17	0,0105	-	0,195	1,08	0,0093	-	-	0,17	0,0093	-	-

Com os valores convertidos para o modelo numérico, foram realizadas análises comparativas de tais variáveis através dos resultados obtidos pelas ferramentas do Paraview e do relatório final do CTH. Os modelos numéricos possuem variáveis como altura da barragem (P), comprimento da bacia (L) e altura da contrabarragem (CTB) variáveis, e para isto todos os cenários modelados estão detalhados na tabela 10.

Tabela 10. Resumo de todos os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho.
Fonte: Próprio Autor

Altura da barragem, "P" (m)*	Comprimento da bacia "L" (m)*	Altura da contrabarragem "CTB" (m)*	Malha XY (cm)*	Números de células (un.)	Tempo de processamento (H)
0,33	0,75	0,05	1	49560	1:00
0,33	0,75	0,83	1	49621	11:00
0,33	0,75	0,125	1	49641	11:00
0,33	0,75	0,17	1	49592	4:00
0,5	0,75	0,17	1	49276	7:00
0,5	1	0,17	1	49367	4:30
0,5	1,25	0,17	1	49367	4:30
0,5	1,5	0,17	1	49297	7:00
0,67	0,75	0,17	1	64971	1:00
0,67	1	0,17	1	65000	6:00
0,67	1,25	0,17	1	64966	5:00
0,67	1,5	0,17	1	65005	7:00
0,83	1,5	0,05	0,5	294150	3:00
0,83	1,5	0,083	0,5	293776	8:00
0,83	1,5	0,125	0,5	293504	2:00
0,83	1,5	0,17	0,5	294103	7:00

*Os valores da tabela 10 estão sendo apresentados na escala reduzida de 1:6

6.1. Fase 1

Serão apresentados nesta primeira etapa os resultados obtidos através da modelagem numérica com a mesma escala (1:6) utilizada na construção dos modelos físicos reduzidos. Com o efeito da escala não é possível manter a semelhança de Froude e de Reynolds, com isso sabe-se que pode existir uma distorção nos resultados obtidos pelos modelos reduzidos quando comparados com os modelos com escala de 1:1. Para esta apresentação foram criados gráficos comparativos de resultados, onde poderão ser observadas as seguintes relações:

- Vazão m^3/s (Q) x Altura do nível d'água a montante m (H)
- Vazão m^3/s (Q) x Velocidade média a jusante da contrabarragem m/s (V_m)
- Velocidade média a jusante da contrabarragem m/s (V_m) x Comprimento da bacia m (L), controlado pela vazão e pela profundidade à jusante

$$\left(V_m = \frac{Q}{h \times 0,1} \right)$$
- Velocidade média a jusante da contrabarragem m/s (V_m) x Altura da contrabarragem m (L)

6.1.1. RESULTADOS $Q(m^3/s)$ X $h(m)$

Nas figuras 93 a 96 são apresentadas nuvens de pontos azuis que representam os resultados gerados pelo OpenFoam e extraídos do Paraview, e como consequência linhas pontilhadas azuis sendo representadas como linhas de tendência dos resultados. Nas mesmas figuras são apresentadas nuvens de pontos laranjas, as quais representam os resultados extraídos dos ensaios físicos reduzidos desenvolvidos pelo CTH, e como consequência as linhas pontilhadas laranjas exibem as linhas de tendência dos resultados.

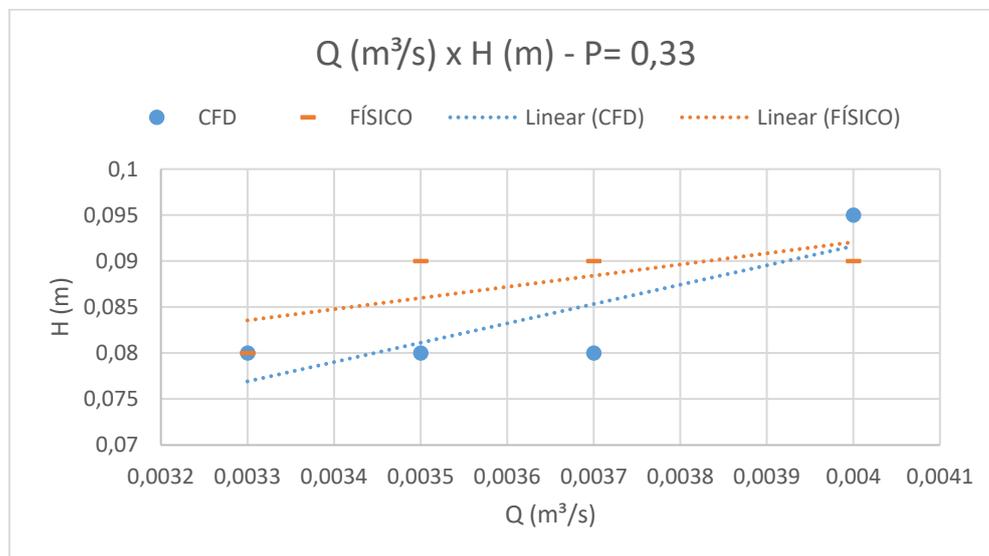


Figura 93. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico ($P=0,33$ esc. 1:6). Fonte: Próprio Autor

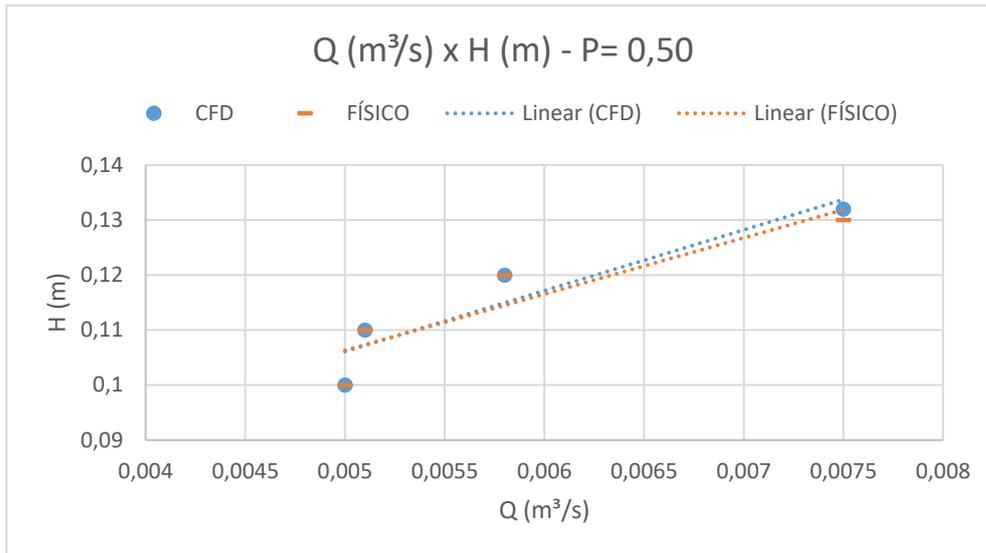


Figura 94. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico (P=0,5_{esc. 1:6}). Fonte: Próprio Autor

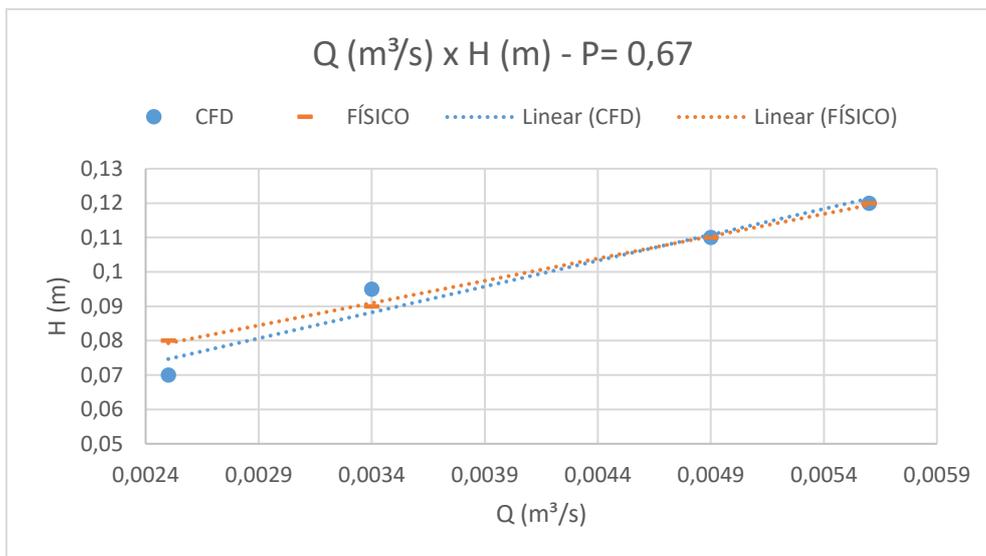


Figura 95. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico (P=0,67_{esc. 1:6}). Fonte: Próprio Autor

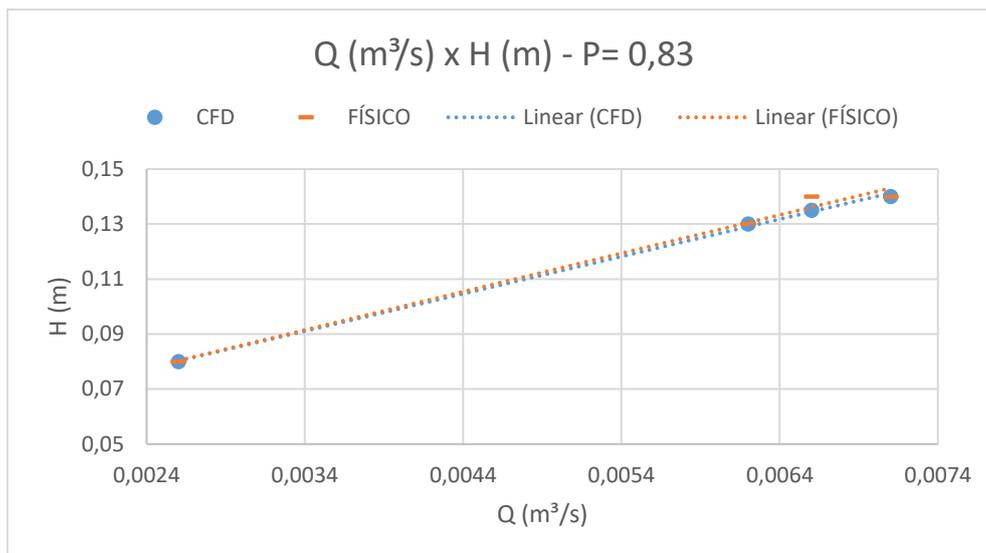


Figura 96. Gráfico comparativo de Q x H o modelo físico reduzido e do modelo numérico (P=0,83 esc. 1:6). Fonte: Próprio Autor

Para estes modelos pode-se notar uma boa aderência das linhas de tendências dos modelos físicos com as linhas de tendências dos modelos numéricos reduzidos. Nos barramentos P= 0,83(esc. 1:6), P= 0,67(esc. 1:6) e P= 0,50(esc. 1:6), as alturas de montante encontradas no modelo numérico são bastante similares com as alturas apresentadas no relatório do CTH, dentre estes 3 modelos a maior divergência de valores foi encontrado na barragem com altura de 0,67m(esc. 1:6) com a vazão de 0,0025m³/s(esc. 1:6), tal comparação com modelo físico reduzido resultou em uma diferença de 12,50%, o que corresponde a 0,01m(esc. 1:6) de diferença na altura da lâmina d'água a montante. Já para o modelo P=0,33(esc. 1:6), a nuvens de pontos obtidas através do modelo numérico não ficou totalmente aderida a linha do ensaio físico. Pode-se observar que para a mesma vazão quase todos os pontos apresentam uma pequena diferença no nível d'água de montante. Tais diferenças são de aproximadamente 11,1% para as vazões de 0,0035m³/s (esc. 1:6) e 0,0037m³/s(esc. 1:6) e cerca de 5,26% para a vazão de 0,004m³/s(esc. 1:6), resultando em uma diferença de nível de 0,01m(esc. 1:6) e 0,005m(esc. 1:6) respectivamente. Pode-se notar também que para as vazões de 0,0035m³/s e 0,0037m³/s, os resultados de "H" não variaram, isto pode ter acontecido devido a baixíssima variação de vazão, sendo na ordem de 0,0002 m³/s (esc. 1:6).

Para a coleta de dados da “H” do modelo numérico foi utilizada a ferramenta PlotOverline (responsável por criar corte transversais ao modelo) do Paraview, após a estabilização total do escoamento de montante. O tempo total dos modelos numéricos foi de 40s, com intervalos de 0,1s, mais que suficiente para observar a estabilização do escoamento e extração dos resultados. A ferramenta PlotOverline do software Paraview foi aplicada na coordenada 2,5 em “X”, ponto este localizado a montante do barramento, onde a linha d’água se encontra estabilizada. Na figura 97 pode-se observar a localização da extração da linha d’água.

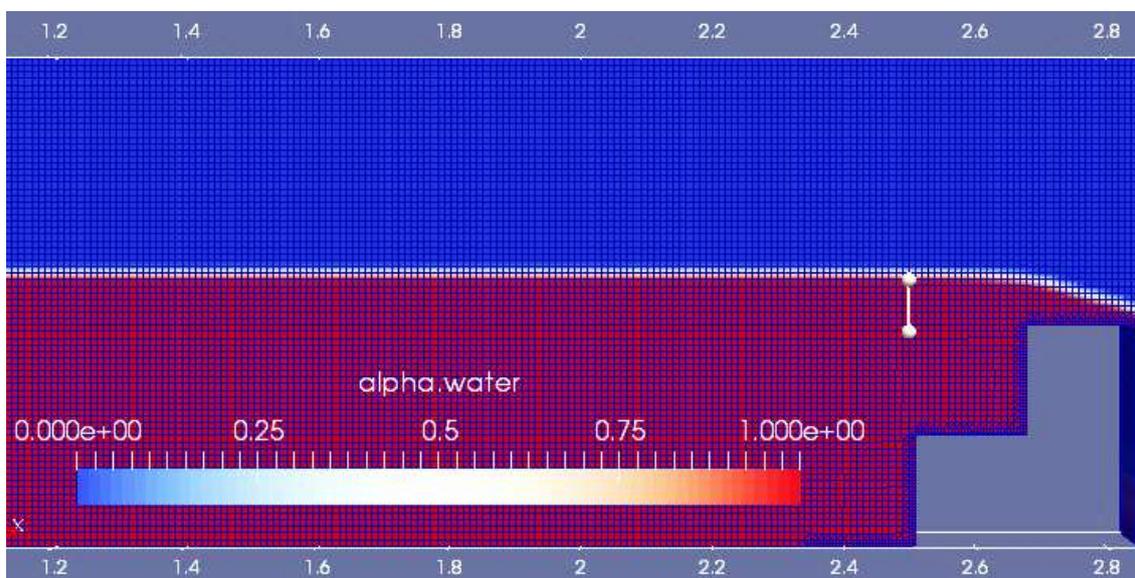


Figura 97. Extração de nível d’água de montante através do Paraview. Fonte: Próprio Autor

Para estes comparativos sabe-se que os comprimentos de bacia e as alturas das contrabarragens de alguns modelos são variáveis, porém ambas as geometrias não interferem no dado “H”, visto que o mesmo faz referência a altura de montante e não sofre impacto destas estruturas de jusante. Na figura 98 pode-se observar no modelo físico reduzido a proximidade da área de montante, aonde foi medido nível d’água. Conforme o “Guia Prático para Projetos de Pequenas Barragens” desenvolvido pelo DAEE-SP, pode-se notar que devido ao vertedor em Gabiões ser classificado como de soleira espessa, ocorre um rebaixamento do nível d’água quando o escoamento se aproxima da soleira (Figura 99), e esta é uma característica bastante visível em modelos com soleira espessa, porém para a avaliação deste trabalho a medição de nível a montante

tanto no modelo físico como no modelo numérico, foi adotada ao trecho anterior a este rebaixamento, desprezando-o no comparativo direto dos resultados.

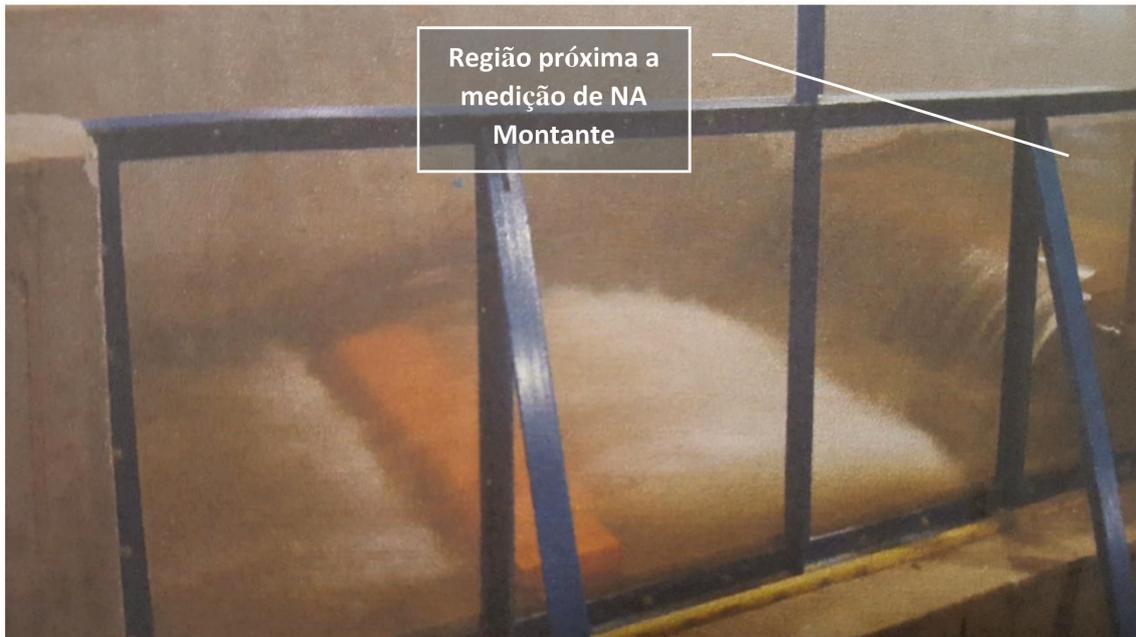


Figura 98. Modelo físico reduzido, $P=3\text{m}_{(\text{esc. real})}$, $L=9\text{m}_{(\text{esc. real})}$, $q=0,95\text{m}^3/\text{s}/\text{m}_{(\text{esc. real})}$.
Fonte: CTH

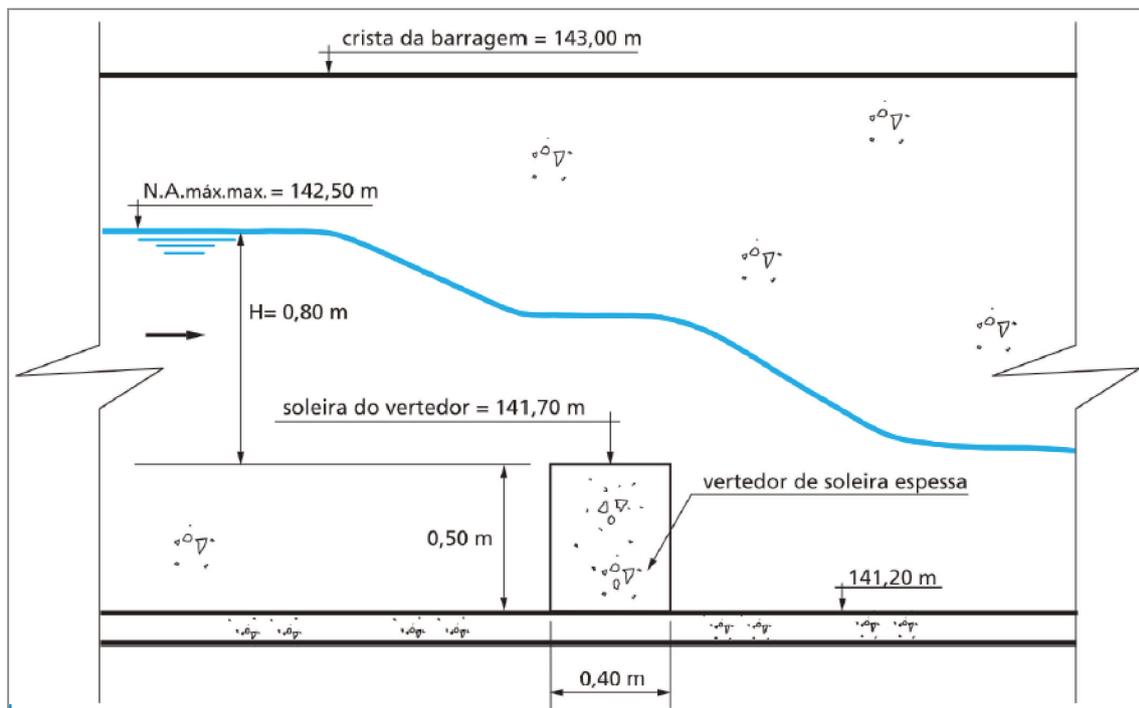


Figura 99. Exemplo de rebaixamento do NA gerado nas soleiras espessas. Fonte: DAEE 2005

6.1.2. RESULTADOS $Q(m^3/s)$ X $V_m(m/s)$

Para o comparativo da vazão pela velocidade média medida logo a jusante da contrabarragem, pode-se observar de forma geral que o modelo numérico apresentou resultados que expressam menores velocidades médias para basicamente todas as variações de cenários que foram modeladas. Ainda para as modelagens que aqui serão apresentados os resultados foram utilizados aos valores de vazões convertidos de acordo com a escala, sendo uma vazão total para a fatia de 0,1m de espessura do modelo. As velocidades foram medidas no modelo físico do ensaio desenvolvido pelo CTH, no trecho de jusante da contrabarragem, ou seja, no trecho onde a lâmina d'água toca a base do modelo logo após sofrer a queda de nível gerada pela estrutura da contrabarragem, pode-se observar este ponto na figura 100.

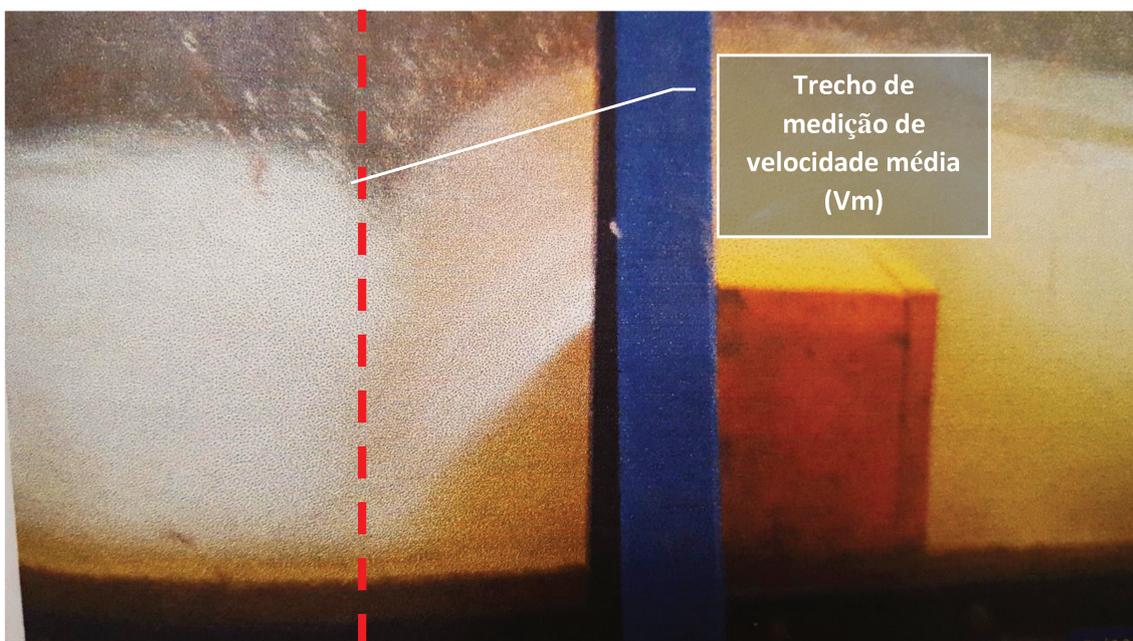


Figura 100. Trecho de medição da velocidade média do modelo físico reduzido. Fonte: CTH

Na figura 101 observa-se a localização da medição das velocidades extraídas dos modelos numéricos através do software Paraview.

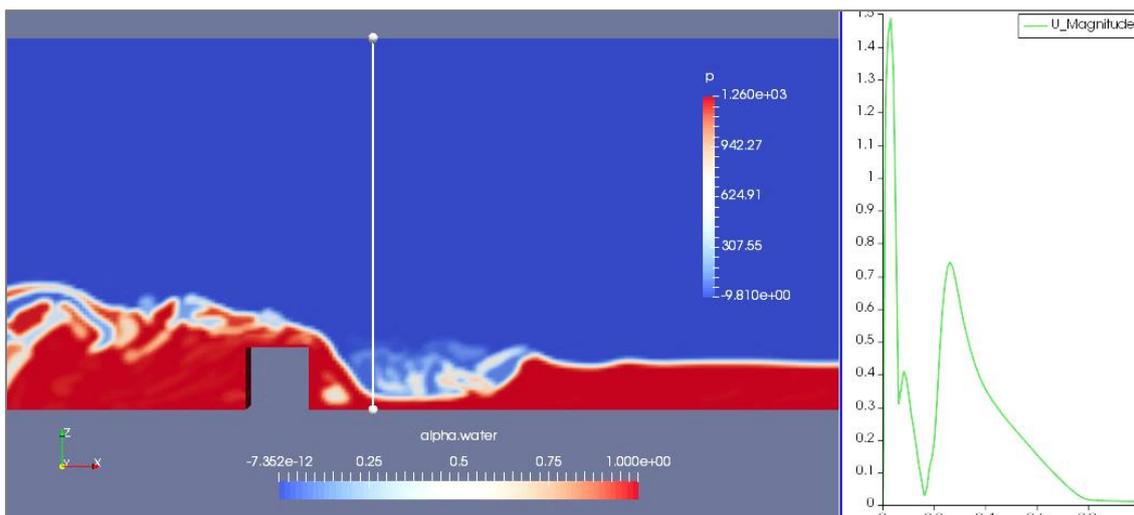


Figura 101. Trecho de medição de velocidade do modelo numérico. Fonte: Próprio Autor

Para o modelo numérico foram identificados estes trechos de queda no escoamento gerados pela contrabarragem, e nestes mesmos trechos foram extraídas as velocidades médias das seções estudada e comparadas com a vazão de entrada. Nas figuras 102 a 105 foram plotados os resultados obtidos tanto nos modelos físicos reduzidos desenvolvidos pelo CTH como os resultados dos modelos numéricos desenvolvidos pelo OpenFoam com extração de dados realizadas através do software Paraview e sua respectiva função de Plotoverline. Para o modelo $P=0,33$ (esc. 1:6) as velocidades medidas no modelo numérico ficaram abaixo das velocidades medidas no modelo físico, nota-se que as linhas de tendência dos dois modelos seguem com uma inclinação muito parecida, como se estivessem distanciadas por um “offset”. A maior diferença de velocidade neste comparativo foi encontrada para a vazão de $0,0037 \text{ m}^3/\text{s}$ (esc. 1:6), a qual representou uma diferença elevada de 35%, sendo que a velocidade encontrada no modelo físico foi de $1,51 \text{ m/s}$ (esc. 1:6), enquanto o modelo numérico apresentou uma velocidade de $0,97 \text{ m/s}$ (esc. 1:6). Para os modelos $P=0,50$ (esc. 1:6) e $P=0,83$ (esc. 1:6) nota-se uma convergência das linhas de tendências dos ensaios numéricos, com as vazões menores existe um certo distanciamento dos resultados mais relevante, porém quando são observados os resultados para as maiores vazões percebe-se uma aproximação das nuvens de pontos e concomitantemente da linha de tendência dos resultados. Com esta aproximação da linha de tendência pode-se estimar que a modelagem com

vazões ainda superiores as que foram ensaiadas seriam capazes de oferecer resultados ainda mais próximos aos observados no modelo físico reduzido. A maior diferença de resultados obtida nos modelos $P=0,50$ (esc. 1:6) e $P=5$ (esc. 1:6), foi o cenário com $P=0,83$ (esc. 1:6) e vazão de $0,0026\text{m}^3/\text{s}$ (esc. 1:6), o qual apresentou uma discrepância de aproximadamente 36% nos resultados da velocidade média, visto que o modelo físico resultou em uma velocidade média de $1,18\text{m/s}$ (esc. 1:6) enquanto o modelo numérico resultou em uma velocidade média de $1,85\text{m/s}$ (esc. 1:6). Já para o modelo $P=0,67$ (esc. 1:6) os resultados foram bastante satisfatórios visto que a nuvem de pontos e sua respectiva linha de tendência apresentaram bastante aderência como pode ser percebido na figura 95. Para todas as vazões modeladas no modelo numérico as velocidade médias medidas nos modelos foram próximas, visto que a maior diferença de resultados se deu para o modelo com vazão de $0,0034\text{m}^3/\text{s}$ (esc. 1:6) com apenas 9% de diferença nos resultados, já que a velocidade média do modelo físico foi de $1,54\text{m/s}$ (esc. 1:6) enquanto a velocidade média reproduzida pelo modelo numérico foi de $1,4\text{m/s}$ (esc. 1:6), representando uma diferença de apenas $0,14\text{m/s}$ (esc. 1:6). Para as outras vazões as diferenças não passaram de 4,14%.

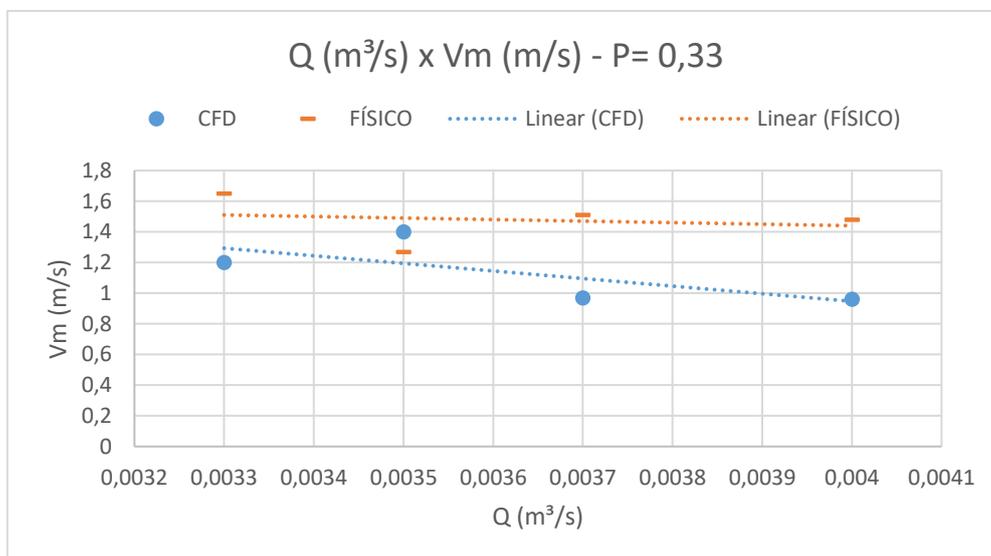


Figura 102. Gráfico comparativo de Q x Vm, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,33$ (esc. 1:6)). Fonte: Próprio Autor

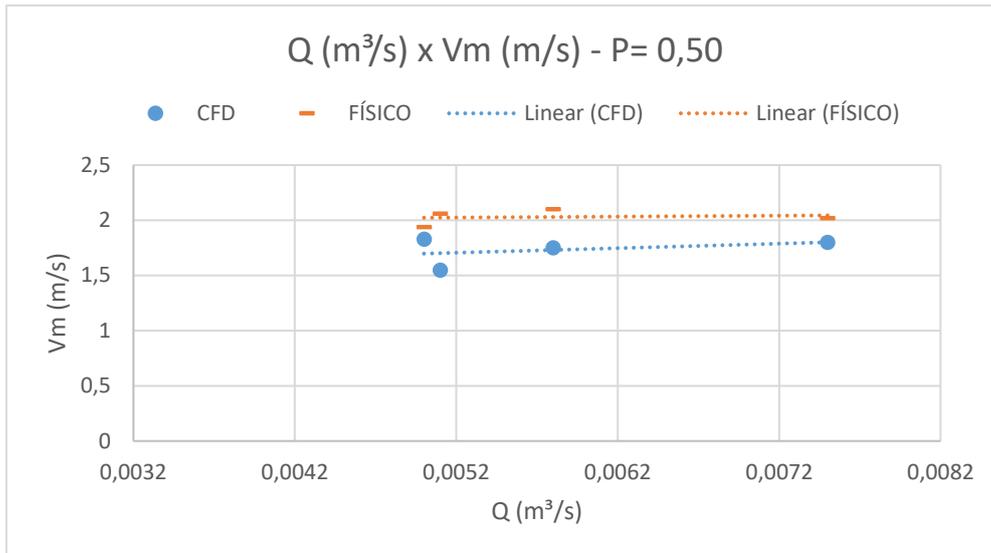


Figura 103. Gráfico comparativo de Q x Vm, modelo físico reduzido e modelo numérico (P=0,50(esc. 1:6)). Fonte: Próprio Autor

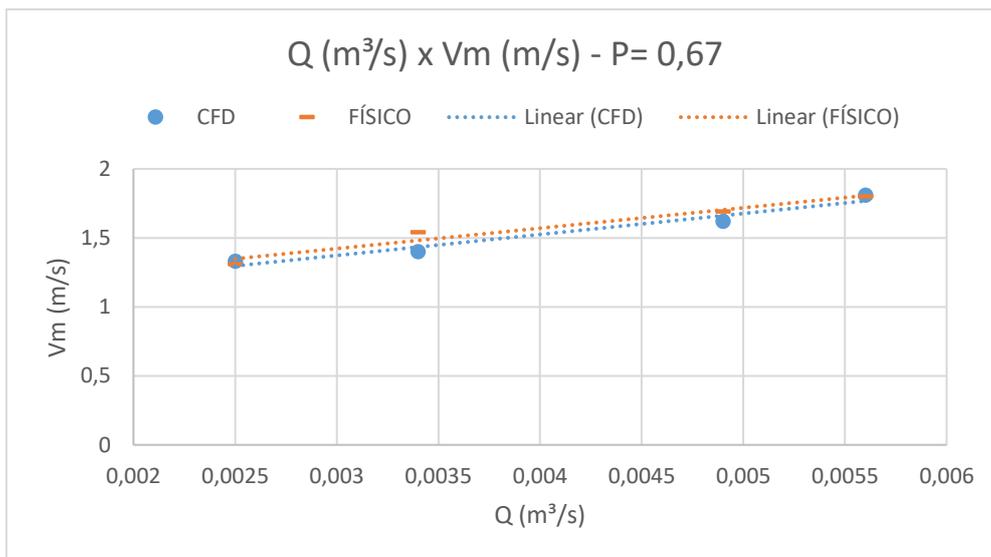


Figura 104. Gráfico comparativo de Q x Vm, modelo físico reduzido e modelo numérico (P=0,67(esc. 1:6)). Fonte: Próprio Autor

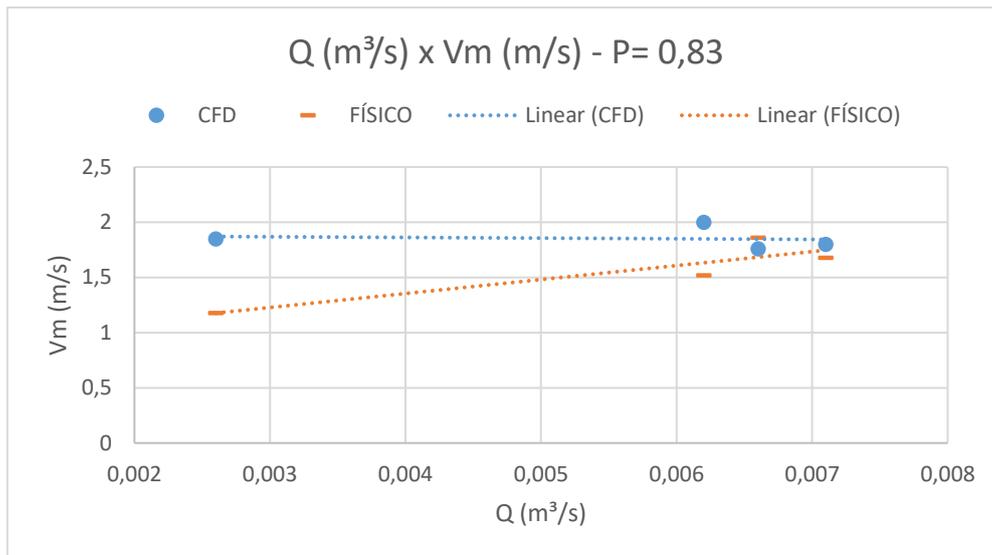


Figura 105. Gráfico comparativo de Q x Vm, modelo físico reduzido e modelo numérico (P=0,83(esc. 1:6)). Fonte: Próprio Autor

6.1.3. RESULTADOS Vm(m/s) X L(m)

Os modelos P= 0,50 e P= 0,67 foram modelados com a altura da contrabarragem fixa em 0,17m(esc. 1:6) porém com uma variação no comprimento da bacia. Para esta variação foram utilizados os comprimentos 0,75m(esc. 1:6), 1m(esc. 1:6), 1,25m(esc. 1:6) e 1,5m(esc. 1:6). As barragens P= 0,33m(esc. 1:6) e P= 0,83m(esc. 1:6) também foram modeladas, porém para esta análise de resultados não foram utilizados os dados de saída visto que os comprimentos das bacias de ambos os modelos eram fixos, sendo 0,75m(esc. 1:6) para P= 0,33m(esc. 1:6) e 1,5m(esc. 1:6) para o P= 0,83(esc. 1:6). Para estes dois modelos com comprimento de bacias variáveis (P= 0,5m(esc. 1:6) e P= 0,67(esc. 1:6)) foram criados gráficos comparativos com as variáveis L e Vm, tais gráficos estão apresentados nas figuras 106 e 107. Nota-se que a linha de tendência dos resultados encontrados no modelo físico reduzido e numérico são bastante similares, porém com um desnível de valores quase que homogêneo. A variação que representa a maior diferença nos valores de velocidade é oriunda da bacia de 1m(esc. 1:6), com cerca de 24,76% de diferença e vazão de 0,0051m³/s(esc. 1:6). No mesmo modelo pode-se observar que a bacia com 0,75m(esc. 1:6) exibiu um resultado de velocidade média muito parecido com o

modelo físico reduzido, com variação de apenas 5,67%. O modelo $P=0,67m$ (esc. 1:6) também apresentou resultados bastante significativos no comparativo $V_m \times L$. Assim como o $P=0,50$ (esc. 1:6) nota-se um acompanhamento das linhas de tendências do modelo físico reduzido e do modelo numérico, porém com um desnível de valores bastante reduzido, a ponto de apresentar uma variação máxima na velocidade de aproximadamente 9,09%. Esta variação acontece no modelo com comprimento de bacia igual a 1m(esc. 1:6).

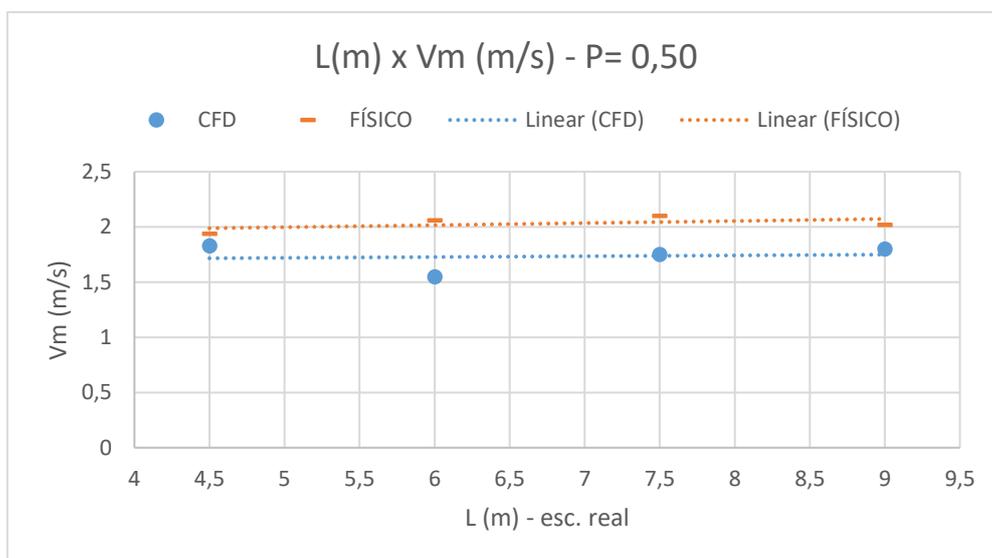


Figura 106. Gráfico comparativo de $L \times V_m$, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,50$ (esc. 1:6)). Fonte: Próprio Autor

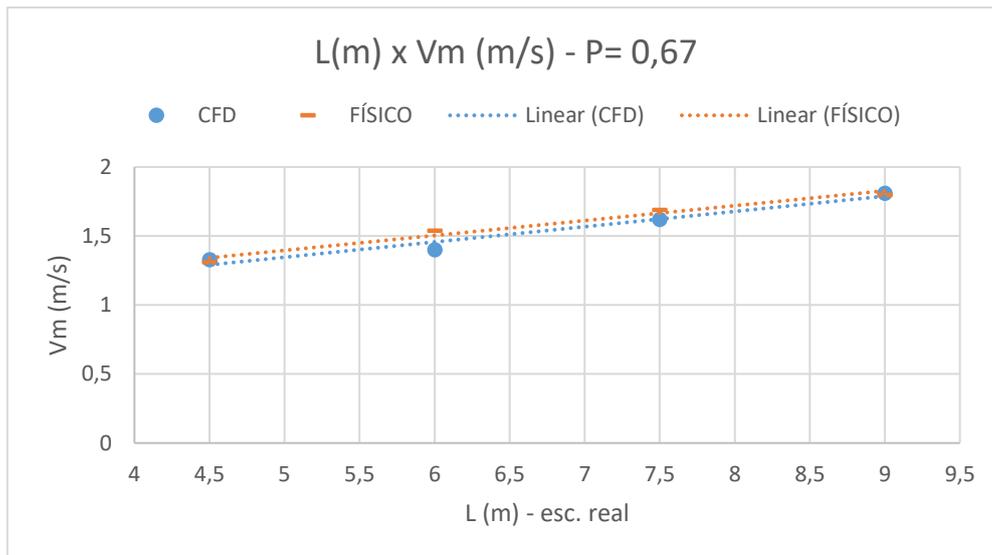


Figura 107. Gráfico comparativo de L x Vm, modelo físico reduzido e modelo numérico ($P=0,67_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor

Os resultados apresentados nas Figuras 106 e 107 foram extraídos de modelos numéricos que foram calibrados com os modelos físicos reduzidos. A calibração do modelo foi baseada no nível d'água de jusante da bacia (h) em função do controle de saída, que no ensaio físico foi realizado com uma comporta, e no modelo numérico foi indicado como um pequeno anteparo. Como as alturas utilizadas para a comporta não foram registradas no relatório do ensaio físico, foi necessária a determinação destas alturas que influenciavam diretamente no nível d'água de jusante da bacia (h) e na sua respectiva velocidade (Vm). Para a definição da altura do anteparo tomou-se como ponto de partida a equação de vertedores de parede delgada apresentada por Porto 2006 (equação 85).

$$Q = \frac{2}{3} \times C_d \times \sqrt{2g} \times L \times h_a^{\frac{3}{2}} \quad (85)$$

Q = Vazão (m³/s)

C_d = Coeficiente de Vazão

g = Gravidade

L = Largura da soleira (m)

h_a = Carga d'água de montante do anteparo, localizada a jusante da bacia(m)

Na Figura 108 pode-se observar a definição das variáveis utilizadas:

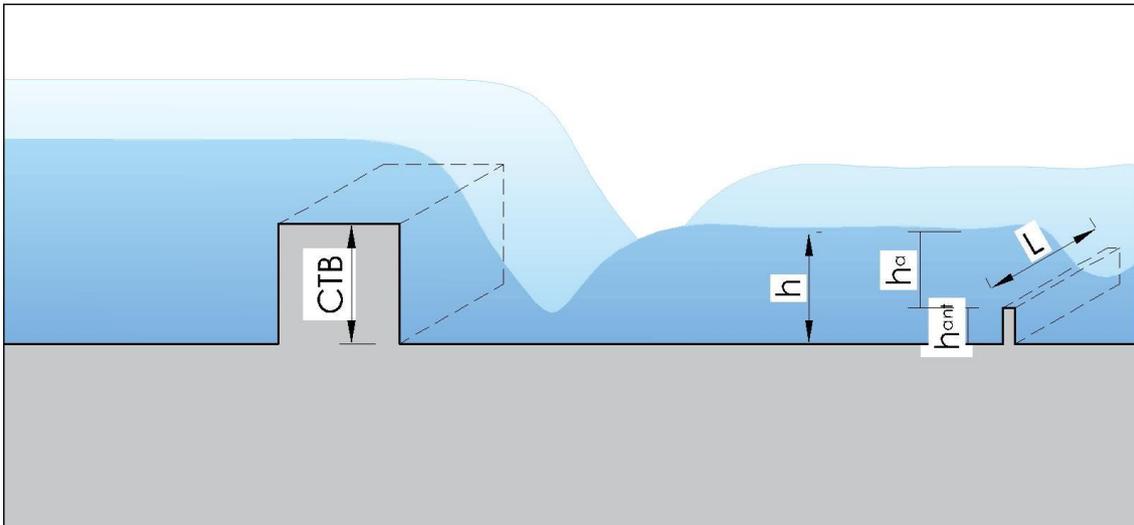


Figura 108. Variáveis da equação 85. Fonte: Próprio Autor

Quase todas as variáveis da equação 85 eram conhecidas, menos os valores de C_d e h_a . Para a determinação de h_a faz-se necessário primeiro descobrir o valor de C_d . Foi escolhida a equação de Rehbock (1929) citada por Porto 2006 para a determinação do coeficiente de vazão, pois a mesma é indicada para trabalhos de laboratórios devido a sua precisão (equação 86).

$$C_d = \left[0,6035 + 0,0813 \left(\frac{h_a + 0,0011}{P} \right) \right] \left[1 + \frac{0,0011}{h_a} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (86)$$

O processo iterativo de determinação da altura do anteparo de jusante (h_{ant}) era:

- Calcular o h_a através da equação 85
- Para este cálculo é necessário adotar um valor inicial de C_d
- Calcular o C_d (equação 86) utilizando o h_a resultante do passo anterior
- Finalizar o cálculo quando o C_d adotado na equação 86 for igual ao C_d encontrado na equação 85
- Com o h_a definido, pode-se utilizar a seguinte equação para a determinação da altura do anteparo de jusante

$$h_{ant} = h - h_a \quad (87)$$

Com o desenvolvimento dos modelos foram necessários alguns pequenos ajustes nas alturas dos anteparos calculados através do processo supracitado. Em alguns modelos foi necessária a troca do anteparo de parede delgada por um anteparo de parede espessa, pois em alguns casos as velocidades iniciais geradas a jusante do anteparo se apresentavam extremamente elevadas fazendo com que o cálculo cessasse nos primeiros instantes de tempo. Com os ajustes devidamente realizados pode-se notar que os níveis d'água de jusante da bacia se apresentaram praticamente iguais aos níveis d'água de jusante encontrados nos modelos físicos reduzidos, conforme nota-se nas figuras 109 e 110.

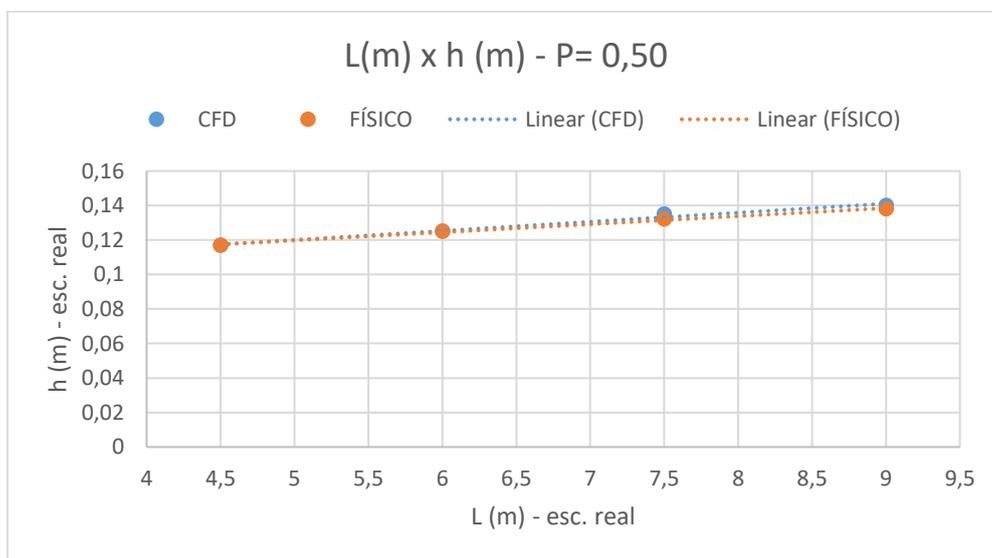


Figura 109. Gráfico comparativo de L x h, modelo físico reduzido e modelo numérico($P=0,50_{(esc. 1:6)}$). Fonte: Próprio Autor

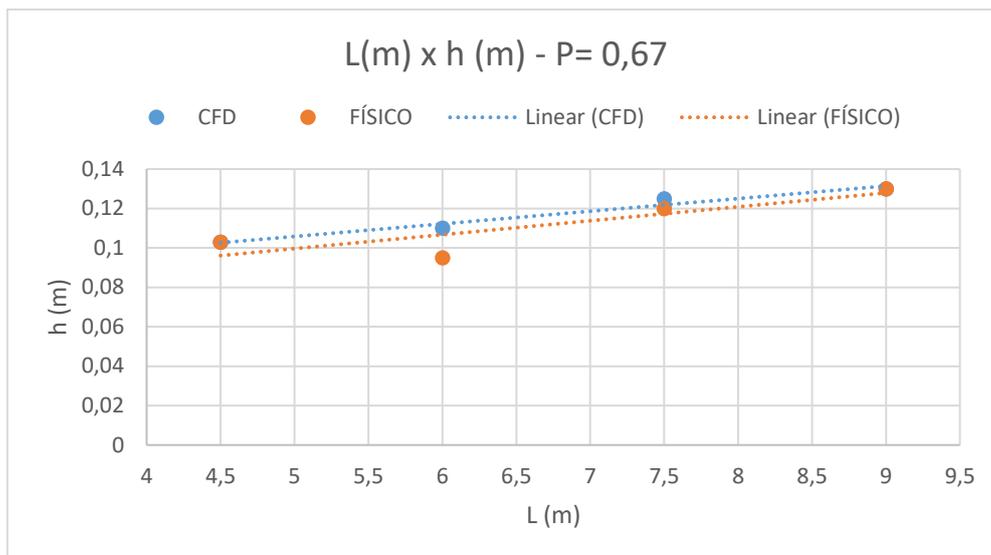


Figura 110. Gráfico comparativo de L x h, modelo físico reduzido e modelo numérico (P=0,67(esc. 1:6)). Fonte: Próprio Autor

6.1.4. RESULTADOS BACIA DE DEPRESSÃO

Foram realizados modelos numéricos reduzidos com a utilização do OpenFoam para os cenários aonde as bacias de dissipação se encontravam enterradas ou em depressão como o relatório do CTH destaca. Os modelos que possuíam esta configuração foram modelados fisicamente pelo CTH, porém não foram extraídos os resultados de velocidade destes modelos, e a única consideração exibida no relatório é a seguinte:

“Com o rebaixamento do fundo para a formação do colchão de água para dissipação, aumenta-se o desnível e, portanto, a energia do escoamento. Ainda assim, a dissipação de energia no interior da bacia formada pelo rebaixamento do fundo é boa. Observa-se ainda, neste caso, melhores condições de escoamento a jusante, com velocidades menores e, conseqüentemente, menor risco de erosão”

Para construir os modelos numéricos com bacias de dissipação em depressão, foi necessária a criação de novos arquivos STL's que representassem este novo cenário. Para a criação dos STL's foi utilizado mais uma vez o software Autocad 2015, aonde dentro da ferramenta foram desenhadas duas peças, a primeira responsável pela estrutura da barragem e

para isto a barragem foi desenhada com a base de montante suficientemente comprida a ponto de atingir as coordenadas iniciais da modelagem (figura 111). A segunda peça foi responsável por criar o efeito da bacia rebaixada, e para isto a peça da contrabarragem foi transformada em uma nova peça com uma base mais comprida, com um comprimento que fosse suficientemente grande a ponto de alcançar o fim do modelo e gerar a tal elevação da base deixando somente a bacia num nível inferior, ver figura 111. Após a importação dos STL's e correção do posicionamento dos mesmos através das coordenadas cartesianas, pode-se executar o comando "snappyhexmesh", Tal comando é responsável por extrair da malha criada pelo "Blockmesh" a geometria dos STL's incluídas no sistema. Com a extração dos STL's cria-se uma nova superfície de contorno que contorna a malha original com o formato das peças importadas da plataforma CAD, ver figura 112.

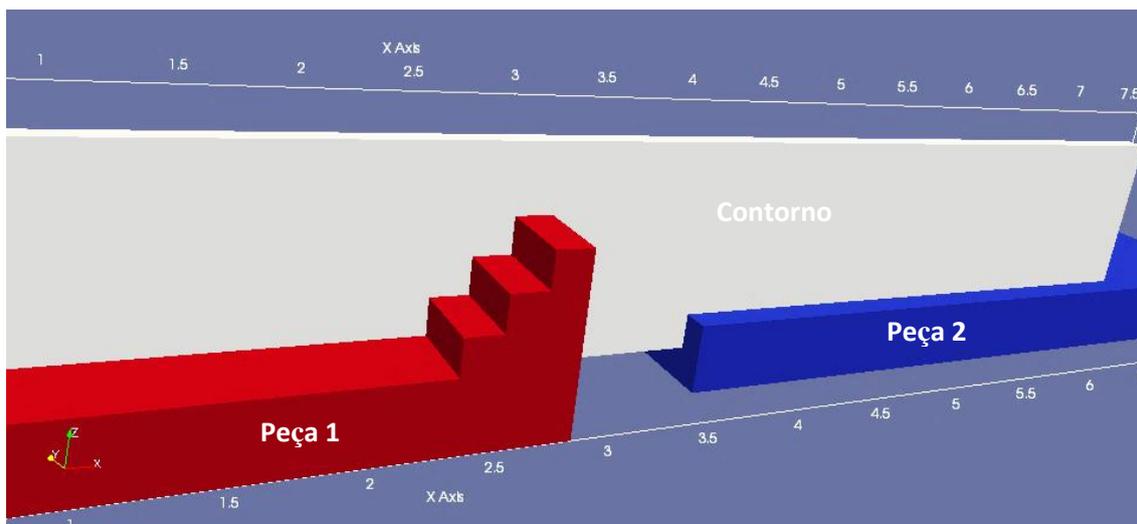


Figura 111. Peças gráficas (STL) criadas para a modelagem das bacias em depressão. Fonte: Próprio Autor

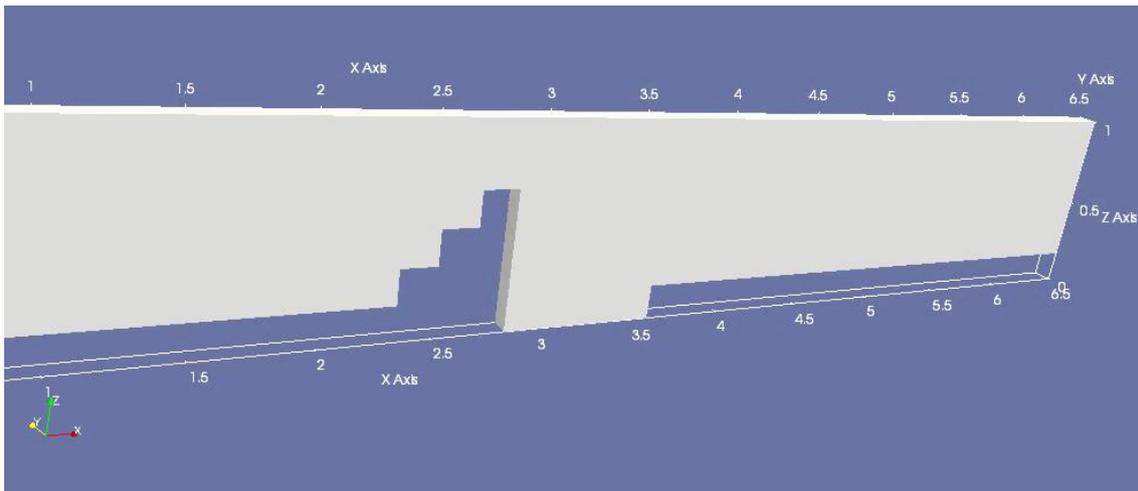


Figura 112. Superfície de contorno após o comando “snappyhexmesh”. Fonte: Próprio Autor

Em relação aos modelos com bacia de dissipação em depressão, foram realizados modelos numéricos com o intuito de avaliar qualitativamente a possível redução da velocidade de jusante. Tais modelos foram estruturados com a mesma calibração utilizada para os modelos com bacia elevada, e com o mesmo refinamento de malha, com cerca de 61.279 células de 1x1cm. Para a condição inicial dos modelos foi utilizado um colchão de água reservado na bacia em depressão, ver figura 113.

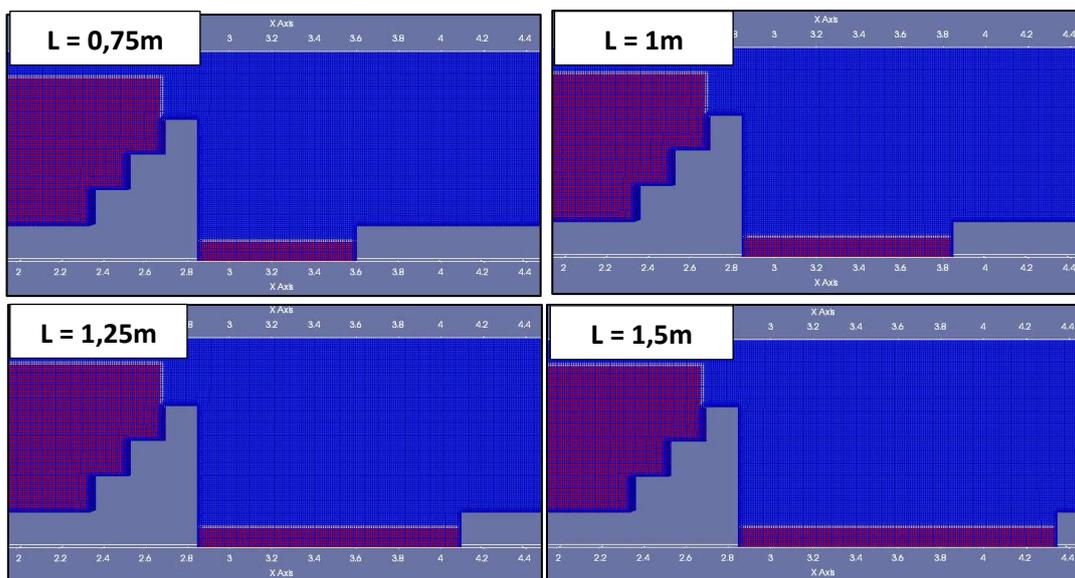


Figura 113. Modelos de Bacias rebaixadas com comprimento de bacia variados. Fonte: Próprio Autor

6.1.5. RESULTADOS Q (m^3/s) X V_m (m/s) – BACIA DE DEPRESSÃO X BACIA ELEVADA – $P= 0,67m$

Conforme destacado no item anterior, foram realizados modelos com a bacia de dissipação rebaixada ($0,17m$ (esc. 1:6)) com o intuito de avaliar qualitativamente os resultados das velocidades máximas encontradas a jusante das bacias, visto que no modelo físico tais valores não foram coletados. Com a extração dos dados de saída do modelo com bacia elevada e com bacia em depressão pôde-se cruzar os resultados em um mesmo gráfico, demonstrado na figura 114. Nesta figura estão plotados os resultados do modelo numérico com bacia elevada e o modelo numérico com bacia rebaixada. Nota-se que o modelo de bacia elevada apresenta velocidade máximas superiores ao modelo de bacia rebaixada. Com o aumento da vazão aumenta-se também as velocidades nos dois modelos, porém, os valores de saída obtidos pela configuração de bacia em depressão se apresentam em média 62% inferiores aos valores encontrados nos modelos com bacia elevada. Além desta expressiva diferença pode-se notar que a inclinação da linha de tendência do modelo numérico com a bacia elevada é consideravelmente mais inclinada do que a linha de tendência dos resultados obtidos pela configuração do modelo com bacia em depressão, ponto este que possivelmente para vazões superiores deixaria ainda mais latente a redução dos valores de velocidade média a jusante da bacia. Outro ponto a se destacar é que no modelo numérico com bacia rebaixada não foi modelado o anteparo de saída, ou seja, não houve nenhum controle de saída do nível de jusante, ponto este que possibilita uma lâmina ainda menor a jusante da bacia enterrada. Tal consideração foi adotado pois no relatório técnico do ensaio físico, este modelo rebaixado possuía poucos dados de coleta e com isso não se pode determinar a altura do anteparo final. Possivelmente para casos com controle de jusante, as velocidades finais do modelo poderiam ser ainda menores do que as apresentadas na figura 114, visto que a coluna de água final poderia afogar o ressalto.

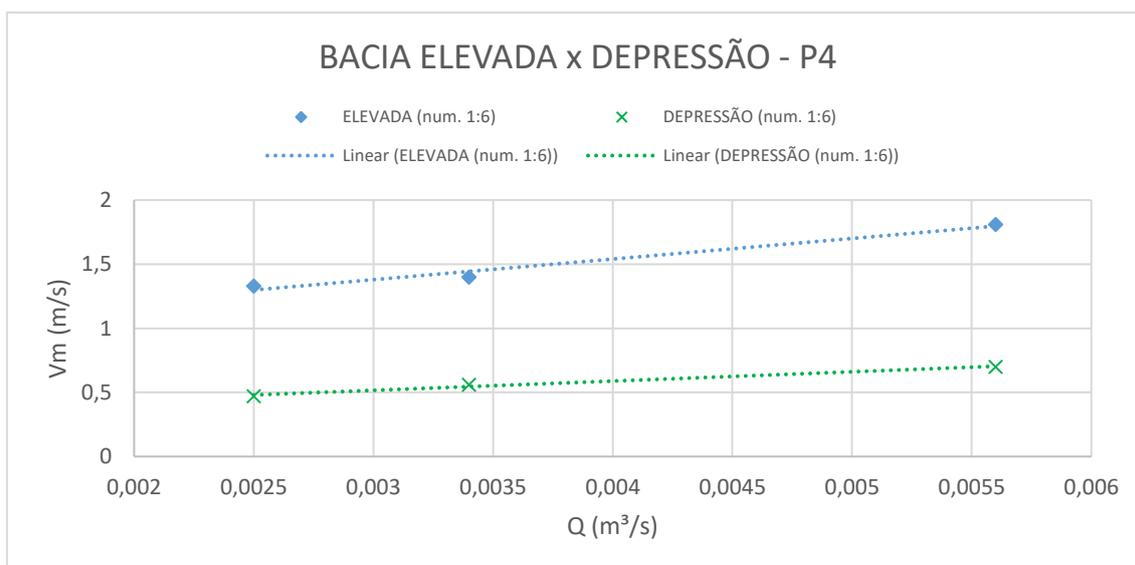


Figura 114. Gráfico comparativo de Q x Vm, modelo com bacia rebaixada e modelo com bacia elevada (P=0,67). Fonte: Próprio Autor

Na tabela 11 são apresentados os dados de vazões, velocidades médias e as respectivas diferenças dos valores encontrados para os modelos numéricos reduzidos que foram calculados com bacia elevada e rebaixada.

Tabela 11. Diferença de velocidades médias na saída das bacias de dissipação elevadas e rebaixadas. Fonte: Próprio Autor

P4				
ELEVADA		DEPRESSÃO		DIFERENÇA
Q	Vm	Q	Vm	Vm
0,0025	1,33	0,0025	0,47	64,66%
0,0034	1,4	0,0034	0,56	60,00%
0,0056	1,81	0,0056	0,7	61,33%

A medição das velocidades máxima dos modelos abordados foi realizada através do filtro "PloOverline", presente na ferramenta Paraview. O corte para o perfil de velocidades foi locado na coordenada em x=4,8, conforme pode ser observado na figura 115.

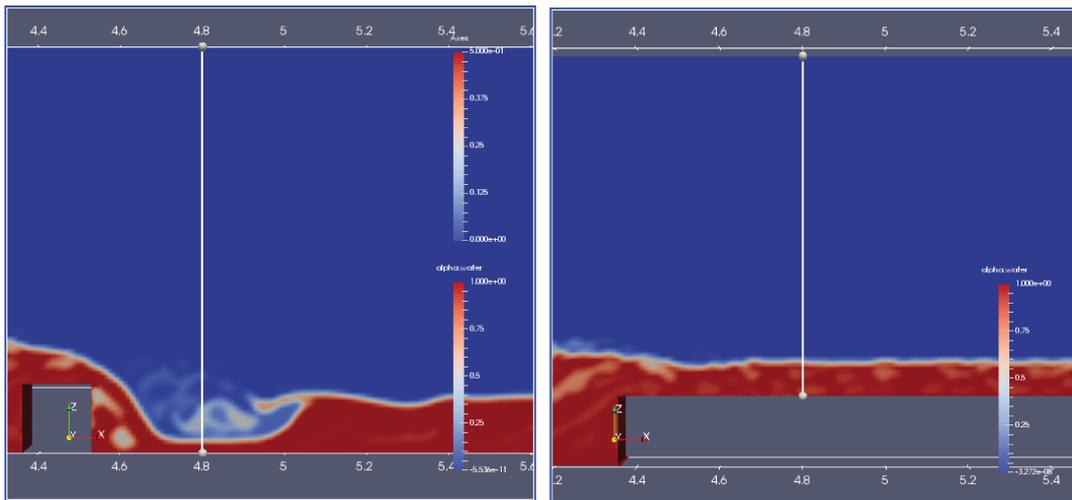


Figura 115. Coordenada $x=4,8$ do PlotOverline para perfil de velocidades. Fonte: Próprio Autor

Na figura 116 nota-se a diferença nos perfis de velocidades para os modelos com bacia elevada e rebaixada. O perfil da esquerda é referente ao modelo com bacia elevada; pode-se observar que a lâmina d'água após a contrabarragem é mínima e a velocidade máxima do perfil chega a aproximadamente 1,8m/s. O perfil da direita é referente ao modelo com bacia rebaixada, pode-se observar que a lâmina d'água logo a jusante do final da bacia é maior do que avaliada no modelo com bacia elevada, e com isso o perfil de velocidades fica mais uniforme com velocidade máxima de aproximadamente 0,70m/s.

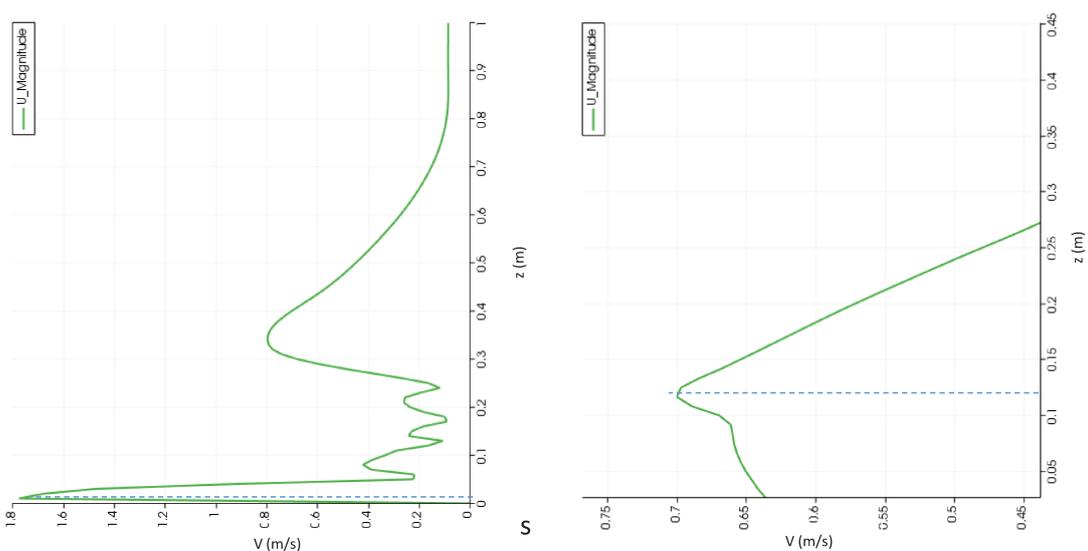


Figura 116. Perfis de velocidades para bacia elevada e rebaixada. Fonte: Próprio Autor

Estas diferenças de velocidades encontradas nestes modelos pode-se justificar basicamente pelo motivo de que no modelo com bacia elevada, a contrabarragem é responsável por criar um nível d'água de montante na bacia a fim de dissipar a energia da água que chega do vertedor, a energia é dissipada parcialmente na bacia, porém quando o escoamento passa por cima da contrabarragem e acessa a jusante da mesma, o mesmo escoamento é submetido a uma segunda queda com menor desnível (neste caso do modelo P= 0,67m(esc. 1:6), o desnível foi de 0,17m(esc. 1:6), com CTB fixo), e esta queda secundária, a que o escoamento é submetido gera uma aceleração no escoamento, gerando velocidade mais elevadas no final que podem ser dissipadas pelo controle de jusante ou que podem muitas vezes serem responsáveis por erosões deste trecho estudado. Já para a configuração da bacia rebaixada ou em depressão, o cenário é diferente. O rebaixamento estudado foi na ordem de 0,17m(esc. 1:6), e com a barragem apresentando uma altura de 0,50m(esc. 1:6), com este rebaixamento de 0,17m(esc. 1:6) a queda livre do escoamento da soleira acontece num desnível de 0,67m(esc. 1:6). Com a bacia rebaixada não existe uma contrabarragem elevando o nível do fundo, mas sim uma escavação mais profunda para a bacia que volta ao nível 0,00 do terreno após o término da bacia. Sem a presença da contrabarragem, que neste caso se faz necessária para geração de lâmina na bacia, visto que a mesma já é enterrada, o escoamento não é submetido a uma segunda queda a jusante, e isso faz com que o escoamento não sofra nenhuma aceleração neste trecho estudado, o que justifica as menores velocidade médias de saída, mesmo que a análise em questão tenha caráter qualitativo, devido a não medição de tais velocidade nos modelos físicos desenvolvidos pelo CTH. Nas figuras 117 e 118 pode-se notar esta diferença de aceleração final do escoamento para os dois modelos.

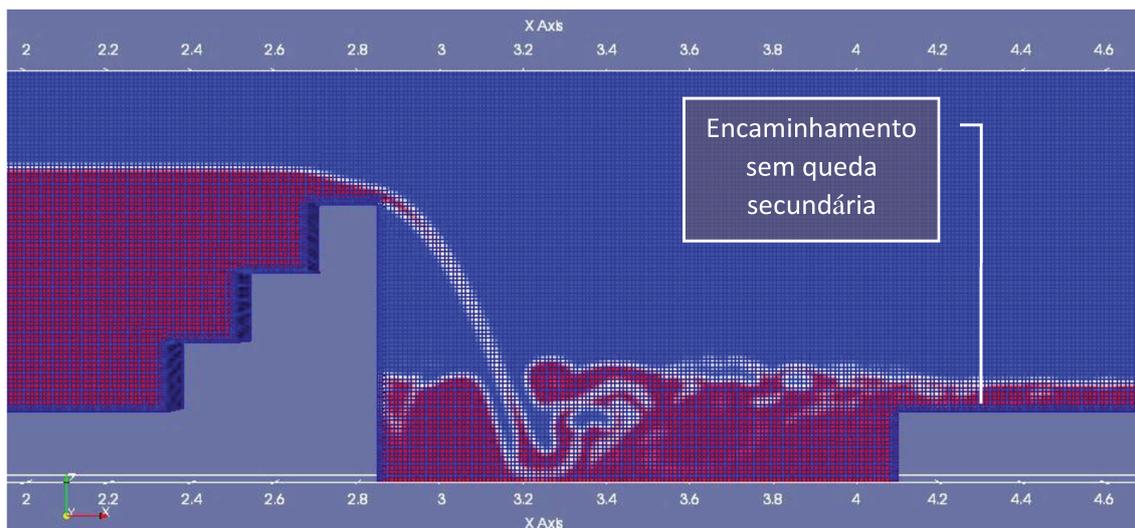


Figura 117. Modelo $P= 0,67m$ (esc. 1:6) com bacia em depressão. Fonte: Próprio Autor

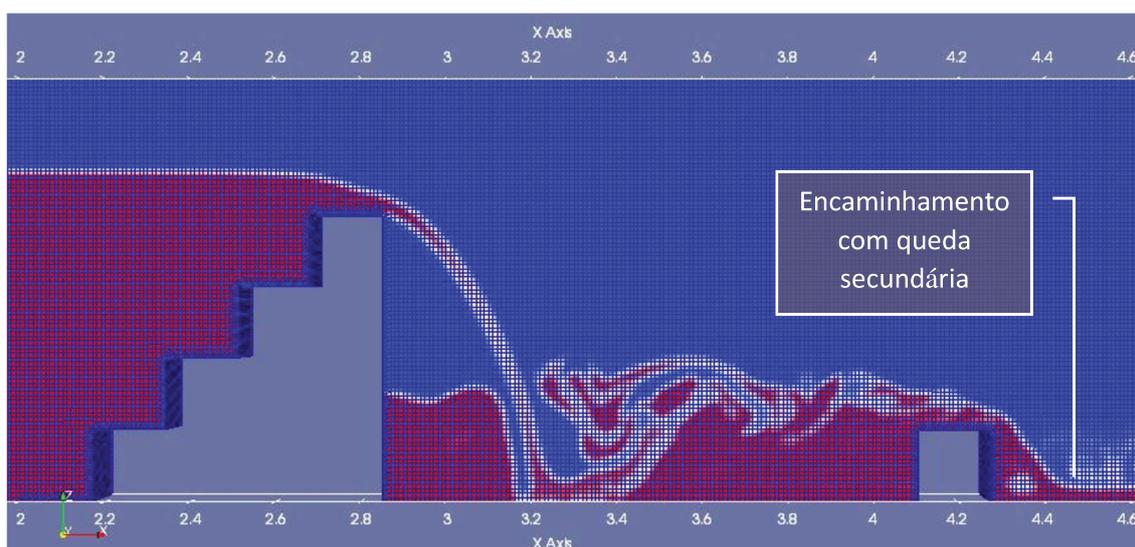


Figura 118. Modelo $P= 0,67m$ (esc. 1:6) com bacia elevada. Fonte: Próprio Autor

6.1.6. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS FASE 1

Nesta etapa do trabalho buscou-se a validação do software OpenFoam através da modelagem numérica de modelos com escala de 1:6 e comparativo direto dos resultados com os valores obtidos através dos modelos físicos reduzidos (tais modelos físicos reduzidos foram realizados pela equipe técnica do FCTH da Universidade de São Paulo). Estes modelos contemplam barragens com geometrias em gabiões, não contemplando a porosidade da peça, visto que a mesma é revestida com concreto, e contempla bacias de dissipação em

depressão ou elevada, e para esta existe a limitação da mesma através da contrabarragem, que também é constituída por gabião revestida com concreto.

Com as modelagens numéricas desenvolvidas através do software OpenFoam pode-se concluir que tal ferramenta é adequada para este tipo de estudo, visto que os resultados encontrados através do software com auxílio do Paraview são coerentes com os valores encontrados nos modelos físicos reduzidos. Pode-se concluir também que o software Paraview atende as necessidades gráficas para avaliação dos resultados e extração dos mesmos, visto que a ferramenta disponibiliza inúmeros filtros e possibilidades de extração de valores e avaliação geral do modelo. Para uma análise precisa dos modelos numéricos ressalta-se novamente a calibração dos parâmetros e refinamento adequado da malha, avaliando o custo e benefício das opções estudadas.

No início do estudo foram desenvolvidos modelos com malha computacional de 2,5cm x 2,5cm, o que representava cerca de 18.274 células, tais modelos não representavam adequadamente o escoamento turbulento desenvolvido na bacia de dissipação. Devido à falta de refinamento o ressalto hidráulico não era formado na bacia, mas sim um escoamento com uma pequena lâmina com alta velocidade. Como os valores encontrados através das malhas com refinamento de 2,5cm x 2,5cm não convergiram e não se aproximaram dos valores obtidos nos modelos físicos, tais modelos foram desconsiderados para as tabelas e gráficos comparativos. Uma segunda configuração de malha foi estudada com espaçamento de 1cm x 1cm, gerando uma quantidade aproximada de 60.000 células, para esta configuração os resultados de níveis d'água, principalmente se aderiram consideravelmente aos resultados obtidos nos modelos físicos, apresentando porcentagens inferiores a 10%. Foram realizados modelos numéricos reduzidos com refinamento de malha de 0,5cm x 0,5cm, tal refinamento apresentou resultados praticamente idênticos aos obtidos pela configuração de 1cm x 1cm. A tabela 12 apresenta os resultados obtidos dos modelos com altura da barragem de 0,83m(esc. 1:6), comprimento de bacia 1,5m(esc. 1:6), contrabarragem de 0,125m(esc. 1:6) e vazão de 0,0071m³/s, tais modelos foram estudados com refinamento de malha de 1cm x 1cm e de 0,5cm x 0,5cm, e pode-se observar que os resultados de altura de lâmina d'água de montante, jusante, e velocidade média são basicamente idênticos. Com a

configuração de 0,5cm x 0,5cm a quantidade de células trabalhadas foi na ordem de 294.000, cerca de 5 vezes mais células do que a quantidade utilizada nas modelagens 1cm x 1cm, o que obviamente impacta diretamente no tempo de execução de cálculo desenvolvido pelo OpenFoam, aumentando significativamente a duração do cálculo e exigindo que o computador seja utilizado para rodar um cálculo de cada vez devido à falta de memória disponível para o modelo, enquanto os modelos com malhas 1cm x 1cm pode-se rodar até 2 modelos simultâneos sem aumento na duração do processamento, e até 4 modelos simultâneos admitindo um aumento na duração do processamento, porém com memória disponível para a execução de tais cálculos. Visando o custo benefício dos modelos a opção adotada para todo o trabalho foi o refinamento de malha com 1cm x 1cm em X e Z e na dimensão Y uma única divisão de 10cm, visto que o modelo é bidimensional.

Tabela 12. Comparação dos resultados obtidos entre o modelo físico, numérico reduzido (malha 1cm x 1cm) e numérico (malha 0,5cm x 0,5cm). Fonte: Próprio Autor

MALHA H x V (cm)	NOME	P	L	H (x=2,5)	h (x=5,5)	Vm (x=4,8)	CTB	Q	ANTEPARO (x=6,01)
	MODELO FÍSICO	0,83	1,5	0,14	0,147	1,68	0,125	0,007	0,04
1	p_5_l_9_ctb_0.75_0	0,833	1,5	0,14	0,1	1,8	0,125	0,007	0,04
0,5	p_5_l_9_ctb_0.75_1	0,833	1,5	0,14	0,147	1,8	0,125	0,007	0,04

No que diz respeito aos resultados de nível d'água de montante a maior diferença foi encontrada na barragem P= 0,67m(esc. 1:6) e vazão de 0,0025m³/s, onde o desnível do modelo numérico e do modelo físico ficou na ordem de 1cm, valor este aceitável para a obtenção do nível d'água de montante, visto que nos demais modelos a diferença dos níveis d'água de montante não passaram de 5%. Para as velocidades médias a maior discrepância de resultados foi encontrada no modelo P= 0,50m(esc. 1:6) com bacia de 1m(esc. 1:6), e vazão de 0,0058m³/s, nesta configuração a diferença de velocidade do modelo numérico e físico ficou a ordem de 0,5m/s. Os melhores resultados de velocidade obtidos foram oriundos dos modelos P= 0,67m(esc. 1:6), visto que as linhas de tendências dos modelos numéricos e físicos ficaram próximas o que representa valores de velocidades médias muito similares, este resultado pode ser

justificado devido ao alto desnível gerado pelo $P = 0,67\text{m}$ (esc. 1:6) (um dos maiores modelos) que ocasiona uma maior velocidade a ser medida na bacia e a jusante da mesma. As alturas das lâminas d'água de jusante da bacia apresentaram uma boa aderência a linha de tendência do comparativo com a variação de comprimento da bacia dos modelos físicos, tendo a máxima diferença de aproximadamente 1,5cm.

Recomenda-se que para futuros trabalhos possam ser realizados mais modelos numéricos com as geometrias aqui trabalhadas, talvez com uma quantidade menor de variação de altura da barragem, comprimento da bacia e altura da contrabarragem, porém com um número maior de refinamento e malhas, testando inclusive malhas inferiores a 0,5cm x 0,5cm, a fim de verificar se os valores obtidos seguiram similares aos resultados das malhas de 1cm x 1cm. Recomenda-se também a construção de novos modelos físicos reduzidos com uma quantidade maior de aparelhamento para medição de níveis d'água ao longo do escoamento, medição de pressão e medições de velocidades em mais de um ponto, para que os futuros modelos numéricos possam ser calibrados a uma quantidade maior de variáveis e serem verificados com maiores informações comparativas em relação ao modelo físico.

Os modelos com bacias rebaixadas apresentaram de forma qualitativa resultados coerentes com as conclusões indicadas no relatório do CTH, o qual destaca a baixa velocidade de saída do experimento, principalmente quando comparado com o mesmo modelo, porém com bacia elevada. Os modelos de bacia em depressão apresentaram velocidades cerca de 62% inferiores as velocidades médias de saída dos seus respectivos pares (com bacia elevada). Tal latente diferença já foi justificado, o qual demonstra o impacto que a diferença de geometria gera no escoamento.

Recomenda-se a criação de novos modelos físicos reduzidos com bacias rebaixadas e melhores medições das variáveis de saída como velocidade a jusante, visto que para este trabalho foi avaliado qualitativamente este item, porém sem possibilidade de calibração já que a mesma não foi medida no modelo físico reduzido. Além da medição de velocidade pode-se acrescentar também nestes novos modelos a medição de níveis d'água ao longo do escoamento com uma distância fixa, como um estaqueamento de medição. Tais

níveis podem auxiliar na aferição dos resultados numéricos, visto que no ambiente computacional não há limites na extração de dados, quando se é utilizado software Paraview.

Os resultados até aqui apresentados fazem parte de um conjunto de modelos que seguem uma escala de 1:6, tal escala foi utilizada para a construção dos modelos físicos pelo CTH e foi seguida para a elaboração dos modelos numéricos através da ferramenta OpenFoam. Conforme é sabido devido a falta de semelhança do número de Reynolds dos modelos em escala, pode ocasionar algumas distorções nos resultados obtidos, e afim de verificar a sensibilidade destas possíveis distorções foram elaborados uma quantidade de modelos numéricos na escala de protótipo 1:1. Serão apresentados nos próximos itens os resultados obtidos pelos modelos numéricos em escala real. Tais resultados serão comparados diretamente com os resultados até aqui apresentados em escala reduzida.

Neste trabalho foi utilizado o modelo de turbulência k- ω SST que de forma geral apresentou uma representação dos fenômenos estudados, desta forma não foi realizado nenhum estudo comparativo de modelos de turbulência e possíveis divergências de resultados que poderiam ser obtidos com outros tipos de modelos. Para isto recomenda-se um estudo futuro de sensibilidade em relação aos resultados obtidos por diferentes modelos de turbulências.

Foram realizados alguns modelos com rugosidades distintas para as estruturas do barramento e da contrabarragem, tais modelos não apresentaram diferenças relevantes nos valores de saída. Os valores utilizados para o “ks” variaram de 0,0004 a 0,004. Recomenda-se desta forma um estudo futuro com avaliação de sensibilidade de uma gama mais variada de coeficientes de rugosidades para tais modelos.

6.2. Fase 2

Na fase 2 foram montados alguns modelos numéricos referentes a barragem P3, porém com suas respectivas escalas de 1:1. A execução de destes modelos visa revisar alguma possível distorção nos resultados obtidos nos modelos numéricos com escala de 1:6, devido a não semelhança do número de

Reynolds nos modelos reduzidos. Para esta comparação foram modelados 4 cenários com barragem de altura igual a 3m (P3), variando os comprimentos das bacias de dissipação. Com este modelo executado pode-se comparar os seguintes resultados:

- Vazão m^3/s (Q) x Altura do nível d'água a montante m (H)
- Vazão m^3/s (Q) x Velocidade média a jusante da contrabarragem m/s (V_m)
- Velocidade média a jusante da contrabarragem m/s (V_m) x Comprimento da bacia m (L)
- Altura do nível d'água a jusante da queda da contrabarragem m (h) x Comprimento da bacia m (L)

As comparações referentes à variação da altura da contrabarragem não serão realizadas devido ao modelo P3 possuir altura fixa de contrabarragem. Para estas comparações foram criados gráficos onde foram incluídos os valores obtidos no modelo físico reduzido, os valores obtidos nos modelos numéricos reduzidos e os valores obtidos nos modelos numéricos em escala 1:1.

Para esta fase 2, foram realizados modelos com a escala real de 1:1 e com isso os tamanhos das células também foi alterado de 1cm para 6cm. O tamanho da célula de 1cm foi utilizada na maior parte dos modelos numéricos reduzidos, visto que células menores que 1cm não afetavam os resultados e um expressivo tempo de resolução do problema pelo software OpenFoam (alguns modelos com células de 0,50cm demoraram mais de 20 horas para a solução do problema, enquanto os modelos com células de 1cm demoraram no máximo 11 horas).

Para estas modelagens foram necessários também novos STLs que já contemplassem as medidas da escala 1:1; para isto foram criados modelos STLs com auxílio da ferramenta Autocad (figura 119) e inseridos nos modelos numéricos.

Contemplando também a escala do tempo foi realizada a seguinte conversão para a configuração do tempo final do modelo na escala 1:1.

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{\frac{L_m}{V_m}}{\frac{L_p}{V_p}} \quad (88)$$

Através do rearranjo da equação 88 tem-se:

$$t_p = \sqrt{6} \times 40s = 98s \quad (89)$$

Com isso foi adotado uma duração de 98s para o modelo numérico em escala 1:1. Para manter o mesmo número de passos no tempo foi adotado um intervalo de 0,25s para manter aproximadamente 400 passos no tempo, assim como o modelo reduzido havia sido configurado.

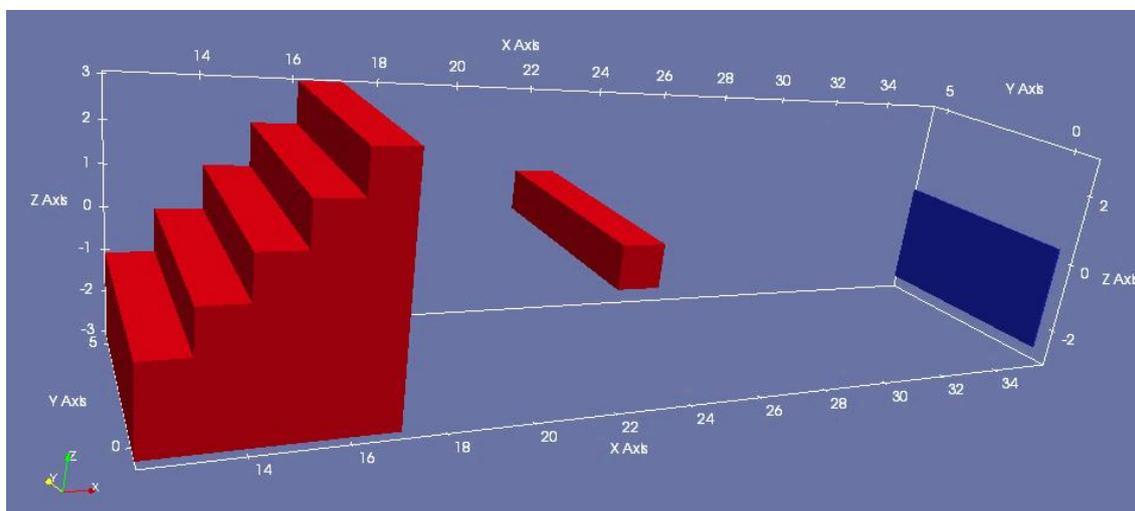


Figura 119. Desenho 3D das estruturas em escala 1:1. Fonte: Próprio Autor

Para os gráficos que serão apresentados houve a necessidade de representar todos os resultados obtidos com a mesma escala afim de facilitar a construção de um comparativo direto dos valores, para isto foram utilizadas as relações para transformar os resultados obtidos no modelo numérico 1:1 para a escala de 1:6.

6.2.1. RESULTADOS $Q(m^3/s)$ X $H(m)$ – CFD 1:1

Na figura 120 foi criado um gráfico com os resultados obtidos pelo modelo numérico na escala 1:6, pelo modelo numérico na escala 1:1 e pelo modelo físico desenvolvido pelo CTH. Este modelo foi desenvolvido para a barragem P3 e comprimento de bacia variado. O comparativo entre modelo físico reduzido e

numérico reduzido já foi apresentado nas figuras anteriores e agora é acrescentado os resultados obtidos pelo modelo numérico na escala 1:1. Os resultados apresentados na figura 120 mostram uma proximidade com os resultados obtidos nos modelos em escala, visto que a linha de tendência dos resultados acompanha as linhas de tendência dos modelos reduzidos, porém com uma inclinação mais suave, já que o resultado para a bacia de 9m de comprimento divergiu em aproximadamente 5,30% em relação ao “H” obtido no modelo numérico reduzido e 3,85% em relação ao “H” obtido no modelo físico reduzido. Outro ponto a ser destacado é que conforme se aumenta a vazão, a diferença dos resultados do modelo 1:1 para os demais também aumenta. Com a vazão mínima do modelo $Q = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$, os resultados dos três modelos são idênticos, porém com a maior vazão de $Q = 0,0075 \text{ m}^3/\text{s}$, os resultados são os mais divergentes que foram estudados.

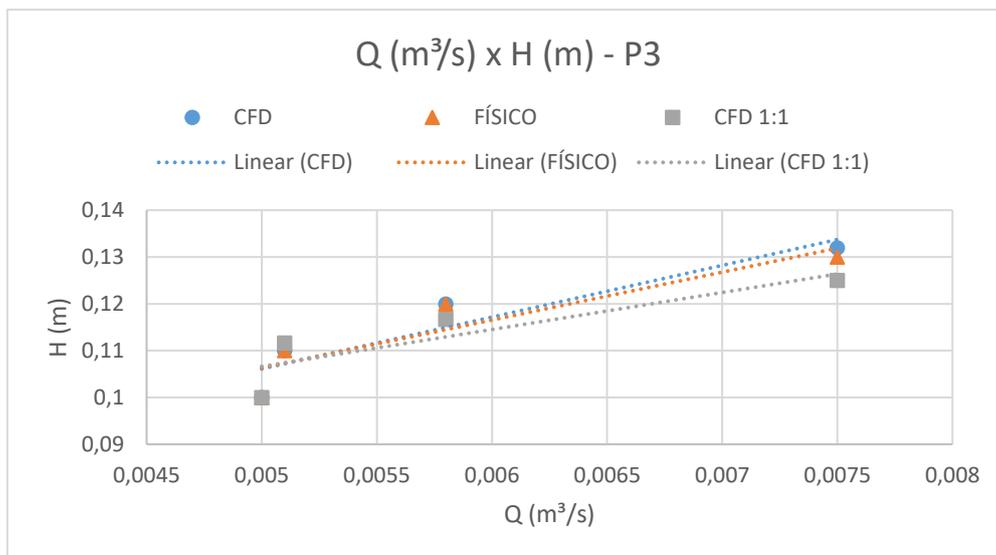


Figura 120. Gráfico comparativo de Q x H, modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 (P=3). Fonte: Próprio Autor

6.2.2. RESULTADOS $Q(\text{m}^3/\text{s}) \times V_m(\text{m}/\text{s})$ – CFD 1:1

Neste item será apresentado o comparativo da vazão de entrada (Q) a velocidade média (V_m) medida a jusante da contrabarragem para os três modelos (numérico 1:6, numérico 1:1 e físico reduzido). Neste comparativo direto dos resultados, pode-se notar uma aderência significativa das linhas de

tendências que representam os valores de saída do modelo numérico 1:1 com o modelo numérico 1:6. Para os modelos com comprimento de bacia de 4,5m os resultados obtidos no modelo numérico 1:1 em comparação com os demais apresentou uma significativa diferença de valores em torno de 21,92% e 26,35%, para o modelo numérico 1:6 e físico reduzido respectivamente. Para os cenários com maiores vazões de entrada e maiores comprimento de bacias não houveram diferenças superiores a 15%. De uma forma geral a inclinação da linha de tendência do modelo numérico 1:1 se apresentou com uma inclinação ligeiramente mais inclinada do que a linha de tendência do modelo físico reduzido e ao mesmo tempo bastante aderente com o modelo numérico reduzido. (figura 121).

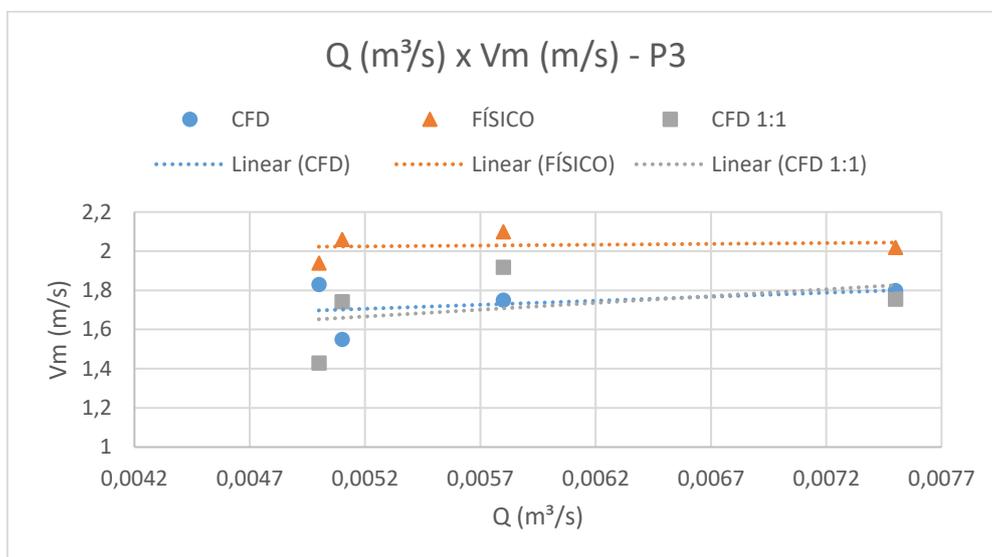


Figura 121. Gráfico comparativo de Q x V_m , modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 (P=3). Fonte: Próprio Autor

6.2.3. RESULTADOS $L(m)$ X $V_m(m/s)$ – CFD 1:1

No comparativo de velocidade média com o comprimento das bacias o modelo numérico em escala 1:1 apresentou uma grande proximidade de resultados para os maiores comprimentos de bacias, visto que para o comprimento de 9m a diferença entre o modelo 1:6 e 1:1 foi de apenas 2,47%. Já para os menores comprimentos de bacias a diferença ficou maior, visto que a velocidade no modelo 1:1 ficou com 1,42m/s enquanto no modelo físico a mesma configuração de bacia (4,5m) a velocidade ficou em 1,94m/s, registrando

desta forma uma diferença de 26,35%. A linha de tendência dos resultados do modelo 1:1 se apresentou com uma inclinação superior as linhas de tendências dos modelos 1:6 e físico, e destacam-se também os valores inferiores aos encontrados nos respectivos modelos. Lembra-se também que o aumento da velocidade de jusante das bacias ocorre em grande parte devido ao aumento da vazão de entrada do modelo, e nesta modelagem as vazões variaram de 0,005 m³/s a 0,0075m³/s, sendo a menor vazão utilizada para a bacia com comprimento de 4,5m e a maior vazão para a bacia com comprimento de 9m. (figura 122).

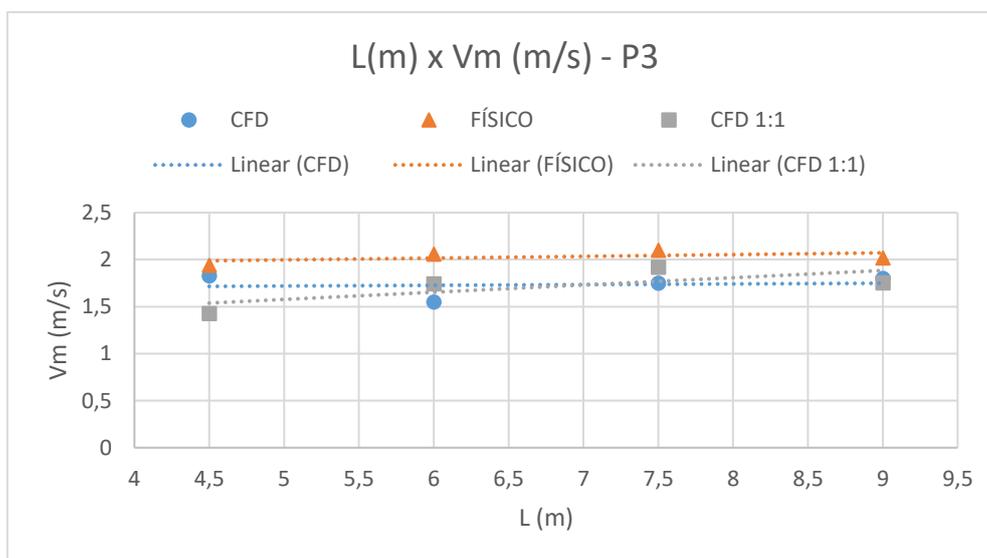


Figura 122. Gráfico comparativo de L x Vm, modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 (P=3). Fonte: Próprio Autor

Na figura 123 pode-se observar o trecho do escoamento na bacia de 4,5m, e a queda da lâmina d'água provocada pela contrabarragem. O modelo 1:1 foram utilizadas 49.107 células com 6cm de tamanho, enquanto no modelo 1:6 foram utilizadas 49.276 células com tamanho de 1cm. Nota-se nesta figura também um maior passivo de água a montante da contrabarragem no modelo 1:1, enquanto no modelo 1:6 a lâmina vertente do barramento gera uma aproximação maior da contrabarragem e impossibilita um maior volume de água reservado na bacia.

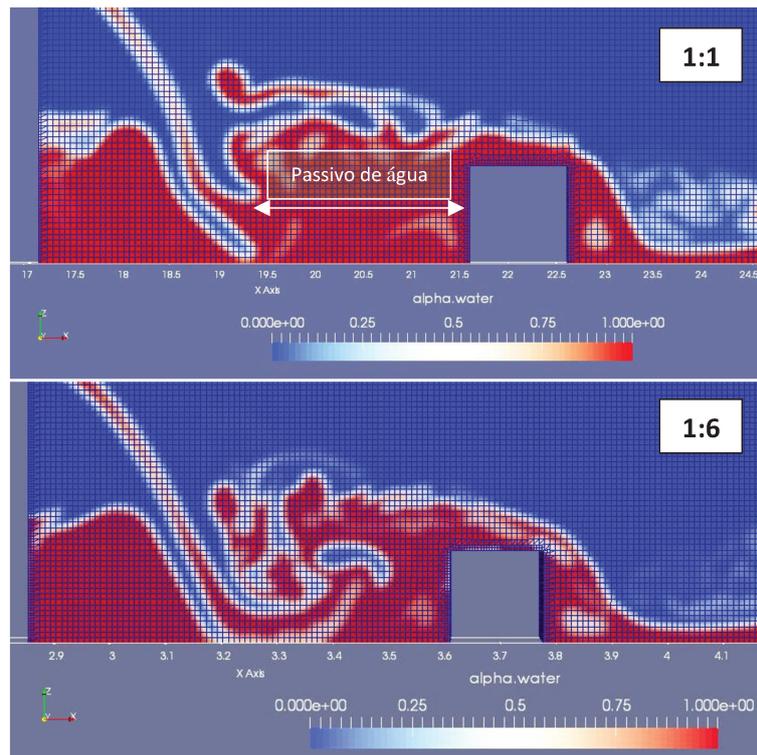


Figura 123. Modelos numérico reduzido e na escala de 1:1, $P=3$, $L=4,5m$. Fonte: Próprio Autor

6.2.4. RESULTADOS $L(m)$ X $h(m)$ – CFD 1:1

Para o comparativo de L x h o modelo 1:1 apresentou bons resultados para a menor bacia de dissipação, com comprimento de 4,5m, visto que a diferença de valores é quase nula. Com o aumento do comprimento da bacia e respectivamente com o aumento da vazão, houve um descolamento dos resultados quando comparados com os modelos físicos e numéricos reduzidos. Parte-se de um erro nulo para a menor bacia de dissipação para uma diferença de aproximadamente 14,84% para a bacia de 9m quando a comparação é realizada com o modelo físico e cerca de 12,90% quando se faz a comparação com o resultado do modelo numérico reduzido. A linha de tendência do modelo numérico 1:1 apresenta uma inclinação mais acentuada do que as linhas de tendências dos modelos reduzidos, o que provavelmente poderia exibir grandes divergências para vazões maiores. (figura 124).

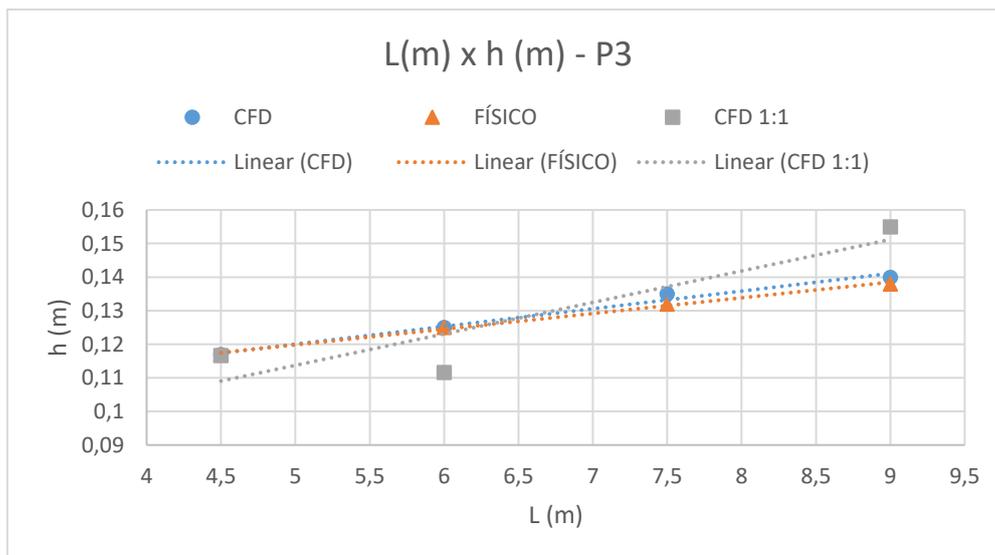


Figura 124. Gráfico comparativo de L x h, modelo físico reduzido, modelo numérico reduzido e modelo numérico 1:1 (P=3). Fonte: Próprio Autor

6.2.5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS FASE 2

Comparando os resultados obtidos pelo modelo numérico (1:6) com o modelo numérico (1:1), pode-se observar que a diferença apresentada nos níveis d'água de montante do barramento (H) e de jusante das bacias (h) não apresentaram uma diferença significativa, visto que as maiores discrepâncias de altura d'água a montante encontradas no modelo P3 (modelo utilizada para a realização desta comparação dos resultados 1:6 e 1:1), não foram superiores a 5%. A linha de tendência dos resultados obtidos através do modelo 1:1 também seguiu a linha de tendência do modelo 1:6, com uma certa aderência, porém com uma inclinação ligeiramente mais suave.

Colocando em comparação direta os resultados de nível d'água a jusante a bacia, pode-se notar uma maior proximidade com os valores para vazões menores. Para as maiores vazões ainda assim a diferença de valores não passa de 12,90% o que resulta em uma diferença no modelo reduzido de aproximadamente 1,5cm e no modelo em escala real 9cm. Tais resultados podem ser considerados satisfatórios visto que os barramentos em Gabiões possuem suas respectivas medidas em metro linear, e a menor altura de peça com medidas comerciais não são inferiores a 50cm, o que traz maior segurança em relação as proteções de montante e jusante. A linha de tendência, mesmo

com valores sobrepostos para as menores vazões apresenta uma inclinação mais elevada quando comparada com a linha do modelo reduzido, porém ainda assim com valores divergentes de no máximo 12,9%.

Em relação às velocidades comparadas dos respectivos modelos 1:6 e 1:1, tais valores ficaram dentro de uma margem de erro inferior a 11% o que também valida a ferramenta para a avaliação de tais variáveis. Somente o modelo com a vazão mínima dos ensaios representou uma velocidade cerca de 21,92% inferior a velocidade encontrada no modelo numérico em escala 1:6. Tais valores encontrados nos modelos 1:1 validam o uso da ferramenta e para a utilização do software para o desenvolvimento de projetos deverá ser levada em consideração as porcentagens aqui apresentadas relacionadas as velocidades calculadas.

É possível concluir que para todos os cenários modelados da barragem P3 que mesmo sem o atendimento completo das semelhanças, devido à falta da semelhança de Reynolds, e com as respectivas transformações referentes às escalas aqui trabalhadas, os resultados se apresentaram dentro de uma faixa de erros admissíveis que resultam em baixo impacto nos futuros projetos similares a esta estrutura, já que os níveis d'água de montante ficam dentro de uma margem de 5% de erro, os níveis d'água de jusante ficam em uma margem inferior a 12,90% de erro, sendo que para o modelo 1:1 as alturas de água são inferiores quando comparadas com os modelos numéricos em escala reduzida, e as velocidades encontradas nos modelos 1:1 também resultam em valores inferiores aos encontradas nos modelos de escala reduzida de até no máximo 21,90%, o que para projetos de engenharia são admissíveis visto as diversas incertezas envolvidas no sistema de dimensionamento e devido ao menor efeito de sollicitação no material com tais velocidades inferiores.

Colocado em comparação direta os resultados obtidos pelo modelo físico reduzido e pelo modelo numérico em escala 1:1, pode-se notar que as diferenças de valores aqui encontradas são similares as encontradas na comparação do modelo numérico 1:6 com o modelo numérico 1:1, com exceção de alguns pontos onde as diferenças se atenuaram e em outros pontos onde as diferenças ficaram mais latentes, mas de forma geral bastante similares.

No que diz respeito ao nível d'água de montante a diferença de valores dos modelos físicos e numéricos 1:1 não apresentou uma divergência superior a 3,85%, ou seja, valores muito próximos com pouco diferença de nível. Esta diferença de 3,85% resulta em um desnível real de aproximadamente 5mm o que é pouco relevante para uma lâmina de 12,5cm, além do que as peças de Gabiões apresentam medidas mínimas de 50cm, conforme indicado no item 6.2.5, o que não afeta a sensibilidade do sistema e não resulta em problemas técnicos na estrutura. Outro ponto importante é que a altura encontrada no modelo 1:1 foi 5mm inferior a altura de montante encontrada no modelo físico e não superior. A linha de tendência do modelo 1:1 ficou quase sobreposta a linha de tendência do modelo físico, visto que tais valores ficaram bastante próximos, porém com uma inclinação da linha de tendência 1:1 ligeiramente inferior ao modelo físico. Tais resultados validam a ferramenta para a avaliação dos resultados de lâmina d'água a montante da barragem, visto que as discrepâncias aqui apresentadas são pequenas e com baixo efeito técnico no desempenho da solução.

Em relação aos níveis de água encontradas a jusante das bacias de dissipação para os modelos aqui estudados, nota-se que o comparativo também segue basicamente a mesma análise feita ao comparativo dos modelos numéricos 1:6 e 1:1, com exceção de que a diferença máxima encontrada entre o modelo físico e o modelo 1:1 ficou na ordem de 14,84%, uma diferença um pouco superior a encontrada entre os modelos numéricos (12,90%). Tal diferença de lâmina d'água resulta em medida real um desnível de aproximadamente 10cm. As estruturas que são projetadas para proteção lateral das bacias de dissipação e o trecho a jusante das mesmas também podem ser confeccionadas com peças de Gabiões, e como tais soluções possuem medidas mínimas de 50cm, esta diferença de valores não afeta o desempenho técnico da solução e garante a validade do programa para a avaliação dos níveis de água a jusante da bacia. Um ponto extremamente importante para a garantia de uma correta avaliação deste nível de água a jusante da bacia, é justamente o conhecimento do nível d'água a jusante do modelo. No modelo físico foi aplicada uma comporta a jusante de todo o modelo para o controle de saída do modelo, tal comporta foi reproduzida no modelo numérico como um pequeno anteparo no

trecho final da modelagem, utilizando o mesmo processo de criação da peça no Autocad e extração da mesma na malha computacional do modelo tanto em escala 1:6 como em escala 1:1.

Para a avaliação das velocidades encontradas nos modelos físicos e numéricos 1:1, constatou-se que a diferença dos valores pode chegar a até 26,35%. Esta diferença por se aproximar dos 30% pode-se entender como um sinal de atenção. Tal diferença nas velocidades encontradas resulta em valores reais de 0,37m/s de diferença na velocidade do modelo físico e numérico. Para este item em questão pode-se avaliar em estudos futuros a verificação de malha mais refinadas para a área de jusante da bacia, com células inferiores a 0,5cm de tamanho, com computadores capazes de processar tais modelos, a fim de verificar se os valores aqui apresentados sofrerão mudanças significativas. Todos as velocidades encontradas nos modelos numéricos 1:1, foram inferiores às velocidades encontradas nos modelos físicos reduzidos, este é um ponto importante de ser avaliado pois quando as velocidades do escoamento são inferiores tem-se menor impacto danoso nos materiais de revestimento a serem aplicados, e menor força erosiva caso o trecho final não possua revestimento. Devido aos valores encontrados nas velocidades de estudo não passarem de uma variação de 26,35%, e tais valores serem inferiores aos encontrados nos modelos reduzidos, pode-se concluir que a ferramenta apresentou resultados satisfatórios para esta análise porém faz-se aqui uma ressalva de ser levado em consideração a margem de erro apresentada para futuros estudos e projetos, e ainda destaca-se a necessidade de um maior refinamento da malha com medidas de células inferiores a 0,5cm e verificação da influência nos resultados das velocidades.

O nível d'água de jusante (h) que foi medido no modelo físico reduzido faz referência ao trecho final do ensaio que sofre a influência do controle de jusante, conforme pode ser verificado na figura 125.



Figura 125. Modelo físico reduzido. Fonte: Próprio Autor

Este nível foi utilizado para calibrar o anteparo final. Porém o trecho do impacto da água na base do modelo a jusante a contrabarragem, que é responsável por acelerar o escoamento e apresentar as velocidades medidas não foi observado no quesito NA. Com a falta desta informação não é possível comparara este nível que pode ser considerado o h_i da figura 125. Sem a confirmação do h_i pode-se entender que as diferenças de velocidades observadas nos modelos físicos e numéricos podem ser derivadas de pequenas diferenças destes níveis h_i e pela presença de um escoamento ao qual o perfil de velocidades apresenta uma grande variação.

7 Conclusão

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o desempenho do software OpenFoam 4.0 ao simular alguns modelos numéricos de uma estrutura composta por barragem com geometria em gabiões, bacia de dissipação, e contrabarragem com geometria em Gabiões. Para esta avaliação os modelos numéricos foram calibrados com modelos físicos desenvolvidos pelo FCTH na Universidade de São Paulo (USP), e os seus respectivos resultados foram comparados entre si, através de gráficos. Os modelos aqui estudados possuem três variáveis geométricas que se alteram conforme a configuração ensaiada, sendo elas, altura da barragem, comprimento da bacia e altura da contrabarragem.

Numa segunda etapa foram avaliados também uma amostra dos modelos numéricos com uma escala de 1:1, a fim de verificar qual seria a influência da não semelhança do número de Reynolds nos modelos. Para isto foram criados modelos onde as barragens possuíam 3m de altura. Arquivos STL's e novos ambientes numéricos foram desenvolvidos para a posterior extração de dados através da ferramenta Paraview.

Na primeira fase os modelos numéricos foram elaborados com a escala de 1:6, mesma escala utilizada pela equipe técnica do FCTH para a construção dos modelos físicos reduzidos. Para esta etapa foram avaliados alguns refinamentos de malhas computacionais com variação de células de 2,5cm até a malha mais refinada de 0,5cm, onde foi determinado através de uma avaliação custo-benefício a melhor configuração do modelo, que representasse os melhores resultados com o menor tempo de processamento. Pode-se concluir que de maneira geral a malha de 1cm x 1cm foi a malha que representou os melhores resultados com o menor tempo de processamento, porém destaca-se que para futuros trabalhos podem-se realizar novos modelos numéricos com malhas inferiores a 0,3cm x 0,3cm a fim de verificar se tal nível de refinamento pode afetar relevantemente nos resultados, visto que foram realizado testes com malhas 0,5cm x 0,5cm e os valores ficaram basicamente idênticos aos obtidos pela malha 1cm x 1cm. O modelo de turbulência k- ω SST apresentou resultados satisfatórios em relação a reprodução dos fenômenos do modelo. Outro modelo

que foi desenvolvido pelo FCTH foi o que apresentava a bacia em depressão, e para tal modelo a equipe técnica concluiu qualitativamente que tal configuração se caracterizava por uma menor velocidade média de jusante. Com o intuito de aferir esta informação, foram desenvolvidos modelos numéricos ainda com a escala 1:6, onde a configuração do modelo foi elaborada com a tal bacia de depressão, a para isto foi constatado qualitativamente que as velocidades de jusante realmente apresentam uma redução na ordem de 60%, quando comparadas com bacia elevadas. Ainda para os modelos físicos reduzidos recomenda-se que sejam realizados novos modelos porém com uma quantidade maior de medidores de nível d'água, se possível espaçados por uma distância conhecida ao longo do escoamento, a fim de melhorar a calibração dos níveis encontrados nos modelos numéricos, também salienta-se a recomendação de inclusão nestes novos modelos medições de pressão, visto que a ferramenta OpenFoam também processa tais dados e o software Paraview é capaz de apresentar esses resultados graficamente para a calibração do modelo.

Na segunda fase pode-se concluir que as avaliações dos modelos numéricos em escala 1:1, comparados com os modelos numéricos em escala 1:6, apresentaram diferenças desprezíveis em relação aos níveis de água medidos a montante do barramento e a jusante da bacia de dissipação. As variações de níveis d'água encontradas a montante a barragem não excedeu 5,30% de diferença o que resulta em 5mm. As variações de níveis d'água a jusante da bacia não ultrapassaram os 12,90% de diferença o que resulta em valores reais 9cm. Ambos os valores estudados possuem pouca significância pois conforme já foi abordado neste trabalho as peças de Gabiões são consideradas com medidas em metros, sendo que a menor peça possui 0,5m, o que não se torna tão sensível a pequenas variações de 0,5cm e 9cm. Já as velocidades apresentaram uma diferença mais relevante, em torno de 21,92%, no modelo mais crítico. Tal diferença na velocidade poderia gerar algum tipo de problema nos materiais aplicados como proteção do leito de jusante caso a velocidade do modelo numérico 1:1 apresentasse valores superiores aos modelos reduzidos, porém na escala de protótipo os valores obtidos foram inferiores aos valores visualizados nos modelos reduzidos. Recomenda-se uma

atenção nos valores de velocidades médias de modelos similares, e que sejam levados em consideração esta margem de erro de 21,92%.

A comparação dos modelos numéricos 1:1 com os modelos físicos reduzidos apresentou uma baixa diferença nos resultados de níveis d'água de montante e jusante, não passando de 3,85% e 14,84%, respectivamente. Em relação a velocidade média dos modelos, houve uma diferença mais elevada atingindo uma margem de erro de 26,35% para o menor comprimento de bacia de dissipação, em consequência a menor vazão do estudo. Assim como na comparação do modelo 1:1 com o modelo 1:6, todas as velocidades encontradas nos modelos numéricos 1:1 foram inferiores as velocidades encontradas nos modelos físicos. Tal fato traz uma maior segurança para o usuário devido aos esforços obtidos nos modelos 1:1 serem menores do que os observados nos modelos reduzidos, mas isto não impossibilita a elaboração de modelos físicos com uma quantidade maior de equipamentos de medições, conseguindo desta forma modelos numéricos reduzidos com um maior nível de qualidade de calibração e conseqüentemente melhores resultados dos modelos numéricos em escala 1:1.

A modelagem numérica é uma alternativa mais barata e mais rápida de ser aplicada quando comparada com a modelagem física, porém para uma avaliação correta de uma gama de resultados dos modelos numéricos criados por softwares computacionais, deve-se realizar uma calibração dos modelos estudados. A avaliação de uma estrutura somente com uma visão numérica computacional possui grande risco de estar errada e de representar os fenômenos de forma diferente da realidade. A aplicação da modelagem numérica após a etapa de uma correta calibração pode facilitar a obtenção de resultados for necessário estudar pequenas alterações do modelo. Para obras de grande vulto ainda hoje é recomendado que modelos físicos sejam construídos.

Para este trabalho foi utilizado o ensaio dos modelos físicos reduzidos desenvolvido pelo CTH, e pode-se constatar que para futuros trabalhos, a quantidade e medições extraídas deste modelo podem enriquecer de forma significativa a etapa de calibração do modelo numérico, e isto conseqüentemente melhora os resultados comparativos com o modelo numérico em escala 1:1. De

forma geral a ferramenta OpenFoam pode ser utilizada para a elaboração de estudos técnicos barragens com geometrias em gabiões (desconsiderando a porosidade da mesma), desde que seja realizada uma calibração correta do modelo através e uma modelagem física.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, R. et al. Estruturas flexíveis para obras fluviais, Primeira parte: Obras transversais para sistematizações e derivações hidráulicas, MACCAFERRI GABIÕES DO BRASIL LTDA, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 10514:1988: Redes de aço com malha hexagonal de dupla torção, para confecção de gabiões – Especificação, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 8694:2013: Arames de aço de baixo teor de carbono, revestidos, para gabiões e demais produtos fabricados com malha de dupla torção, 2013.

American Society for Testing and Materials. ASTM 856-98: Standard Specification for Zinc-5% Aluminum-Mischmetal Alloy-Coated Carbon Steel Wire, 1998

ARANTES, E. J. Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD, Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação e área de concentração em hidráulica e saneamento, Escola da Engenharia de São Carlos, 2007.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 2 ed. rev. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2003.

BARBOSA, J.C. Modelagem na educação matemática: contribuições para o debate teórico. In: REUNIÃO ANUAL DA ANPED,24.,2001, Caxambu. Anais ... Caxambu: ANPED, 2001. Disponível em: <<http://uefs.br/nupemm/anped2001.pdf>>. Acesso em: nov, 2008.

BERRY, N. K., “The Start of Bed Load Movement”, Thesis, University of Colorado, 1948.

CALVO L. E. G. ; COLONNA, P. C. R. Modelo de elementos finitos no hidrostático integrado en la vertical para la propagación de olas, XXVII congreso latinoamericano de hidráulica lima, Perú, 28 al 30 de setiembre de 2016.

CAMPOS, G. F. Modelagem Hidrodinâmica 3D de escoamento em vertedouros, Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em engenharia de

recursos hídricos e ambiental do setor de tecnologia da universidade Federal do Paraná, 2011.

CANHOLI, A. P. Drenagem urbana e controle de enchentes, Oficina de Textos, 2 ed. São Paulo, 2014.

CHANSON, H. The Hydraulic Open Channel Flow, Physical modelling of hydraulics, Arnold, London, 1999.

CHOW V. T. Hidráulica de Canais abertos, MacGraw-Hii, Colombia, 2005.

COLEBROOK, C. F. Turbolent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipes laws, I. Inst. Civ. Eng., London, 1938.

COSTA, D. J. L. Modelo matemático para avaliação hidrodinâmica de escoamentos em regime não-permanente, Tese doutorado, Programa de pós-graduação e área de concentração em hidráulica e saneamento, Escola de engenharia de São Carlos, 2015.

DIAS, A. Análise de desempenho hidráulico de uma soleira lateral através de CFD, Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de engenharia hidráulica e sanitária, 2011.

FCTH, Modelo Reduzido Bidimensional de Barragem de Gabião Caixa, Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, São Paulo, 2004.

FERNANDES, M. A. F.; OTA, J. J. Modelagem Computacional Tridimensional de um Vertedouro de Baixa Queda, RBRH vol. 21 no.2 Porto Alegre abr./jun. 2016 p. 360 – 376.

FERZIGER, H. J.; PERIC, M. Computational methods for fluid dynamics, Springer, 3 ed. 2002.

HASSAN, I. M. Flow over Gabion Weirs, JOURNAL OF IRRIGATION AND DRAINAGE ENGINEERING, ASCE, Agosto 2010

HUERTA, J. C. A.; CASARÍN, R. S. Modelación numérica de procesos hidrodinámicos en recubrimientos porosos de playa, XVII congreso latinoamericano de hidráulica lima, Perú, 28 al 30 de setiembre de 2016.

KANASHIRO, W. et al. Técnicas de laboratório para estudos em modelo reduzido, XXIX Seminário nacional de grandes barragens, Abril 2013.

KING H. W. Handbook of hydraulics for the Solution of Hydraulics Problems. MacGraw-Hill, New York, 1954.

LEISTER, P. Obras de contenção: manual técnico, MACCAFERRI DO BRASIL LTDA, Publicação Técnica, 2008

LOBOSCO, R. J. Investigação teórico-numérico da aeração em estruturas de vertedouros em degraus com uso de software livre, Tese doutorado – Programa pós-graduação e área de concentração em hidráulica e saneamento, Escola de engenharia de São Carlos, 2013.

MACHADO J., A.G.; SANTO, A.O.E. A modelagem como caminho para fazer matemática na sala de aula. Disponível em: <<http://somaticaeducar.com.br/arquivo/artigo/1-2008-09-04-18-08-55.pdf>>. Acesso em: dez, 2008.

MAGELA, G. P. Projetos de Usinas Hidrelétricas passo a passo, Oficina de textos, 1 ed. 2015

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro. C Editora. 2ed. 1995,454p.

MAVIS, F. T., and Laushey, L. M., “A Reappraisal of the Beginnings of Bed Movement-Competent Velocity,” Proceedings of the International Association for Hydraulic Structures Research, Stockholm, Sweden, 1948.

MORAIS, V. H. P. Modelagem numérica experimental aplicada a um vertedouro de superfície composto por um perfil Creager e um dissipador do tipo Roller-bucket, Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia, Unicamp, 2015

NOVAK, P. et al. Hydraulic Structures, Taylor & Francis Group, 4 ed. 2007.

PETERKA, A.J. 1978. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. United States, Bureau of Reclamation, Denver, 1984.

PORTO, R. M. Hidráulica Básica, 4 ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.

RAND, W. Flow geometry at straight drop spillways, A.S.C.E., V. 81, n. 791, p. 1-13, Setembro 1955.

SCHOKLITSCH, A. Kolkbindung unter Ueberfallstrahlen, Die Wasser-wirtschaft, N 24, 1932.

SILVA, et al. Modelagem de matéria orgânica e nitrogênio em um evento de poluição na foz do rio perequê, Brasil, XXVII Congresso latinoamericano de hidráulica lima, Perú, 28 al 30 de setiembre de 2016.

VASQUEZ, J. A.; LIMA, G. Modelación cfd de ondas tsunami en reservorios, lagos y minas causadas por deslizamientos de laderas, XXVII congreso latinoamericano de hidráulica lima, Perú, 28 al 30 de setiembre de 2016.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics, Longman Scientific & Technical, 1995.

YALIN, M. S.. Fundamental of Hydraulic Physical Modelling, Department of Civil Engineering, Queen's University, Canada, 1989.