

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,  
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Rubens Gomes Dias Campos**

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE  
BRECHAS EM RUPTURAS DE BARRAGENS EM CASCATA UTILIZANDO  
MODELAGEM FÍSICA**

**Belo Horizonte**

**2020**

**Rubens Gomes Dias Campos**

**PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DE PARÂMETROS DE  
BRECHAS EM RUPTURAS DE BARRAGENS EM CASCATA UTILIZANDO  
MODELAGEM FÍSICA**

Versão Final

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

Área de concentração: Recursos Hídricos

Linha de pesquisa: Modelagem Física e Matemática em Hidráulica.

Orientadores: Aloysio Portugal Maia Saliba  
Márcio Benedito Baptista

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2020

C198p Campos, Rubens Gomes Dias.  
Proposta de uma metodologia para obtenção de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata utilizando modelagem física [recurso eletrônico] / Rubens Gomes Dias Campos. - 2020.  
1 recurso online (xiv, 209 f. : il., color.) : pdf.

Orientadores: Aloysio Portugal Maia Saliba, Márcio Benedito Baptista.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 203-209.

Bibliografia: f. 195-202.  
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Barragens e açudes - Ruptura - Teses. 4. Brechas (Geologia) - Teses. I. Saliba, Aloysio Portugal Maia. II. Baptista, Márcio Benedito. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.  
CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL

Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br

<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

## FOLHA DE APROVAÇÃO

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE BRECHAS EM RUPTURAS DE BARRAGENS EM CASCATA UTILIZANDO MODELAGEM FÍSICA

**RUBENS GOMES DIAS CAMPOS**

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

  
Prof. ALOYSIO PORTUGAL MAIA SALIBA

Prof. MÁRCIO BENEDITO BAPTISTA

  
Prof. LUIZ RAFAEL PALMIER

  
Prof. LUCIO FLAVIO VILLAR

  
Prof. EDER DANIEL TEIXEIRA

  
Profa. HERSÍLIA DE ANDRADE E SANTOS

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH



Prof.ª Taciana Toledo de Almeida Albuquerque  
Subcoordenadora

Versão Final aprovada por

  
Prof. Aloysio Portugal Maia Saliba  
Orientador

Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2020.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Rubens e Maria do Carmo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor Aloysio Saliba, pelo apoio e perseverança.

Ao meu coorientador (em outros dias orientador), de longa data, Professor Márcio Baptista, pela presença constante, auxílio e dedicação.

Aos colaboradores que contribuíram arduamente Victor Brum, Raquel Camargos, Daniel Passos, Danielle Moreira e Júlia Muniz.

Aos funcionários do CPH, Geraldo, Euler e Paulinho, pelo apoio na elaboração das ferramentas auxiliares e ajuda.

Ao órgão financiador, CNPq, pelo fomento à pesquisa.

Aos professores, com os quais cursei disciplinas da pós-graduação.

Aos funcionários da EHR-UFMG.

Aos professores do PPGSMARH.

Ao Júlio e demais funcionários da secretaria do PPGSMARH.

Aos professores Jorge, Edna e Martinez do CPH, pelas dicas importantes sobre o uso do CPH e demais estudos.

Ao Professor Rudolf, pela dica oportuna do uso do Scan 3D.

Ao Engenheiro Benjamim, pela ajuda no fornecimento do material argiloso.

Aos professores Eder (IPH-UGRGS), Palmier (EHR-UFMG) e Lúcio (ETG-UFMG) pelas contribuições durante a banca de qualificação.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram para esta pesquisa.

Tenho apenas duas mãos e o sentimento do mundo...(Carlos Drummond de Andrade).

## RESUMO

As consequências ambientais, econômicas e sociais das rupturas de barragens são catastróficas e demandam seu conhecimento prévio para minimização dos riscos. Essas consequências são função direta das brechas de ruptura, cujas formas geométricas e os parâmetros de formação, tais como tempo de formação e parâmetros geométricos como largura, altura e declividade dos taludes laterais das brechas devem ser adequadamente representativos para que se possa obter um hidrograma de ruptura (forma, volume e vazão de pico) o mais próximo possível daquele que ocorreria em caso de uma ruptura real de uma estrutura qualquer em estudo. Quanto mais fidedigna esta representação, mais próximas às reais serão as consequências determinadas, criando condições para uma resposta à emergência mais adequada.

Esta pesquisa determina os parâmetros de formação de brecha da ruptura hipotética especificamente para o caso de reservatórios em cascata. Para que possam ser determinados estes parâmetros, a metodologia utiliza modelos reduzidos, procurando representar duas barragens próximas, baseados em barragens existentes, para determinar os hidrogramas resultantes de cada barramento após os eventos de ruptura simulados. A partir dos parâmetros obtidos procede-se à simulação em programa de modelagem hidrológica para obter hidrogramas representativos das rupturas, segundo os resultados dos parâmetros de brecha desta pesquisa, considerando os reservatórios em cascata e, para efeito comparativo, procede-se a mesma simulação com parâmetros de brechas de outras pesquisas já realizadas *e.g.* MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990) e principalmente Froehlich (1987, 1995, 2008).

Em seguida, os hidrogramas de ruptura obtidos foram propagados em programa de modelagem hidráulica computacional bidimensional, para obter as respectivas manchas de inundação. Por meio de análise dos parâmetros destas manchas de inundação, profundidade, tensão de arraste, risco hidrodinâmico e velocidade de escoamento, realizou-se uma análise das discrepâncias entre os parâmetros de brecha estimados conforme as diversas metodologias estudadas. Os resultados indicaram um tempo de formação 30% menor e uma brecha 40% mais larga para a barragem de jusante. Para os testes foi desenvolvido um material sintético padronizado, para substituir os solos.

Palavras-chave: Ruptura de barragens em cascata, equação de brecha, tempo de formação de brecha, modelos reduzidos.

## ABSTRACT

Environmental, economic and social consequences of a dam break are catastrophic. Geometric and breach formation parameters, such as formation time, breach width, breach height and breach lateral slope must be adequately estimated to obtain a rupture hydrograph (duration, shape, volume and peak flow) closest to that one which would occur in case of a real rupture. Therefore, dimensional evaluations are required to properly reproduce breach formation mechanisms adequately. By increasing the representativeness of the consequences estimated, the effectiveness of the respective emergency plan is also increased, reducing associated risks.

This research evaluates the hypothetical breach formation parameters specifically for reservoirs which fail in cascade. To determine these parameters, the methodology uses reduced models to simulate the failure of two sequential dams, based on existing dams, to determine the outcoming hydrographs. Outflow hydrographs were determined using hydrological modelling software, considering the breach parameters determined on the reduced model of the cascade reservoirs' failure. The same simulations were carried out with breach parameters from empirical methodologies available in the literature *e.g.* MacDonald and Langridge-Monopolis (1984), Von Thun and Gillette (1990) and Froehlich (1987, 1995, 2008).

These outflow hydrographs were used as input to a two-dimensional computational hydraulic model, from which the respective flood levels were obtained. By analysis of the parameters of these flood maps, depth, flow velocity, shear stress and hydrodynamic risk, the discrepancies between the breach parameters related to each methodology were evaluated. Results indicated a reduction of 30% on breach formation time and a 40% widening on breach width for the downstream dam. For the tests a standardized synthetic material was developed, replacing the soils.

Keywords: Cascade dam break, Breach equation, breach formation time, physical models.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1: Ruptura da barragem de Banqiao.....	26
Figura 4.2: Ruptura por galgamento da UHE Euclides da Cunha.....	27
Figura 4.3: Ruptura da UHE Armando Sales de Oliveira após o galgamento, em 20/01/1977. .....	28
Figura 4.4: Imagem aérea da Barragem do Fundão.....	28
Figura 4.5: Representações esquemáticas de três formas de modelos empíricos de formação de brecha.....	32
Figura 4.6: Parâmetros de formação de brecha.....	33
Figura 4.7: Adaptação dos parâmetros de formação de brecha para efeito cascata.....	34
Figura 4.8: Processos de erosão durante o teste de abertura (solo 1, aterro 1): (a) riachos e cascatas de pequenas quedas durante o estágio I em $t = 7$ min, (b) consolidação de pequenas quedas durante o estágio I em $t = 13$ min, (c) corte na crista a jusante, transição do estágio I para o estágio II em $t = t_1 \approx 16$ min, (d) corte na crista a montante, transição do estágio II para o estágio III em $t = t_2 \approx 16$ min, (e) fluxo através de brecha durante estágio III em $t = 40$ min, e (f) transição do estágio III para o estágio IV em $t = t_3 \approx 51$ min.....	37
Figura 4.9: Erosão do tipo côncava de corte pela crista.....	38
Figura 4.10: Processos de brecha.....	39
Figura 4.11: Configuração do teste; (a) vistas lateral e superior e sistemas de medição, (b) vista lateral do aterro com vista frontal ampliada da brecha de ruptura piloto do canal.....	40
Figura 4.12: Configuração do teste; (c) posição das sondas do tensiômetro (T1, T2, T3 e T4) para teste.....	40
Figura 4.13: Ilustração esquemática do modelo de cálculo para reservatórios em cascata.....	41
Figura 4.14: Correlação entre $\alpha$ e $H_p/H_o$ para os pontos 5 e 6.....	45
Figura 4.15: Ruptura de barragens por corrida de solo em cascata. (a) Submergência da barragem de montante. (b) formação de brecha na barragem de montante e propagação da cheia. (c) formação de brecha na barragem de jusante (d) Restos dos barramentos após ruptura.....	48
Figura 4.16: Adoção de ruptura pelo método de formação de brecha DABA: (a) Seção Transversal; (b) Perfil Longitudinal.....	49
Figura 4.17: Modificações do modelo DABA. (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal. ...	53
Figura 4.18: Hidrogramas de rupturas em brechas individuais de cada uma das três barragens avaliadas.....	54
Figura 4.19: Taxa de vazão de saída por brechas individuais de cada uma das três rupturas de barragem.....	55
Figura 5.1: Fluxograma para avaliação da ocorrência da ruptura em cascata.....	62
Figura 5.2: Parcelas volumétricas envolvidas em ruptura de barragem.....	66
Figura 5.3: Previsão de processo de formação de brechas em barragens sequenciais.....	68
Figura 5.4: Fatores de energia envolvidos nas formações de brecha.....	70
Figura 5.5: Arranjo esquemático para determinação de taxa de erosão.....	75
Figura 5.6: Processo de simulação da taxa de erosão (CAMPOS <i>et al.</i> , 2018a).....	79
Figura 5.7: Curva granulométrica da borracha – sem cimento.....	80
Figura 5.8: Curva granulométrica da mistura borracha e cimento (5% em massa).....	81
Figura 5.9: Curva granulométrica da borracha e cimento (10% em massa).....	81
Figura 5.10: Canal utilizado para ruptura de modelos reduzidos de barramentos em cascata. .....	83
Figura 5.11: Modelos de barragens em cascata preparados no canal.....	85
Figura 5.12: Scanner a laser Kinect II com câmera RGB, sensor IR e Iluminador infravermelho. .....	86
Figura 5.13: Tendência de precisão com alcance para Kinect I e Kinect II.....	87

Figura 5.14: Curva de variação da vazão com a frequência do inversor. ....	89
Figura 5.15: Tempos de início e de formação de brecha. ....	91
Figura 6.1: Vista panorâmica das barragens. ....	92
Figura 6.2: Esquemático de arranjo dos ensaios das barragens em cascata. ....	95
Figura 7.1: Etapas características (a, b, c e d) do ensaio de erosão no <i>EFA</i> . ....	97
Figura 7.2: Desprendimento do material por vórtice com deslocamento vertical das partículas. ....	97
Figura 7.3: Regressão logarítmica e correlação para todos os ensaios (unidade dos valores nos rótulos em m <sup>3</sup> /h – CAMPOS <i>et al.</i> 2018a). ....	102
Figura 7.4: Regressão logarítmica e correlação para ensaios tipo adensado (CAMPOS <i>et al.</i> 2018a). ....	102
Figura 7.5: Regressão logarítmica e correlação para ensaios tipo compactado 1 kg (CAMPOS <i>et al.</i> 2018a). ....	103
Figura 7.6: Análise da erodibilidade por velocidade de escoamento. ....	104
Figura 7.7: Taxas de erosão adimensionalizada em função da taxa de cimento na MBCA. ....	104
Figura 7.8: Perfil longitudinal modelo HEC-RAS unidimensional. ....	105
Figura 7.9: Perspectiva do modelo HEC-RAS unidimensional. ....	106
Figura 7.10: Resultado do modelo HEC-RAS com dados do cenário I P. ....	106
Figura 7.11: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I P. ....	172
Figura 7.12: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I P. ....	172
Figura 7.13: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I P. ....	173
Figura 7.14: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II P. ....	174
Figura 7.15: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II P. ....	174
Figura 7.16: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II P. ....	175
Figura 7.17: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I Teste 1. ....	176
Figura 7.18: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I Teste 1. ....	176
Figura 7.19: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I Teste 1. ....	177
Figura 7.20: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I Teste 2. ....	178
Figura 7.21: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I Teste 2. ....	179
Figura 7.22: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I Teste 2. ....	179
Figura 7.23: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I Teste 3. ....	180
Figura 7.24: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I Teste 3. ....	180
Figura 7.25: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I Teste 3. ....	181
Figura 7.26: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II Teste 1. ....	182
Figura 7.27: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II Teste 1. ....	182
Figura 7.28: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II Teste 1. ....	183
Figura 7.29: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II Teste 2. ....	184
Figura 7.30: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II Teste 2. ....	184
Figura 7.31: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II Teste 2. ....	185
Figura 7.32: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II Teste 3. ....	186
Figura 7.33: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II Teste 3. ....	186
Figura 7.34: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II Teste 3. ....	187

Figura 7.35: Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário III Teste 1. ....	188
Figura 7.36: Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário III Teste 1. ....	188
Figura 7.37: Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário III Teste 1. ....	189
Figura 8.1: Razão PFB por razão entre as larguras das brechas. ....	195
Figura 8.2: Razão PFB por razão entre TF2. ....	196
Figura 8.3: Razão PFB por médias das razões entre larguras. ....	197
Figura 8.4: Áreas de drenagem e reservatórios das barragens de montante e jusante. ....	200
Figura 8.5: Comparação de hidrogramas de metodologias com adaptação segundo Froehlich (2008). ....	202
Figura 8.6: Hidrogramas para comparação de metodologias com adaptação segundo Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984). ....	202
Figura 8.7: Modelo HEC-RAS bidimensional da área vulnerável a jusante das barragens. ....	203
Figura 8.8: Diferença de profundidade. ....	205
Figura 8.9: Diferença de velocidade. ....	206
Figura 8.10: Diferença de tensão de arraste. ....	207
Figura 8.11: Diferença de risco hidrodinâmico. ....	208

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1- Guia para a seleção do método empírico apropriado para estimativa dos parâmetros de brecha (adaptado de <i>Colorado Dam Safety Branch</i> , 2010). .....	35
Tabela 4.2- Parâmetros de brecha para as três barragens avaliadas (Adaptado de Shi <i>et al.</i> , 2015). .....	54
Tabela 4.3- Parâmetros para barragem de corrida de terra em cascata (Adaptado de Shi <i>et al.</i> , 2015).....	55
Tabela 5.1- Ensaio de granulometria do granulado de borracha.....	80
Tabela 5.2- Faixa de vazões simuladas e faixa de vazões para o modelo reduzido. ....	88
Tabela 5.3- Variação da vazão com a frequência e com a potência. ....	89
Tabela 6.1- Dados característicos das barragens modeladas.....	93
Tabela 6.2- Cenários preliminares para aperfeiçoamento da metodologia.....	94
Tabela 6.3- Cenários definitivos para avaliação da brecha em cascata. ....	94
Tabela 6.4- Valores de $h_1$ , $h_1''$ , $h_2$ e $h_2''$ (conforme Figura 6.2). ....	95
Tabela 7.1- Dados dos CPs registrados antes dos ensaios. ....	98
Tabela 7.2- Resultados dos ensaios dos CPs.....	100
Tabela 7.3- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I P – Barragem de montante.....	108
Tabela 7.4- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I P – Barragem de jusante. ....	111
Tabela 7.5- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II P – Barragem de montante.....	114
Tabela 7.6- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II P – Barragem de jusante. ....	119
Tabela 7.7- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 1 – Barragem de montante.....	124
Tabela 7.8- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 1 – Barragem de jusante.....	128
Tabela 7.9- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 2 – Barragem de montante.....	132
Tabela 7.10- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 2 – Barragem de jusante.....	136
Tabela 7.11- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 3 – Barragem de montante.....	139
Tabela 7.12- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 3 – Barragem de jusante.....	142
Tabela 7.13- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 1 – Barragem de montante.....	145
Tabela 7.14- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 1 – Barragem de jusante.....	149
Tabela 7.15- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 2 – Barragem de montante.....	152
Tabela 7.16- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 2 – Barragem de jusante.....	154
Tabela 7.17- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 3 – Barragem de montante.....	158
Tabela 7.18- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 3 – Barragem de jusante.....	162
Tabela 7.19- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário III Teste 1 – Barragem de montante.....	166

Tabela 7.20- Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário III Teste 1 – Barragem de jusante.....	169
Tabela 8.1- Médias comparativas de erodibilidade entre tipos de ensaio por faixa de vazão. ....	191
Tabela 8.2- Análise numérica dos Cenários I P e II P. ....	193
Tabela 8.3- Análise numérica dos Cenários I e II. ....	193
Tabela 8.4- Continuação análise numérica dos Cenários I e II. ....	194
Tabela 8.5- Análise numérica do Cenário III. ....	194
Tabela 8.6- Continuação análise numérica do Cenário III. ....	194
Tabela 8.7- Resultados das geometrias dos taludes laterais das brechas de montante e de jusante para os Cenários I e II (testes 1, 2 e 3).....	198
Tabela 8.8- Dados de brecha adaptados para a barragem de jusante. ....	200
Tabela 8.9- Condições de contorno do modelo HEC-RAS bidimensional. ....	204
Tabela 8.10- Dados das estações fluviométricas utilizadas na regionalização. ....	204

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A, A <sub>s</sub>	Área da superfície de um lago
A <sub>b</sub>	Área da brecha
APA	Área de Proteção Ambiental
ANM	Agência Nacional de Mineração
B	Largura transversal
$\bar{B}$	Largura média de brecha
CMP	Cheia Máxima Provável
CP	Corpo de Prova
CPH	Centro de Pesquisas Hidráulicas
D <sub>10</sub>	Diâmetro da partícula que delimita 10% da amostra em massa
D <sub>50</sub>	Diâmetro da partícula que delimita 50% da amostra em massa
D <sub>90</sub>	Diâmetro da partícula que delimita 90% da amostra em massa
DABA	<i>Dam Breaching Model</i>
E	Taxa de erosão
E	Energia específica total
E <sub>c</sub>	Energia de compactação
EFA	<i>Erosion Function Apparatus</i>
f	Fator de atrito obtido do ábaco de Moody
GIS/SIG	Sistema de Informações Geográficas
H	Elevação da superfície da água, profundidade instantânea
h	Altura dos corpos de prova, tempo em horas
h'	Altura não ocupada pela MBCA no corpo de prova
H:V	Relação entre as dimensões horizontais e verticais de taludes
H1 e H2	Profundidade no reservatório de jusante (H2) e a profundidade no reservatório de montante (H1). Altura do modelo da barragem de montante (H1) e de jusante (H2)
h <sub>1'</sub> , h <sub>1''</sub> , h <sub>2'</sub> e h <sub>2''</sub>	Alturas dos lastros, que representam os terrenos naturais sob os maciços dos modelos reduzidos das barragens, de montante e de jusante, respectivamente

$H_b, H_w$	Altura da barragem
$h_e'$	Perda de carga por atrito
HEC	<i>Hydrologic Engineering Center</i>
$h_e$	Somatório de $h_e'$ , $h_{ee}$ e $h_{et}$
$h_{ee}$	Perda de energia (ou de carga) pelo processo erosivo
$h_{et}$	Perda de energia por turbulência entre as partículas líquidas e sólidas
$H_p/H_o$	Variação do nível de água de vazão de pico em função do nível de água inicial
$h_r$	Fator de escala para a profundidade
$H_T$	Energia total em m.c.a. entre dois barramentos
$H_{wm}, H_{wj}$	Alturas em relação aos NAs das barragens de montante e de jusante
$h_1$	Termo de forma hidrostática
IEF	Instituto Estadual de Florestas
$K_d$	Coefficiente de erodibilidade
$k_o$	Fator de forma de ruptura
<i>Lag-time</i>	60 % do tempo de concentração
$L_r$	Fator de escala, aplicável aos modelos reduzidos
$L^*$	Distância de Segurança
$M$	Massa do soquete
MBCA	Mistura Borracha Água Cimento
N.A.	Nível de Água
$N_c$	Número de camadas
$N_g$	Número de golpes por camada
$n$	Rotação de uma bomba
PFB	Parâmetro de Formação de Brecha
PMP	Precipitação Máxima Provável
$Q$	Vazão específica, ou vazão total
$Q_b$	Vazão de saída pela brecha

$Q_{in}$	Vazão de entrada
$Q_l$	Vazão de saída à esquerda da brecha
$Q_m, Q_p$	Vazão no modelo e no protótipo
$Q_{out}$	Vazão de saída
$Q_r$	Vazão de saída à direita da brecha, Fator de escala de vazão entre modelo e protótipo
$Q_t$	Vazão total de saída
$Re$	Número de Reynolds
$R_h$	Raio Hidráulico
$S$	Declividade da linha de energia
$S'_a$	Área de superfície ajustada
$S_a$	Área da superfície do reservatório de jusante
SEMAD	Secretaria de Estado de Meio-Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
$S_f$	Declividade da superfície líquida
$SI$	<i>Storage Intensity</i> , ou Intensidade de Armazenamento
$SPH$	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
$S_o$	Declividade da calha local
$t$	Tempo (variável), em segundos, minutos ou horas
$t_f$	Tempo de formação de brecha
TF1	Tempo do início da brecha do experimento
TF2	Tempo de formação da brecha do experimento
TS	Fonte ou saída
UHE	Usina Hidrelétrica
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
UTM	Sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator, sistema de coordenadas cartesianas bidimensional
$V$	Velocidade média na seção
$V$	Volume do solo compactado
$V_w$	Volume da barragem

$V_{wm}$ e $V_{wj}$	Volumes das barragens em relação aos NAs de montante e de jusante
$V_{wus}$	Volume liberado da falha de todas as barragens a montante
$W_b$	Largura de fundo da brecha
WGS 84	<i>World Geodetic System 84</i> , sistema geodético mundial
$W_r$	Fator de escala para a largura
$x$	Distância na direção deste eixo, direção longitudinal
$x_r$	Fator de escala para o comprimento
$Z$	Elevação do fundo de brecha
$Z$	Profundidade de leitura do escâner
$\dot{z}$	Taxa de erosão média
$\alpha$	Correlação profundidade no reservatório de jusante (H2) e a profundidade no reservatório de montante (H1), ou, ângulo da inclinação lateral
$\beta$	Parâmetro utilizado para avaliar a progressão da brecha
$\beta_f$	Ângulo crítico do paramento de jusante durante a formação de brecha
$\Delta ER$	Variação de Energia Residual
$\Delta L$	Distância entre as barragens
$\gamma_w$	Peso unitário da água
$\gamma_m$	Peso específico médio dos materiais retidos no reservatório, componentes do maciço da barragem e do volume de água liberados durante o evento de ruptura
$\eta$	Elevação da superfície livre
$\rho$	Massa específica da água
$\tau$	Tensão cisalhante na interface solo/água
$\tau_c$	Tensão cisalhante crítica para início de erosão do solo
#	Abertura da malha
(E)	Coordenada Este
(S)	Coordenada Sul
3D	Sistema de escaneamento em três dimensões

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	10
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....	15
SUMÁRIO .....	19
1 INTRODUÇÃO .....	20
2 JUSTIFICATIVAS .....	23
3 OBJETIVOS .....	25
3.1 OBJETIVO GERAL.....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
4 REVISÃO DA LITERATURA .....	26
4.1 EVENTOS HISTÓRICOS DE ROMPIMENTOS EM CASCATA .....	26
4.2 MODOS DE FALHA DAS BARRAGENS E SUAS CAUSAS .....	29
4.2.1 Galgamento.....	29
4.2.2 Galgamento em Cascata (Cascade Overtopping) .....	30
4.2.3 Demais modos de falha.....	30
4.3 IDEALIZAÇÃO MATEMÁTICA DA FORMAÇÃO DE BRECHAS .....	31
4.4 COMPARAÇÃO COM EQUAÇÃO DE BRECHA PARA BARRAGEM ISOLADA .....	33
4.5 MODELOS REDUZIDOS PARA RUPTURA DE BARRAGENS .....	36
4.6 ABORDAGEM CONCEITUAL SOBRE O MATERIAL COMPONENTE DOS MODELOS REDUZIDOS .....	42
4.7 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA GERAÇÃO DE HIDROGRAMAS .....	44
4.8 ESTUDOS SOBRE RUPTURA EM CASCATA .....	44
5 METODOLOGIA .....	62
5.1 ETAPAS METODOLÓGICAS PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DE OCORRÊNCIA DE RUPTURA EM CASCATA 62	
5.2 REPRESENTAÇÃO PARA RUPTURA POR BRECHA EM CASCATA.....	65
5.3 DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA FORMAÇÃO DA BRECHA NA BARRAGEM DE JUSANTE .....	69

5.4	MATERIAL UTILIZADO - MBCA .....	74
5.4.1	Granulometria da MBCA .....	80
5.4.2	Energia de compactação da MBCA.....	82
5.5	SIMULAÇÕES DO MODELO REDUZIDO EM LABORATÓRIO .....	83
5.6	ANÁLISES A PARTIR DOS PARÂMETROS DAS BRECHAS .....	85
5.6.1	Levantamento 3D das geometrias dos modelos.....	86
5.6.2	Fatores escalares .....	87
5.6.3	Filmagem e análise temporal de formação das brechas.....	91
6	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE RUPTURA EM CASCATA .....	92
6.1	CARACTERIZAÇÃO DAS BARRAGENS .....	92
6.2	CENÁRIOS DE ANÁLISE .....	93
7	RESULTADOS .....	96
7.1	MATERIAL COMPONENTE DOS MACIÇOS - MBCA.....	96
7.2	SIMULAÇÕES DE RUPTURA DE BARRAGENS EM CASCATA .....	105
7.2.1	Avaliação em modelo unidimensional – HEC-RAS.....	105
7.2.2	Tempo de formação da brecha.....	107
7.2.3	Análise da geometria da brecha.....	171
8	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	190
8.1	MATERIAL UTILIZADO - MBCA.....	190
8.2	PARÂMETROS DE FORMAÇÃO DE BRECHA EM CASCATA .....	191
8.3	APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMAÇÃO DE BRECHA EM CASCATA.....	199
8.4	AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS HIDRÁULICAS EM ESCALA DOS PROTÓTIPOS .....	203
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	209
10	REFERÊNCIAS.....	214
	APÊNDICES .....	222
	APÊNDICE I – RESULTADOS DOS ENSAIOS COM A MBCA PROCEDIDOS NO CPH/UFMG .....	223

# 1 INTRODUÇÃO

O cenário contemporâneo desta pesquisa é determinante para seu desenvolvimento. O rompimento da barragem de Fundão, localizada no subdistrito de Bento Rodrigues, a 35 km da cidade de Mariana/MG, ocorreu na tarde de 5 de novembro de 2015. Essa ruptura provocou a liberação de rejeitos de minério de ferro para os trechos de jusante.

O rompimento da barragem de Fundão, até publicação desta pesquisa, é considerado o maior desastre antrópico de impacto ambiental da história brasileira, e o maior do mundo envolvendo barragens de rejeitos, com um volume total despejado de 32 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro (MACHADO, 2017). A lama alcançou o rio Doce, cuja bacia hidrográfica abrange 230 municípios dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, muitos dos quais se abastecem com a água do rio. O desastre teve impacto no ecossistema do rio Doce, atingindo o Oceano Atlântico, no estado do Espírito Santo, devastou o vilarejo de Bento Rodrigues e matou 19 pessoas. O somatório do impacto financeiro desta devastação é da ordem de bilhões de dólares.

A ruptura da barragem Fundão provocou uma mudança de paradigma na segurança de barragens no Brasil. Se por um lado o arcabouço legal vinha se estruturando desde 2010, com a entrada em vigor da Lei 12.433 (BRASIL, 2010), conhecida como Lei de Segurança de Barragens, por outro lado as consequências da ruptura evidenciaram a necessidade de implantação rigorosa das auditorias de segurança. Assim, diante das urgentes demandas para assegurar a estabilidade das demais barragens de contenção de rejeitos de minérios existentes no Brasil foram tomadas várias medidas de engenharia, principalmente as avaliações geotécnica, hidrológica e hidráulica destas barragens.

À época de apresentação desta pesquisa ocorreu a ruptura da barragem de rejeito B-I da Vale, em Brumadinho. Os dados, até o momento, consistentes para delimitar o evento, permitem contabilizar o acidente da barragem B-I com 259 mortes e cerca de 11 pessoas desaparecidas. Segundo filmagens, amplamente divulgadas, às 12:28:24 da sexta-feira 25/01/2019 a parte inferior do maciço começou a ceder, e levou a ruptura da barragem B-I, atingindo a área administrativa da Vale, localizada imediatamente a jusante da barragem, que, por ser hora do intervalo, estava repleta de funcionários.

Segundo nota de esclarecimento da Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais (SEMAD/MG, 2019), o Instituto Estadual de Florestas (IEF) divulgou a atualização dos dados da avaliação dos impactos dos rejeitos provenientes do rompimento da barragem B-I

sobre a área de vegetação do local. As análises foram feitas por meio de interpretação de imagens de satélite dos dias 18 de janeiro, data anterior ao rompimento, e dia 30 de janeiro, data posterior ao evento. A área total ocupada pelos rejeitos, que partiram da Barragem B-I pelo vale do córrego Ferro-Carvão até sua foz no rio Paraopeba foi de cerca de 292 ha. Deste total a área da vegetação impactada representa cerca de 150 ha. O IEF divulgou também a avaliação dos impactos dos rejeitos dentro de unidades de conservação. Na APA Sul, foram impactados 10,7 ha. Além disso, os rejeitos afetaram parte da zona de amortecimento do Parque Estadual da Serra do Rola Moça, totalizando cerca de 225 ha. Cabe lembrar que a causa da ruptura da barragem B-I em Brumadinho foi uma liquefação estática dos rejeitos (Robertson *et al.* 2019).

Assim, um aspecto importantíssimo na minimização das consequências da ruptura de barragens é o conhecimento prévio das áreas atingidas e tempos disponíveis para alerta e desocupação dessas áreas. Esse conhecimento é obtido a partir de estudos de ruptura hipotética, também conhecidos como estudos de *dam break*, em que são obtidos e propagados os hidrogramas de ruptura para determinar os níveis atingidos e tempos de alerta e desocupação associados na área a jusante.

Os hidrogramas de ruptura são função direta do volume e material armazenados nos reservatórios das barragens, bem como do tempo e da forma como são liberados. Numa ruptura, o maciço do barramento sofre um processo de abertura, dando passagem aos volumes armazenados, sendo essa abertura conhecida como brecha (*breach*). Conforme o tipo de barramento, essa brecha apresentará características distintas. Por exemplo, uma barragem de concreto pode apresentar brechas que se formam instantaneamente, por tombamento ou quebra, enquanto uma barragem de terra que rompe por galgamento terá seu maciço destruído num processo de erosão regressiva e instabilização (SALIBA, 2009), e essas características vão determinar a vazão de pico e a forma do hidrograma de ruptura. Diversos autores desenvolveram equações empíricas para determinação dos parâmetros geométricos e de formação da brecha de rupturas individuais de barragens. Trata-se de uma metodologia bem conhecida e descrita na literatura técnica, como as equações empíricas de Froehlich (1995), Von Thun e Gillette (1990), McDonald e Langridge-Monopolis (1984) ou do *Soil Conservation Service* (1985). Essas equações trazem consigo incertezas, pois foram ajustadas a partir de informações colhidas em relatos de observadores ou mesmo de retroanálises, para uma base de dados de ruptura de algumas dezenas de barragens de diversos tipos, com diferentes modos de falha.

Todavia, durante as verificações hidrológicas e hidráulicas de diversas barragens foi constatado que são escassas as pesquisas que definem os parâmetros de formação de brecha para a ruptura de barragens em cascata, ou mesmo quanto a qual a distância mínima necessária para que rupturas em cascata possam ser avaliadas individualmente.

Esta constatação motivou o desenvolvimento desta pesquisa, que procura delimitar, ao menos, alguns parâmetros e equações de formação de brecha aplicáveis para ruptura de barragens em cascata. Em 2017, Minas Gerais tinha 698 barragens (FEAM, 2017), muitas delas em cascata. Usinas hidrelétricas também são comumente construídas em cascata, devido à própria metodologia de otimização dos índices custo-benefício adotada nos estudos de partição de queda, como demonstrado em Filho (2003).

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados modelos reduzidos, para determinar os parâmetros de formação de brecha para o caso de ruptura de barragens em cascata, permitindo obter os hidrogramas de ruptura, adotados para o estudo de caso, com posterior geração de mancha de inundação, a qual foi utilizada para avaliação estatística e comparações com manchas de inundação obtidas com a utilização dos métodos empíricos supracitadas para determinação dos parâmetros das brechas.

Este texto está organizado em dez capítulos, desenvolvidos com a seguinte organização e conteúdo, de forma sequencial; este capítulo introdutório em que se contextualiza a pesquisa. Justificativas consubstanciando o propósito e finalidade do trabalho. Objetivos a serem investigados para delimitação da hipótese estudada. Revisão da literatura para identificar os aspectos já estudados e linhas de ação sobre o tema em pesquisa. Metodologia empregada para a obtenção de resultados que permitam concluir sobre a hipótese delimitada pelos objetivos. Aplicação do método proposto no estudo de ruptura de duas barragens em cascata. O capítulo seguinte aborda sequencialmente os resultados encontrados. Análise e discussão dos resultados obtidos por execução dos testes e avaliações propostos na metodologia para confirmar (ou não) a hipótese principal, com as devidas ressalvas. Conclusões e recomendações, identificando as principais aplicações e limitações da metodologia para avaliar a ruptura em cascata e sugestões para outras pesquisas. Finalmente, as referências utilizadas.

## 2 JUSTIFICATIVAS

A humanidade, para desenvolver-se, verificou ser necessária a regularização do regime fluvial das águas para a garantia do abastecimento, e para habitar planícies alagáveis viu-se forçada a proceder às obras de contenção de cheias. Frente a estas necessidades surgiram as obras de engenharia de barramento de cursos de água ou, barragens. Atualmente, diversas são as finalidades das barragens, podendo-se citar as principais; reservação de água para fins industriais ou de abastecimento, geração de energia elétrica, disposição de rejeitos, controle de inundações, irrigação, ou ainda de usos múltiplos. Assim, segundo Baptista e Coelho (2010), barragens são obras hidráulicas destinadas a efetuar o represamento de um curso d'água, objetivando a utilização mais racional dos recursos hídricos.

Segundo cadastro da ANA (2016) o Brasil possuía 17.259 barragens, sendo que estas barragens atendem a pelo menos um dos critérios de classificação de risco e dano potencial associado, como; altura mínima de 15,0 m, volume mínimo de 3,0 hm<sup>3</sup>, dano potencial associado médio ou alto. Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), dano potencial “[...] é o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais” (SNISB, 2019). Devido às condições adversas e danosas que estas obras hidráulicas podem causar, no caso de uma ruptura do barramento, é imprescindível o conhecimento prévio das áreas atingidas e mesmo se estas podem conduzir a ocorrência da ruptura em cascata das barragens localizadas a jusante.

Assim, a elaboração do estudo de ruptura permite delimitar as áreas afetadas pela onda de ruptura, sendo que as manchas de inundações obtidas possibilitam elaborar planos de evacuação e estimar os prejuízos. Dentro do contexto do estudo de ruptura da barragem é necessária a determinação de um hidrograma de ruptura, que é consequência direta do modo de falha mais provável do barramento. Desta forma, quando é prevista a ocorrência de falha por galgamento, é necessário determinar os parâmetros de formação de brecha baseados neste tipo de ocorrência. Para esta pesquisa, especificamente, foi elaborada a hipótese de ocorrência de galgamento em cascata, ou seja, a formação de uma brecha em uma barragem devido à chegada da onda de cheia de uma ruptura de outra barragem localizada a montante.

A relevância desta pesquisa se destaca por não haver outros estudos ou pesquisas que, até o momento, se dedicaram a determinar os parâmetros que representem, de forma satisfatória,

equações e parâmetros para representar as brechas por evento de ruptura hipotética em barragens dispostas sequencialmente, notadamente para a descrição dos parâmetros e equações para a barragem de jusante.

Equações empíricas são tradicionalmente utilizadas para determinar os parâmetros de brecha decorrentes de ruptura de barragens (MACDONALD E LANGRIDGE-MONOPOLIS, 1984, VON THUN E GILLETTE 1990, FROEHLICH, 1987, 1995, 2008). No entanto, são formulações que utilizam informações estimadas, abrangendo barragens compostas por diversos materiais, a partir da análise de uma base de dados estimados das rupturas.

Poucos trabalhos estão disponíveis para avaliação de ruptura de barragens dispostas em cascata. Dewals *et al.* (2010) apresentaram um procedimento para avaliar a análise dos prejuízos para reservatórios em série baseados em propagação de vazões. O método apresenta dois modelos incorporados, sendo o primeiro para propagar as vazões em ambiente bidimensional e o segundo para representar a formação da brecha por meio de um modelo topográfico com superfície variável no tempo, que representa a gradual formação da brecha. Avaliam-se quatro reservatórios a jusante do primeiro, sendo somente um com possibilidade de formar brecha, com maciço em enrocamento.

Devido a esta composição os próprios autores afirmam a necessidade de outras pesquisas para descrever os parâmetros efetivos de formação de brecha para este caso, sendo os parâmetros de formação da brecha utilizados naquela pesquisa baseados em pesquisas anteriores como MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990), e Froehlich (1987, 1995).

Memos *et al.* (2006) procederam uma pesquisa similar, porém utilizaram os softwares NWS BREACH e DAMBRK para retratar os parâmetros de formação da brecha.

Nestes trabalhos identificam-se procedimentos para representação da propagação em série de eventos de ruptura, porém sem aprofundamento na determinação dos parâmetros mais adequados e representativos para as brechas que podem se formar nas barragens a jusante de um primeiro evento de ruptura, afetadas pela chegada da onda de cheia de uma ruptura de uma barragem a montante e, desta forma, em condições distintas daquelas para as quais as equações empíricas comumente adotadas foram determinadas. Portanto, a presente pesquisa constitui uma contribuição original e com potencial para gerar resultados práticos para a engenharia de barragens e com finalidades acadêmicas diversas.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 *Objetivo Geral***

O objetivo geral desta pesquisa é a proposição de uma metodologia para estudar a ruptura de barragens em cascata, com obtenção de ajustes das equações e parâmetros representativos da formação de brechas nesta condição.

### **3.2 *Objetivos Específicos***

Para cumprir este objetivo geral identificam-se os objetivos específicos seguintes:

- Desenvolvimento de um material padrão para substituição dos solos nos modelos reduzidos (Mistura granulado Borracha Cimento e Água - MBCA);
- Desenvolvimento dos modelos reduzidos em laboratório, respeitadas as propriedades dos parâmetros escalares;
- Obtenção dos parâmetros obtidos para a geometria e tempo de formação da brecha para barramentos em cascata;
- Verificação da representatividade da geometria da brecha e seus parâmetros de formação em modelos hidrológicos e hidráulicos.

## 4 REVISÃO DA LITERATURA

### 4.1 *Eventos Históricos de Rompimentos em Cascata*

Ao longo da história humana recente alguns eventos de rupturas em cascata foram registrados e, com a finalidade de criar um contexto destes eventos, são aqui lembrados os principais casos.

A barragem Banqiao foi construída no início dos anos 50 no rio Ru, na prefeitura de Zhumadian, província de Henan, na China. Tratava-se de uma barragem zonada com um núcleo central de argila, com uma altura máxima de 118 m e uma capacidade de armazenamento de 492 milhões de m<sup>3</sup>. A estrutura falhou devido a um galgamento (*overtopping*), durante o Tufão Nina, em 8 de agosto de 1.975 (XU *et al.* 2007). A barragem Banqiao foi supostamente construída para resistir a uma cheia de 1.000 anos de período de retorno, e depois que trincas apareceram no início dos anos 50, a barragem foi reforçada. Mas em agosto de 1.975, 1.060 mm de chuva caíram em 24 horas, como resultado de um evento climático anormal (Tufão Nina), e a barragem de Shimantan, a montante de Banqiao, rompeu. Quando a onda de cheia resultante chegou a Banqiao, esta também rompeu, liberando uma inundação que provocou a ruptura de pelo menos outras 62 barragens, basicamente destruindo toda a infraestrutura da qual dependia toda a popula o e produ o agrícola daquela  rea. Estima-se que cerca de 30.000 pessoas que viviam nas aldeias a jusante morreram afogadas durante as várias horas de dura o do evento, e talvez cerca de 140.000 outras morreram de epidemias e fomes consequentes (HARRELL, 2013). A Figura 4.1 apresenta o cenário pós ruptura registrado.



**Figura 4.1:** Ruptura da barragem de Banqiao.

Fonte: Fish (2013).

Outro caso relativo a falhas sequenciais de barramentos em cascata foi o de Biescas, nos Pirineus Centrais da Espanha. Conforme Benito *et al.* (1998) ocorreram as falhas de vários barramentos em sequência, que eram utilizados para o controle de cheias, devido a precipitação extrema na região, causando 87 mortes. A vazão de pico no trecho principal chegou a 420 m<sup>3</sup>/s.

Um caso brasileiro de ruptura em cascata, como citado em Saliba (2009), ocorreu 19/01/1977, quando a UHE Euclides da Cunha sofreu galgamento próximo à ombreira direita da barragem, que apresentava desnível de cerca de 30 cm em relação a crista do maciço, sendo que este galgamento foi uma decorrência direta de uma precipitação de 260,0 mm nas 24 h precedentes ao evento. A UHE Euclides da Cunha encontra-se instalada no rio Pardo, a cerca de 6,0 km a jusante de São José do Rio Pardo, SP.

Segundo Carvalho (2007) o galgamento teve início às 20:30 do dia 19/01/1977, mas a ruptura propriamente dita somente ocorreu às 03:30 do dia 20/01/1977, com lâmina máxima de cerca de 1,20 m (POWLEDGE *et al.*, 1989). A Figura 4.2 apresenta o cenário após a ruptura da UHE Euclides da Cunha.



**Figura 4.2:** Ruptura por galgamento da UHE Euclides da Cunha.

Fonte: Saliba (2009).

A cheia resultante da ruptura levou cerca de meia hora para atingir a UHE Armando Sales de Oliveira, localizada a 6,0 km a jusante, cuja ruptura ocorreu às 04:00 do dia 20/01/1977, também com lâmina máxima de cerca de 1,20 m (POWLEDGE *et al.*, 1989). A Figura 4.3 apresenta a brecha aberta pelo galgamento, que apresentava taludes laterais bastante íngremes.



**Figura 4.3:** Ruptura da UHE Armando Sales de Oliveira após o galgamento, em 20/01/1977. Fonte: Saliba (2009).

Segundo Machado (2017) no dia 5 de novembro de 2015 ocorreu o acidente da Barragem de Fundão, em Mariana/MG. O acidente causou mortes, destruição do distrito de Bento Rodrigues e afetou outras áreas urbanas a jusante. Em torno de 680 km dos rios a jusante foram impactados pela deposição de rejeitos e pela pluma de turbidez, entre estes os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, chegando até a área costeira na foz do Rio Doce, na cidade de Linhares/ES (MACHADO, 2017). A Figura 4.4 apresenta uma imagem aérea da Barragem do Fundão, anterior à ruptura, onde observa-se a separação entre o rejeito arenoso e a lama (MORGENSTERN *et al.* 2016 *apud* MACHADO, 2017).



**Figura 4.4:** Imagem aérea da Barragem do Fundão. Fonte: Adaptado de Machado (2017).

Ainda segundo Machado (2017), após a ruptura da Barragem do Fundão, a Barragem de Santarém, concebida para abastecimento da unidade e para contenção de sedimentos, localizada imediatamente a jusante, sofreu galgamento. No entanto, a barragem de Santarém não entrou em processo completo de ruptura, resistindo à passagem da onda de ruptura de montante.

## **4.2 Modos de Falha das Barragens e Suas Causas**

Existem vários modos de falhas em rupturas de barragens, porém, nesta pesquisa, o foco de análise se concentra no modo de falha por Galgamento em Cascata (*Cascade Overtopping*). Contudo cabe ressaltar que os demais modos de falha, citados aqui, também podem levar a uma falha em cascata, para uma barragem localizada a jusante e, por isso, cabe uma delimitação destes possíveis modos de falhas.

### **4.2.1 Galgamento**

Segundo o *Colorado Dam Safety Branch* (2010) a definição para ruptura por Galgamento (*Overtopping*) é que este mecanismo tipicamente tem início com a passagem do líquido por cima da crista da barragem conduzindo ao corte e remoção do solo a partir do pé desta e ocorre o avanço em direção a crista da barragem (*headcut erosion*), conectando-se ao reservatório. Uma vez que o reservatório está conectado com a brecha em progresso ocorrem erosões no talude de jusante e nas partes laterais, até que a brecha alcance sua dimensão e forma finais.

O foco desta pesquisa é exatamente este tipo de modo de falha, considerando as sobreposições dos hidrogramas de rupturas de barragens em cascata.

Segundo MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) contribuem nesse processo também as bermas intermediárias, que podem provocar mudanças de regime de escoamento ao longo da descida da água pelo talude.

Após um corte descendente pela crista e com erosão suficientes, uma seção mais fraca toma forma no maciço. A barragem pode romper nesta seção fraca ou a descida da erosão pode continuar pelo maciço até a brecha atingir a base do maciço. Quando a brecha atinge o solo natural, que possui erodibilidade menor, e de grande extensão longitudinal, o processo é reduzido ou mesmo interrompido, a depender da erodibilidade do solo presente e das velocidades observadas.

Todavia, ao longo desse processo, também ocorrem rupturas de taludes por instabilização geotécnica, devido ao aumento do ângulo médio de face e das poropressões presentes (SALIBA, 2009). À continuidade das vazões subsequentes atacam os taludes da brecha e promovem seu alargamento lateralmente, até que, sejam alcançadas as ombreiras da barragem (terreno natural), ou o volume da barragem tenha sido esgotado.

#### **4.2.2 Galgamento em Cascata (*Cascade Overtopping*)**

O modo de falha por galgamento em cascata, como proposto por este autor, presume que ocorra a ruptura de uma, ou mais, barragens a montante, o que levaria a chegada de uma onda de cheia ao reservatório da barragem de jusante, e que, por hipótese, esta onda de cheia não seja completamente amortecida neste reservatório de jusante. Essa onda levaria a um processo de falha similar ao galgamento, porém com tempo de formação mais rápido, já que as condições de formação deste galgamento contam com uma parcela de energia residual no escoamento proveniente da falha da barragem de montante.

Pode-se afirmar que a principal diferença entre o galgamento simples para o galgamento em cascata são as condições iniciais do escoamento para formação de brecha. Enquanto no galgamento simples a passagem da água por cima da crista da barragem se fará a partir de condições iniciais de energia cinética menores, para o caso do galgamento em cascata estas condições são alteradas pela chegada da onda de ruptura da barragem de montante levando às condições de passagem por cima da crista da barragem com maiores velocidades de escoamento. Portanto, espera-se que esta condição de energia de escoamento maior na crista levará a velocidades de escoamento maiores ao longo do talude de jusante e no pé, portanto, acelerando e ampliando o processo de formação da brecha de ruptura.

#### **4.2.3 Demais modos de falha**

Outros possíveis modos de falha de maciços de solo compactado são problemas com a fundação, falhas estruturais, erosão de taludes por precipitação incidente, erosão interna ou *piping* e liquefação. Devido à relevância, apenas os dois últimos foram aqui descritos.

Segundo o McCook (2004 *apud* COLORADO DAM SAFETY BRANCH, 2010), de um ponto de vista rigorosamente técnico, define-se *piping* como infiltração intergranular que ocorre através do maciço do solo que possui caminhos de fluxos preferenciais. O *piping* também é chamado de erosão regressiva, pois a erosão ocorre tipicamente do lado de jusante para o lado

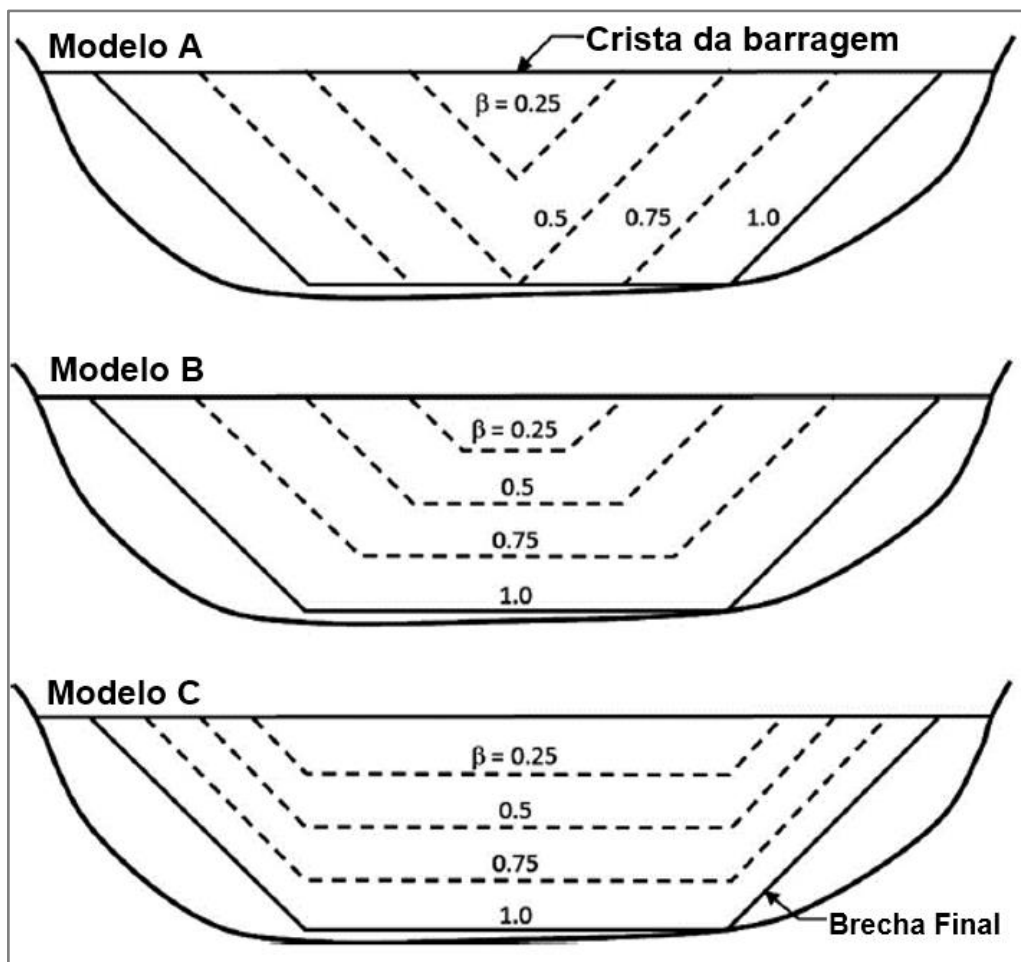
de montante. McCook (2004 *apud* COLORADO DAM SAFETY BRANCH, 2010) define *piping* como resultado da água fluindo através de defeitos ou trincas no maciço, na fundação, ou no contato entre o maciço e a fundação.

Define-se liquefação como um estado onde as condições não drenadas e a poropressão gerada por carregamentos cíclicos ou monotônicos (liquefação estática) pode reduzir à zero a tensão efetiva principal menor, com as partículas sólidas perdendo o contato entre si, conduzindo a um estado de suspensão no solo, que se comporta como líquido viscoso (ISHIHARA, 1977 *apud* RIBEIRO, 2015).

### **4.3 Idealização Matemática da Formação de Brechas**

A idealização de formação de brechas busca descrever os parâmetros geométricos da sua formação (largura, altura, inclinação do talude) e o seu tempo de formação, correlacionados a parâmetros que descrevam a magnitude do barramento e de seu reservatório (altura do barramento, volume armazenado), sendo ainda considerados fatores dependentes do modo de falha.

Segundo Froehlich (2008) três variações do modelo empírico de formação de brecha são comumente utilizados para avaliar as falhas de barragens, como demonstrados na Figura 4.5, pelos modelos A, B e C. Na Figura 4.5 o parâmetro  $\beta$  é utilizado para avaliar a progressão da brecha nos modelos A, B e C.



**Figura 4.5:** Representações esquemáticas de três formas de modelos empíricos de formação de brecha.

Fonte: Adaptado de Froehlich (2008).

Na Figura 4.5, cada um dos três modelos pressupõe que uma ruptura começa a se formar no topo de uma barragem e cresce com o tempo na forma de um triângulo ou com uma forma trapezoidal.

A geometria da brecha A é descrita em termos de altura, largura média, lado e inclinação da abertura trapezoidal final na barragem. As brechas que se desenvolvem inicialmente na forma de triângulos no modelo A, seguem com esta forma até a brecha atingir o fundo de sua menor elevação, começando então a expansão lateral, quando a brecha assume uma forma trapezoidal. Para o modelo B a largura da base com a forma trapezoidal aumenta linearmente à medida que a brecha se aprofunda, e a altura e a largura máximas ocorrem simultaneamente quando a brecha alcança o fundo. A largura inferior da brecha trapezoidal é considerada constante no modelo C.

Observações sobre as falhas de barragens de aterro e estudos experimentais sugerem que o desenvolvimento da brecha é melhor representado pelo modelo A (FROEHLICH, 2008).

#### 4.4 Comparação com Equação de Brecha para Barragem Isolada

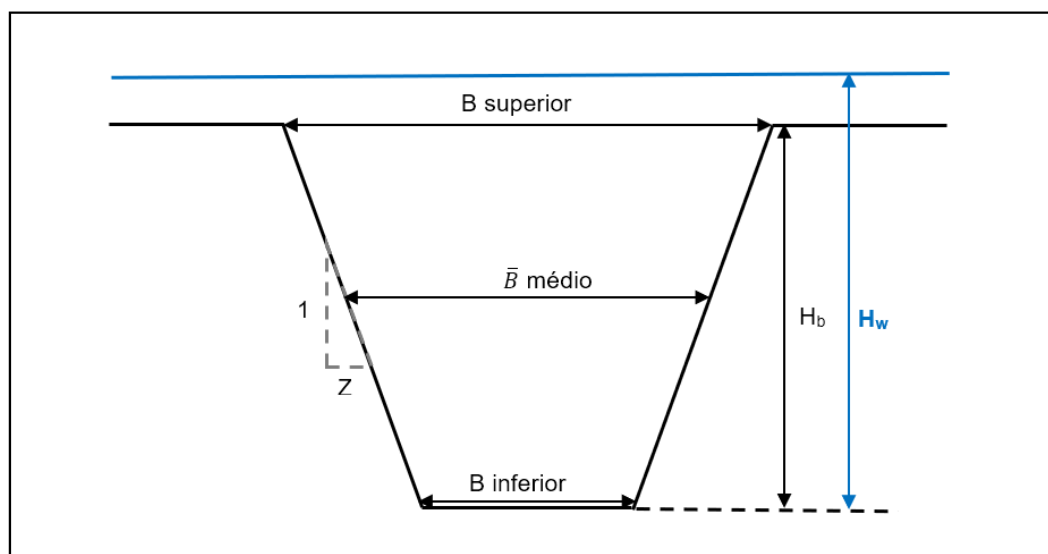
Para comparar os resultados desta pesquisa com uma das mais representativas equações de brechas foram adotadas as equações de Froehlich (2008), para determinar a largura média e o seu tempo de formação, sendo que estas equações foram baseadas na análise de uma regressão logarítmica de dados de rupturas de 74 barragens:

$$\bar{B} = 0,27 k_o V_W^{0,32} H^{0,04} \quad (4.1)$$

Na qual;

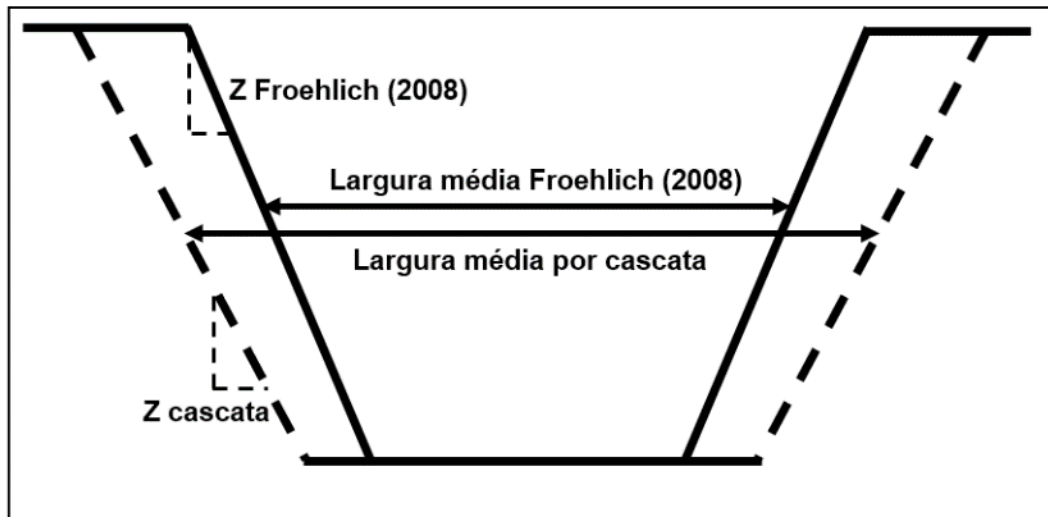
- $\bar{B}$  é a largura média da brecha (m);
- $k_o$  é o fator de forma de ruptura (adotado igual a 1,3 para galgamento ou 1,0 para *piping*);
- $V_W$  é o volume da barragem no momento da ruptura ( $m^3$ );
- $H$  é a altura da barragem (m).

A Figura 4.6 e a Figura 4.7 demonstram os parâmetros de brecha conforme proposto por Froehlich (2008) e as adaptações propostas pela metodologia em cascata utilizando a proposição de Froehlich (2008), respectivamente.



**Figura 4.6:** Parâmetros de formação de brecha.

Fonte: Adaptado de Froehlich (2008).



**Figura 4.7:** Adaptação dos parâmetros de formação de brecha para efeito cascata.

Froehlich (2008) sugere que a taxa de inclinação dos taludes laterais ( $z$ ) sejam ajustados conforme a relação a seguir:

$$z = \begin{cases} 1,0 & \text{para falhas por galgamento} \\ 0,7 & \text{para outros tipo de falhas} \end{cases} \quad (4.2)$$

A equação de tempo de formação de brecha de Froehlich (2008) é dada por:

$$t_f = 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{gH^2}} \quad (4.3)$$

Na qual  $t_f$  o tempo de formação (segundos).

Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) indicam que o tempo de formação de brecha adotado para qualquer simulação de ruptura de barragem de solo não deve ser inferior a 15 minutos. Este é um critério frequentemente adotado em simulações de ruptura realizadas no Brasil, cuja aplicabilidade ao caso de rupturas de barragens de solo compactado homogêneas será verificada nesta pesquisa, individualmente e em cascata.

Froehlich (2008) define o tempo de formação de brecha como o tempo necessário entre o início da brecha até que a mesma alcance sua máxima geometria, ou seja, até que a brecha alcance a fundação da barragem e sua largura esteja completamente desenvolvida.

O *Colorado Dam Safety Branch* (2010) apresenta um guia de seleção do método empírico apropriado para a definição dos parâmetros da brecha (Tabela 4.1), em função do tamanho e do *Storage Intensity* (SI), ou Intensidade de Armazenamento, das barragens:

$$SI = \frac{V_w}{H_w} \quad (4.4)$$

Na qual:

- $V_w$  é o volume da barragem ( $m^3$ );
- $H_w$  é a altura da barragem (m).

**Tabela 4.1-** Guia para a seleção do método empírico apropriado para estimativa dos parâmetros de brecha (adaptado de *Colorado Dam Safety Branch*, 2010).

Tamanho da barragem	Índice de armazenamento (SI)		
	Baixo ( $SI < 20.234 \text{ m}^3/\text{m}$ )	Médio ( $20.234 \text{ m}^3/\text{m} < SI < 80.937 \text{ m}^3/\text{m}$ )	Alto ( $SI > 80.937 \text{ m}^3/\text{m}$ )
Muito pequena	MacDonald e Langridge-Monopolis com Washington State para determinação do tempo de falha. Froehlich para galgamento.	MacDonald e Langridge-Monopolis com Washington State para determinação do tempo de falha. Froehlich para galgamento.	MacDonald e Langridge-Monopolis com Washington State para determinação do tempo de falha. Froehlich para galgamento.
Pequena	MacDonald e Langridge-Monopolis com Washington State para determinação do tempo de falha e possivelmente Froehlich (caso a caso). Froehlich para galgamento.	Froehlich e possivelmente MacDonald e Langridge-Monopolis com Washington State para determinação do tempo de falha. (caso a caso).	Froehlich para a geometria e tempo de falha.
Grande	Froehlich. A declividade lateral (Z) deve ser ajustada para produzir uma largura de fundo razoável.	Froehlich e possivelmente MacDonald e Langridge-Monopolis com Washington State para determinação do tempo de falha. (caso a caso).	Froehlich e possivelmente MacDonald e Langridge-Monopolis com Washington State para determinação do tempo de falha. (caso a caso).

Verifica-se na Tabela 4.1 que as barragens de montante e jusante que embasaram esta pesquisa, a serem apresentadas e detalhadas a seguir no item 6.1, podem ter a suas brechas descritas pelas equações propostas por Froehlich (2008), uma vez que ambas as barragens possuem alturas superiores a 15,0 m, ou seja, podem ser consideradas grandes, e *SI* médio e baixo, respectivamente. Este seria um caso típico que abrangeria um grande conjunto de barragens de mineração presentes em Minas Gerais, denominados diques de contenção de sedimentos.

#### **4.5 Modelos Reduzidos para Ruptura de Barragens**

Procedeu-se a uma verificação entre as mais recentes e mais relevantes pesquisas sobre estudos de formação de brecha em barragens procurando-se principalmente verificar se haviam estudos para o caso de rupturas em cascata. A seguir são descritas as principais pesquisas correlatas a esta, bem como, são levantados os pontos de similaridade e outras características que possam auxiliar para o esclarecimento do fenômeno aqui estudado.

Segundo Viseu *et al.* (2014), o uso de modelos físicos para modelar vazões de rupturas de barragens não é frequente, pois, a simulação em modelos físicos de rupturas de barragens ao longo de um vale a jusante pode facilmente implicar em modelos físicos com grandes dimensões, ou, ao escolher uma escala menor para evitar essa desvantagem, os efeitos de escala podem se tornar não desprezíveis.

Dentre as principais pesquisas que utilizaram modelos reduzidos para determinação da formação de brechas em barragens pode-se citar Hanson *et al.* (2005), que construíram três modelos de grande porte em aterros de solos coesivos de três tipos, compactados em camadas, sendo dois de 2,3 m de altura e um de 1,5 m de altura. Foram utilizados equipamentos e filmagem para verificar a evolução hidráulica, em estágios, o tempo de formação de brecha, vazões de pico, largura de brecha e descrições qualitativas da geometria.

Hanson *et al.* (2005) conseguiram ainda determinar taxas de crescimento nas formações das brechas na largura e na altura, em m/h. A justificativa do autor para desenvolver os modelos em larga escala em solos compactados foi que os eventos históricos de rupturas registrados não fornecem muitas informações sobre as taxas e os estágios de formação de brechas durante a expansão, durante os eventos de galgamento (Figura 4.8).

De forma similar a esta pesquisa, a metodologia de Hanson *et al.* (2005) procurou caracterizar o material utilizado para compor os barramentos dos modelos, porém, como utilizava solos,

estes foram classificados entre argila, silte e areia, e as faixas predominantes foram obtidas pelos limites de Atterberg, para classificar a plasticidade, e foram definidas as umidades ótimas e o grau de compactação. Assim, aqueles pesquisadores puderam concluir, com os resultados dos testes de galgamento, como certas propriedades do solo influenciam o tempo e as taxas durante os processos de erosão observados. As taxas de erosão em direção à crista e as taxas de alargamento da erosão na brecha, que variaram em três ordens de grandeza, mostram uma correlação direta com o teor de água utilizada para a compactação e com a textura do solo.



**Figura 4.8:** Processos de erosão durante o teste de abertura (solo 1, aterro 1): (a) riachos e cascatas de pequenas quedas durante o estágio I em  $t = 7$  min, (b) consolidação de pequenas quedas durante o estágio I em  $t = 13$  min, (c) corte na crista a jusante, transição do estágio I para o estágio II em  $t = t_1 \approx 16$  min, (d) corte na crista a montante, transição do estágio II para o estágio III em  $t = t_2 \approx 16$  min, (e) fluxo através de brecha durante estágio III em  $t = 40$  min, e (f) transição do estágio III para o estágio IV em  $t = t_3 \approx 51$  min.

Fonte: Hanson *et al.* (2005).

Hanson *et al.* (2005) ainda concluíram que embora o teor de água utilizada para a compactação esteja fortemente correlacionado com os processos de erosão observados, este é um parâmetro difícil de ser utilizado no desenvolvimento de um modelo de previsão física, porque este não possui uma base física inerente sobre a qual desenvolver uma equação matemática.

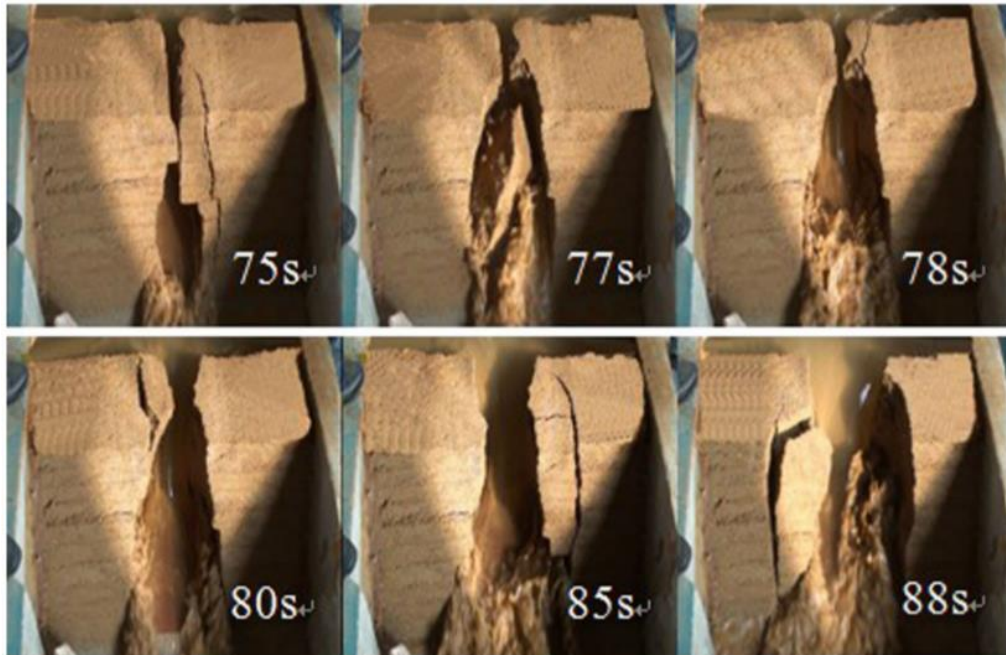
Luo *et al.* (2014) desenvolveram um sistema de circulação com reservatório, bombas, medidores de vazão e calhas para avaliar a ruptura de um maciço de material não coesivo sobre o efeito de galgamento, e caracterizaram o material durante seu preparo para o modelo reduzido da barragem como uma mistura de areia e argila. A areia tinha granulometria inferior a 2,0 mm, diâmetro mediano de partícula de 0,5 mm e mal graduada. A argila utilizada tinha limite de plasticidade igual a 23,0% e limite de liquidez igual a 43,0%, portanto, índice de plasticidade de 20,0%.

Os pesquisadores citados fizeram uma avaliação dos estágios de formação das brechas que ocorreram nos modelos reduzidos em material não coesivo, bem como uma avaliação quantitativa da forma, tempo de formação e tamanho das brechas (Figura 4.9 e Figura 4.10).



**Figura 4.9:** Erosão do tipo côncava de corte pela crista.

Fonte: LUO *et al.* (2014).



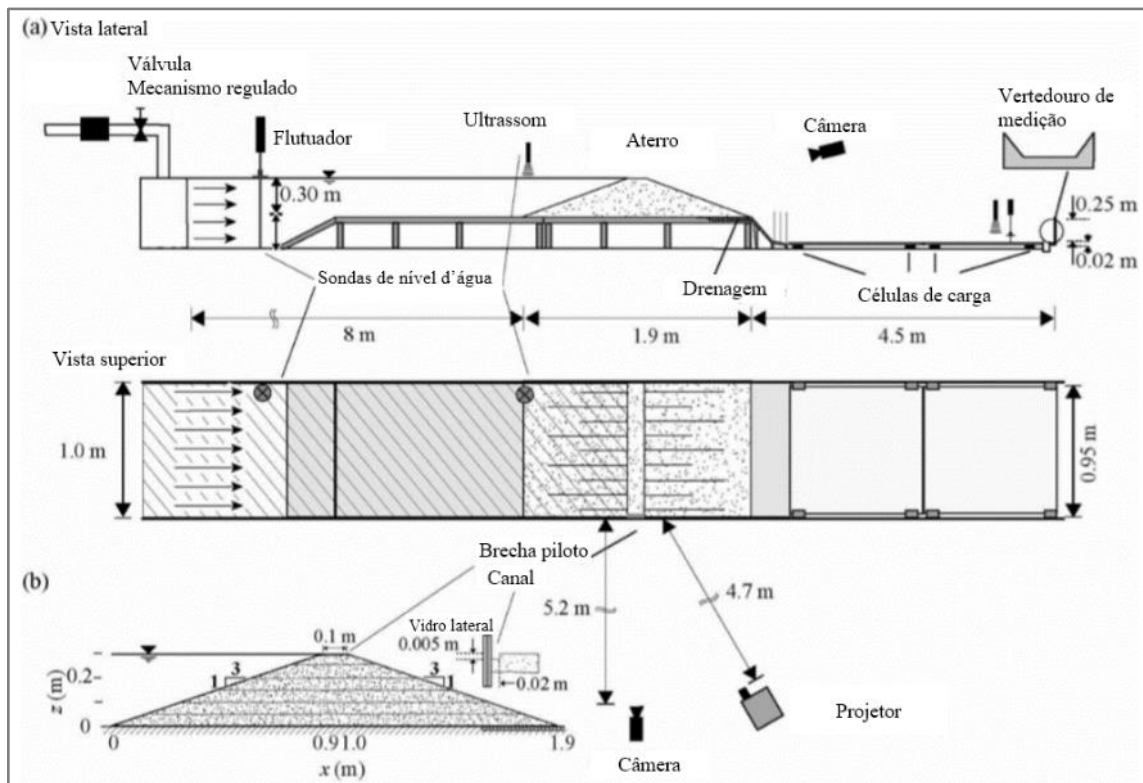
**Figura 4.10:** Processos de brecha.

Fonte: LUO *et al.* (2014).

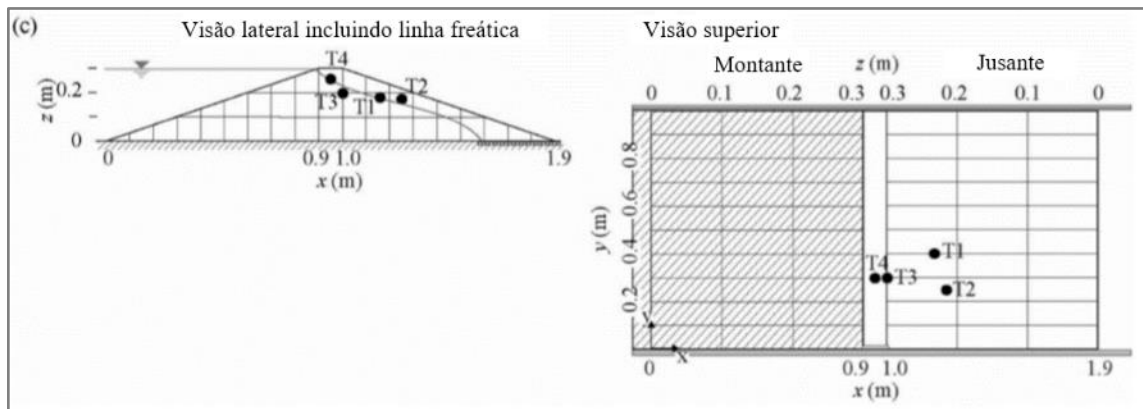
Luo *et al.* (2014) concluíram que a falha por galgamento em barragens coesas de solo-rocha homogênea pode ser dividida em três modos; modo de erosão na crista e ruptura por erosão; erosão de cisalhamento e ruptura por colapso; e erosão por cisalhamento devido à saturação.

Outra pesquisa dedicada a buscar a representatividade em modelos de laboratório para se avaliar a forma das brechas foi a desenvolvida por Pickert *et al.* (2011), a qual utilizou modelos reduzidos em laboratório de pesquisa do Instituto de Hidromecânica do Instituto de Tecnologia de Karlsruhe para obter dados experimentais sobre a ruptura em aterros homogêneos construídos em camadas. O modelo dos maciços era consistido de material homogêneo não coesivo sobre um leito fixo de uma calha de vidro.

O modelo foi instalado em uma calha de vidro com 14,4 m de comprimento, 1,0 m de largura e 0,70 m de profundidade, equipado com instrumentos para medir os níveis de água, vazão da brecha, taxa de erosão, declividade lateral da brecha e poropressão nos aterros (Figura 4.11 e Figura 4.12) com altura de 0,30 m, largura da base de 1,90 m, largura da crista de 0,10 m e largura da calha igual a 1,0 m.



**Figura 4.11:** Configuração do teste; (a) vistas lateral e superior e sistemas de medição, (b) vista lateral do aterro com vista frontal ampliada da brecha de ruptura piloto do canal.  
 Fonte: Adaptado de Pickert *et al.* (2011).



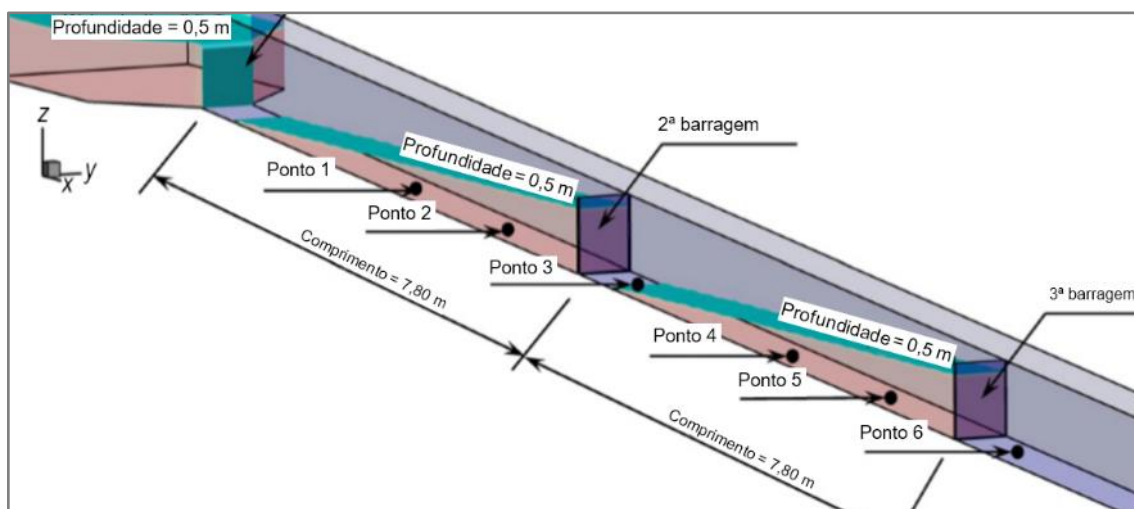
**Figura 4.12:** Configuração do teste; (c) posição das sondas do tensiômetro (T1, T2, T3 e T4) para teste.  
 Fonte: Adaptado de Pickert *et al.* (2011).

Pickert *et al.* (2011) concluíram que dois mecanismos de falha foram observados, sendo estes; (a) erosão constante e (b) colapso súbito dos taludes laterais da brecha. Não foi observado alargamento lateral linear durante a ruptura da brecha. Aqueles pesquisadores puderam concluir que o crescimento da brecha geralmente envolve a erosão da base do canal de ruptura e dos taludes laterais da brecha em combinação com eventos massivos de variação de volumes dos taludes laterais da brecha. Também puderam verificar que o material mais grosseiro leva a

processos de brecha mais rápidos, com taxas de erosão constantes e suaves, enquanto o material mais fino leva às erosões instáveis, influenciadas pela coesão.

Os modelos de Pickert *et al.* (2011), bem como as demais pesquisas, possuem algumas similaridades a esta pesquisa, como utilização de equipamentos e sensores para o registro das variáveis envolvidas antes, durante e após a formação da brecha, e a caracterização do material componente dos maciços. Contudo, a pesquisa de Pickert *et al.* (2011) chega a medir a poropressão durante os ensaios, o que é um grande diferencial em relação às demais pesquisas.

Luo *et al.* (2017) testaram o método *Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*, o qual é um método puramente Lagrangeano, originalmente desenvolvido para cálculos astrofísicos, em vazões de rupturas de barragens em cascata, sendo os resultados calculados comparados com dados obtidos nos experimentos. A Figura 4.13 ilustra o esquemático utilizado para a análise dos parâmetros de velocidade e pressão ao longo de uma ruptura de três barragens em cascata, onde podem ser destacadas as distâncias entre as barragens, as profundidades antes da ruptura e os pontos de medição dos parâmetros citados.



**Figura 4.13:** Ilustração esquemática do modelo de cálculo para reservatórios em cascata. Fonte: Adaptado de Luo *et al.* (2017).

Luo *et al.* (2017) concluíram que o efeito de uma inundação da ruptura da barragem a montante para uma barragem de jusante varia com relação às diferentes profundidades de água no reservatório a jusante, e que a barragem sofreu danos devido à fadiga de oscilação da onda.

#### **4.6 Abordagem Conceitual Sobre o Material Componente dos Modelos Reduzidos**

O projeto dos modelos reduzidos das barragens envolveu uma questão principal que se refere a qual material deve compor o maciço dos modelos reduzidos e como este deve ser parametrizado, com intuito de verificação da formação de brechas. Alguns aspectos econômicos e técnicos foram levados em consideração para a escolha do material, podendo-se citar:

- Impossibilidade de se trabalhar com materiais como solos argilosos, siltsos e arenosos, pois podem danificar o sistema de bombeamento por abrasão;
- O uso destes materiais dificulta a visualização do ensaio, pois agregam turbidez ao fluxo;
- Material que possa ser armazenado, não tóxico e acessível economicamente.

Idealmente, busca-se a substituição de solos por materiais inertes e insolúveis que possam ser coletados antes de se incorporar ao fluxo.

Assim, nesta pesquisa está sendo utilizado um granulado de borracha que não possui coesão entre grãos ao qual se adiciona pequenas parcelas de cimento Portland para que este material se torne mais representativo das características geotécnicas de um solo tropical. Esta mistura foi denominada de Mistura Borracha Cimento Água (MBCA).

Estudos anteriores desenvolvidos no CPH (Centro de Pesquisas Hidráulicas) tentaram correlacionar as propriedades geotécnicas de uma mistura de borracha, areia e cimento à resistência à erosão de maciços submetidos ao galgamento em laboratório (ANDRADE, 2017). Os resultados foram inconclusivos.

Desta forma, optou-se por utilizar a representação da resistência ao cisalhamento como referência para a utilização da MBCA nos modelos reduzidos para representar a resistência dos solos ao escoamento durante a formação da brecha. Almejando esta representação os modelos foram desenvolvidos considerando dois critérios de similaridade:

- O critério de Froude de leito rígido, para manter as mesmas condições hidráulicas;
- O critério de erodibilidade, isto é, a taxa de erosão da MBCA e o solo real devem manter a similaridade.

A erodibilidade foi escolhida para ser representativa, em vez de outro critério de similaridade, como a similaridade do parâmetro Shields, pois o solo compactado de barragens de terra apresenta resistência muito maior que o material aluvial (SALIBA, 2009). O conceito de erodibilidade (BRIAUD *et al.*, 2001) adapta conceitos de transporte de sedimentos a estruturas de solo modificadas.

Justifica-se a escolha dos critérios de similaridade pela erodibilidade por estes modelos estarem localizados em um canal prismático, em que as acelerações laterais da água podem ser negligenciadas em relação à aceleração gravitacional, a similitude geométrica exata foi adotada (JULIEN, 2002) para caracterizar o fenômeno a ruptura de barragens em cascata.

De acordo com Heller (2011) o critério de similaridade de Froude é aplicável à hidráulica de canais abertos, em que é possível negligenciar os efeitos de atrito, ou para breves e altamente turbulentos fenômenos, como é exatamente o caso das condições preponderantes da ruptura em cascata. Obviamente, é necessário garantir condições de escoamento turbulentas, que ocorrem nos escoamentos livres, garantidas para os escoamentos livres sempre quando o número de Reynolds for superior a 1.000 (JULIEN, 2002).

Macchione (2008), em uma abordagem em que faz distinção entre modelos paramétricos considerados ideais para determinar hidrogramas gerados por formação de brechas, sugere que uma aproximação mais realista leve em consideração a capacidade erosiva do fluxo (TINNEY e HSU 1961, MACCHIONE 1986, 1989, FREAD 1989, SINGH e QUIROGA 1988, SINGH e SCARLATOS 1988, ROZOV 2003, FRANCA e ALMEIDA 2004, *apud* MACCHIONE, 2008). Esta capacidade erosiva pode ser expressa como função da tensão de cisalhamento média ou uma função da velocidade média na brecha. Métodos deste tipo são chamados de métodos baseados fisicamente (MACCHIONE, 2008), como é exatamente o caso dos modelos desta pesquisa.

Sobre os materiais empregados permite-se concluir que é comum a utilização de materiais não coesivos para pesquisas, como as areias. Visser (2000) utilizou diques construídos em um canal prismático com paredes de vidro de 9,0 m de comprimento e 0,75 m de altura em um leito de areia de 0,50 m de espessura, para averiguar a formação de brechas por modelos matemáticos por ele propostos. A areia utilizada apresentava diâmetros dos grãos correspondentes a 10%, 50% e 90% mais finos ( $d_{10}$ ,  $d_{50}$  e  $d_{90}$ ) iguais a 0,070 mm, 0,088 mm e 0,120 mm, respectivamente. Wang e Bowles (2006) utilizaram um material não coesivo com principais

características de ângulo de atrito igual a 30 °, peso específico seco igual a 18,50 kN/m<sup>3</sup> e d<sub>50</sub> igual a 2,50 mm para testar um modelo 3D de formação de brechas proposto pelos autores.

A principal diferença desta pesquisa para as demais é que, utilizando-se o granulado de borracha, pode-se reproduzir efeitos coesivos pelo incremento de cimento na MBCA, o que permite controle e variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento causado pelo fluxo decorrente da ruptura por galgamento.

#### **4.7 Métodos Numéricos para Geração de Hidrogramas**

Um dos mais utilizados recursos computacionais para cálculo hidrológico, o programa de distribuição gratuita HEC-HMS (USACE, 2002) cita o método Modificado de Puls (*Modified Puls*) como sendo o método utilizado para o cálculo do hidrograma de ruptura, ou seja, para geração do hidrograma, a partir dos dados de representação da geometria da brecha e do tempo de formação. A adaptação dos parâmetros de formação de brecha no *software* HEC-HMS, para a sua aplicação com finalidade de representar os efeitos de ruptura em cascata, é indicada e tida como uma ferramenta robusta para tal finalidade. O método Puls Modificado tem suas raízes determinadas pelo algoritmo de Brent, quando o ponto se encontra entre dois valores de uma curva fornecida. O algoritmo de Brent está demonstrado em Brent (1973 *apud* PRESS *et al.*, 1992).

Outra forma de se obter o hidrograma de ruptura em cascata, e fazer sua propagação simultaneamente, é utilizar o programa HEC-RAS (USACE, 2016), o qual cita que a descarga pela brecha é calculada utilizando as equações do método de onda difusiva quando está sendo simulada a ruptura de um barramento, por exemplo. Contudo, as simulações hidráulicas levam a maiores tempos de cálculo e empecilhos de calibração.

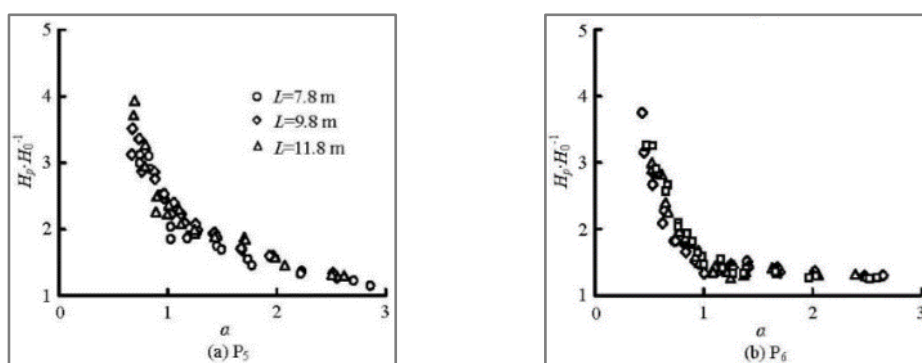
Assim, verifica-se que podem ser utilizadas as equações das abordagens hidrológica ou hidráulica para se obter os hidrogramas de ruptura em cascata, sendo que ambas simplesmente se utilizam dos dados geométricos da brecha e de seu tempo de formação, diferindo somente que na primeira abordagem são utilizados dados gráficos, e na segunda a brecha é simulada como uma seção hidráulica.

#### **4.8 Estudos Sobre Ruptura em Cascata**

Algumas pesquisas foram desenvolvidas para determinar quais os efeitos das rupturas associadas aos reservatórios em cascata. Dentre as principais estão Yang *et al.* (2011), que

procuraram determinar a variação do nível de água da vazão de pico durante a ruptura em função do nível de água inicial ( $H_p/H_0$ ) do reservatório, utilizando calhas inclinadas retangulares em laboratório e verificaram que a variação do nível de água do reservatório de jusante para o nível de água do reservatório de montante tem um impacto significativo na vazão de pico de jusante. Yang *et al.* (2011) ainda verificaram que:

- Enquanto a profundidade no reservatório de jusante ( $H_2$ ) se torna maior que a profundidade no reservatório de montante ( $H_1$ ), com  $\alpha = H_2/H_1$ , existe uma tendência de diminuição dos efeitos da ruptura de montante transferidas para o reservatório de jusante;
- Existe um ponto crítico quando a profundidade no reservatório de montante é igual a profundidade no reservatório de jusante, ou  $\alpha = 1$ . A partir deste ponto ocorre uma variação muito rápida da relação  $H_p/H_0$ , ou seja, com a profundidade no reservatório de montante se tornando maior que profundidade no reservatório de jusante, e existe uma tendência do nível de água da vazão de pico, durante a ruptura em função do nível de água inicial ( $H_2/H_1$ ), se torna abruptamente cada vez maior;
- Estes efeitos têm similaridade para o espaçamento entre os barramentos das calhas inclinadas retangulares em laboratório com valores de 7,8 m, 9,8 m e 11,8 m, para os pontos 5 e 6 analisados naquela pesquisa, dentro do reservatório do barramento de jusante, conforme Figura 4.14.



**Figura 4.14:** Correlação entre  $\alpha$  e  $H_p/H_0$  para os pontos 5 e 6.

Fonte: Yang *et al.* (2011).

Dewals *et al.* (2010) desenvolveram uma pesquisa em que eram verificadas rupturas em cascata, avaliando o colapso total de um barramento de montante com a chegada da onda de ruptura a jusante. Utilizando recursos de modelagens hidrológica e hidráulica, os autores observaram que

os efeitos da propagação destas ondas são mais perceptíveis nos trechos da parte montante do vale de jusante e, enquanto se percorre o sentido para jusante, os efeitos de tempo de chegada começam a se mostrar mais diretamente relacionados às fórmulas de parâmetros de formação de brecha utilizadas. Citam que a sensibilidade da vazão de pico em relação ao tempo de formação de brecha e aos parâmetros geométricos é rapidamente atenuada enquanto se percorre o sentido de jusante.

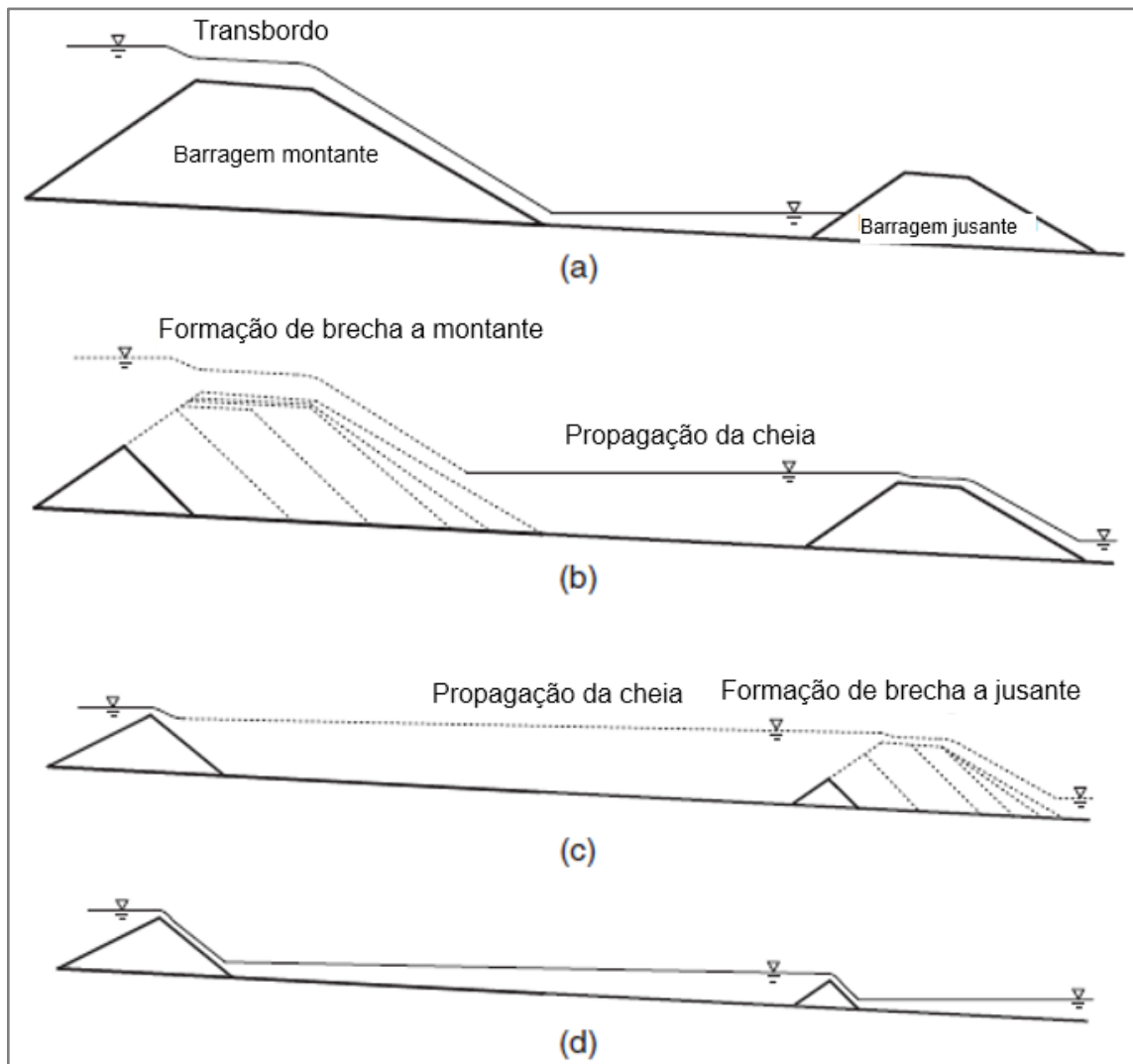
As fórmulas utilizadas por Dewals *et al.* (2010) são baseadas em análise estatística de regressão de banco de dados de acidentes ocorridos, sendo estas as fórmulas de MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990) e Froehlich (1987, 1995). Apesar da pesquisa ter uma conotação de rupturas em cascata os pesquisadores não se dedicaram à procura dos parâmetros para caracterizar as rupturas em cascata, principalmente no barramento de jusante, tão somente avaliando os efeitos causados nos hidrogramas, comparados entre um barramento de montante com outro de jusante e pelo vale a jusante dos barramentos.

Zhi-Pan *et al.* (2012) procederam os ensaios em uma calha acrílica de laboratório com declividade de 3%, onde se pôde avaliar as rupturas entre o arranjo de um barramento comparado a ruptura do arranjo de dois barramentos, com vazões de 0,8 L/s e 3,9 L/s. Porém, esta pesquisa se reteve a analisar somente questões geométricas da formação das brechas, entre um e dois barramentos, considerados os efeitos comparativos e qualitativos.

Zhou *et al.* (2017) procuraram utilizar uma simulação em uma calha com 12 ° de inclinação e 20 metros de comprimento, contando com 10 sondas ao longo do canal para registrar a passagem das vazões, para verificar como são os efeitos da ruptura em cascata. Neste artigo se exemplificam os resultados com um estudo de caso de barragens em cascata em um modelo hidráulico computacional, com valores de coeficiente de Manning calibrados a esta finalidade. O artigo de Zhou *et al.* (2017) não é claro sobre quais aspectos do modelo reduzido foram incorporados às simulações hidrológica e hidráulica. Contudo, afirmam ser muito significativas as diferenças entre uma ruptura por uma única barragem e por barragens em cascatas, e estas afirmações são expostas baseadas somente em avaliações qualitativas, sem quaisquer dados numéricos comparativos.

A pesquisa de Shi *et al.* (2015) apresenta uma avaliação comparativa entre os cenários com a ruptura de um barramento e com dois barramentos, propondo inclusive uma formulação para a brecha. Os pesquisadores dividiram a metodologia para ruptura em cascata, conforme a Figura 4.15, pelos seguintes itens:

1. Simulação da ruptura de montante por um modelo físico (modelo *Dam Breach Model* – DABA - CHANG e ZHANG (2010), PENG *et al.*, 2014). As iterações água-solo no modelo DABA são simuladas por erosão e pelas equações da hidráulica;
2. Simulação da propagação da cheia. Foi procedida pelas equações constantes da hidráulica, como conservação de massa, conservação de momento, utilizando-se o regime transitório em programa próprio a canais abertos (HEC-RAS 4.0). Segundo Shi *et al.* (2015) quando duas barragens não estão muito distantes uma da outra a energia cinética consumida não é muito grande, com perda do pico de vazão de saída entre 1% e 5% em uma distância de até 10 km, baseado em uma simulação com HEC-RAS 4.0 realizadas por Peng e Zhang (2012, 2013). Desta forma, pode-se assumir que a taxa da vazão de entrada no lago da barragem de jusante é igual à taxa da vazão de saída da barragem de montante quando a distância entre as duas barragens é menor que 10 km (PENG e ZHANG, 2012, 2013, *apud* SHI *et al.*, 2015);
3. Simulação da ruptura da brecha de jusante pelo modelo DABA. No modelo DABA a erosão é limitada à parte interna da brecha, o que é válido quando a taxa de vazão de entrada não é muito grande e a vazão é confinada à brecha. Entretanto, o acréscimo momentâneo na ruptura em cascata poderia causar extravasão e induzir a erosão em ambos lados da brecha central. Ainda, a taxa de vazão é definida como constante em vários estágios do modelo DABA, o que pode não ser aplicável no caso das vazões de rupturas em cascata. Assim, modificações no modelo DABA são necessárias para simular rupturas em cascata;
4. Repetem-se os passos (2) e (3) se houver mais barragens a jusante.



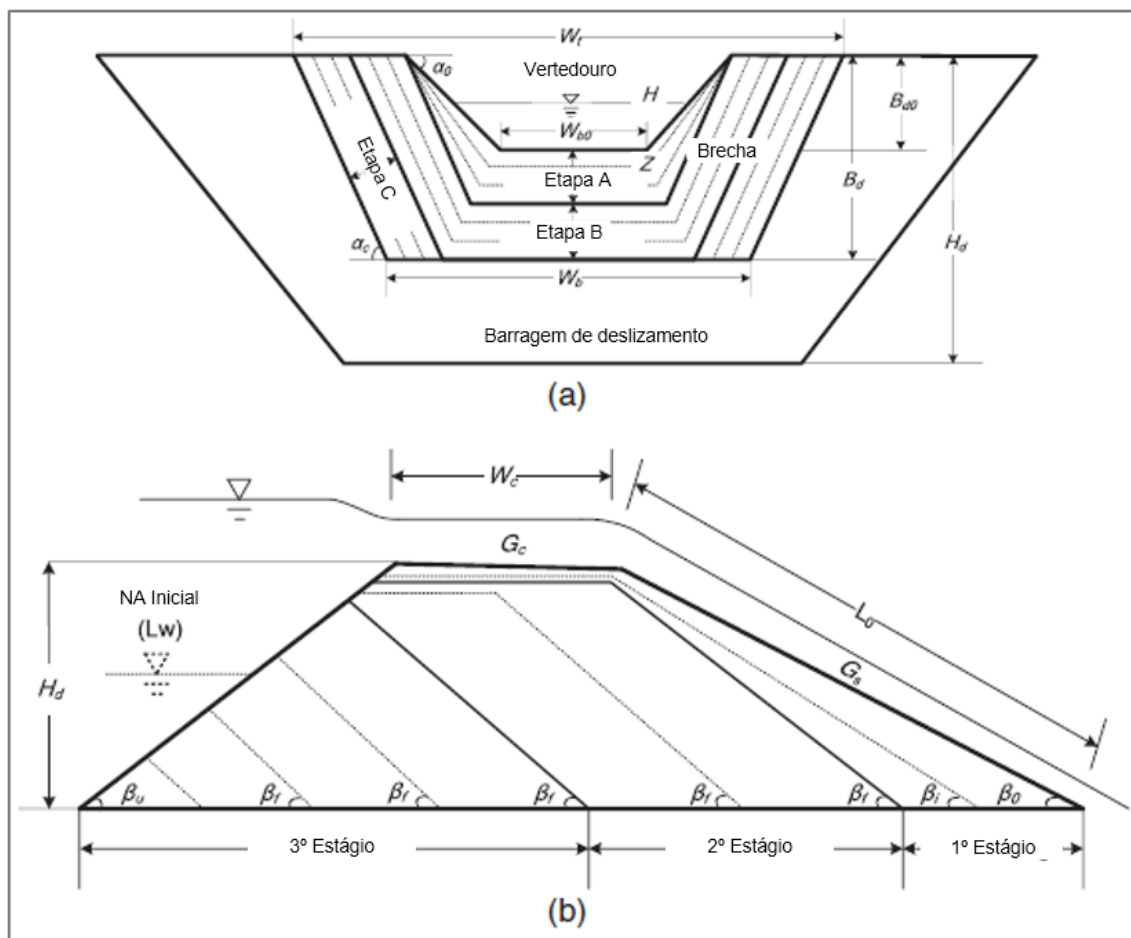
**Figura 4.15:** Ruptura de barragens por corrida de solo em cascata. (a) Submersão da barragem de montante. (b) formação de brecha na barragem de montante e propagação da cheia. (c) formação de brecha na barragem de jusante (d) Restos dos barramentos após ruptura.

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2015).

O modelo adotado por Shi *et al.* (2015 - modelo DABA) se trata de um modelo físico. Na direção longitudinal a evolução da brecha é também dividida em 3 estágios (Estágios 1-3) como mostrado na Figura 4.16 b (SHI *et al.*, 2015 *apud* CHANG e ZHANG, 2010). Os estágios na direção longitudinal são divididos de acordo com a erosão e estabilidade no sentido da declividade de jusante, enquanto as etapas na seção transversal dependem da erosão e estabilidade das inclinações laterais das ombreiras. Nas simulações com o modelo DABA, os estágios na direção longitudinal e na seção transversal são identificados sucessivamente com base nas condições críticas mostradas na Figura 4.16. Em cada etapa, os parâmetros hidráulicos e as correspondentes taxas de erosão são calculadas utilizando as equações (4.5) a (4.10). A

evolução da brecha longitudinal é semelhante àquela para a seção transversal. O ângulo crítico  $\beta_f$  também é determinado através da análise da declividade.

As duas primeiras etapas são referidas como a fase de iniciação da brecha. Normalmente, a progressão da brecha no maciço da barragem nesta fase é relativamente lenta, com uma pequena taxa da vazão de saída. O terceiro estágio é chamado de fase de desenvolvimento da brecha. A taxa da vazão de saída nesta fase aumenta drasticamente. O pico da vazão de saída geralmente ocorre nesta fase (XU e ZHANG, 2009 *apud* SHI *et al.*, 2015).



**Figura 4.16:** Adoção de ruptura pelo método de formação de brecha DABA: (a) Seção Transversal; (b) Perfil Longitudinal.

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2015) *apud* Chang e Zhang, 2010.

Na Figura 4.16,  $G_c$  e  $G_s$  são os gradientes de declividades da crista da barragem e declividade jusante, respectivamente. A erosão do solo pode ser descrita como na equação (4.5):

$$E = Kd. (\tau - \tau_c) \quad (4.5)$$

Na qual:

- $E$  é a taxa de erosão do solo ( $\text{mm}^3/\text{m}^2.\text{s}$ );
- $\tau$  é a tensão cisalhante na interface solo/água (Pa);
- $K_d$  é o coeficiente de erodibilidade ( $\text{mm}^3/\text{N}.\text{s}$ );
- $\tau_c$  é a tensão cisalhante crítica para início de erosão do solo (Pa).

A resistência a erosão do solo pode ser representada por  $K_d$  e  $\tau_c$ , os quais podem ser estimados usando fórmulas empíricas (ANNANDALE (2006) e CHANG *et al.*, (2011) *apud* SHI *et al.*, (2015)). O parâmetro  $\tau_c$  representa quão fácil a erosão de um solo pode ser iniciada enquanto  $K_d$  representa quão rápido pode ocorrer a erosão de um solo (SHI *et al.*, 2015).

A tensão cisalhante causada pelo escoamento pode ser calculada como na equação (4.6):

$$\tau = \gamma_w R_h S \quad (4.6)$$

Na qual;

- $\gamma_w$  é o peso específico da água ( $\text{N}/\text{m}^3$ );
- $R_h$  é o raio hidráulico (m);
- $S$  é a declividade da linha de energia (m/m).

Observa-se que, como mostrado na Figura 4.16 (b), em condições de escoamento uniforme,  $S$  é igual a  $G_c$  ao calcular a erosão na crista da barragem, e  $S$  é igual a  $G_s$  quando calculada a erosão no paramento de jusante, em que  $G_c$  e  $G_s$  são as declividades longitudinais da crista e do paramento de jusante da barragem, respectivamente. Assim, a erosão no pé do aterro da barragem é mais rápida do que a erosão da crista, uma vez que  $G_s$  é muito maior do que  $G_c$ . Para uma brecha de seção transversal tipo trapezoidal típica, como mostrado na Figura 4.16 (a), o raio hidráulico é dado pela equação (4.7):

$$R_h = \frac{(H - Z) \cos \alpha + W_b \sin \alpha}{2(H - Z) + W_b \sin \alpha} \cdot (H - Z) \quad (4.7)$$

Na qual;

- $H$  é a elevação da superfície da água (m);
- $Z$  é a elevação do fundo de brecha (m);
- $W_b$  é a largura do fundo da brecha, perpendicular à direção do escoamento (m);
- $\alpha$  é o ângulo dos taludes da brecha ( $^\circ$ ).

A descarga por brecha trapezoidal de seção transversal típica pode ser calculada pela equação (4.8 (SINGH e SCARLATOS, 1988):

$$Q_b = 1,7 \cdot A_b \cdot \sqrt{(H - Z)} = 1,7 \cdot [W_b + (H - Z) \tan \alpha] \cdot (H - Z)^{3/2} \quad (4.8)$$

Na qual  $A_b$  é a área da brecha ( $m^2$ ).

O nível do lago pode ser obtido aplicando-se a equação da conservação de massa como dado pela equação (4.9):

$$A_s \frac{dH}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4.9)$$

Na qual;

- $A_s$  é a área superficial do lago ( $m^2$ );
- $Q_{in}$  e  $Q_{out}$  são as taxas de entrada e de saída do reservatório ( $m^3/s$ );
- $t$  é a variável tempo (s).

Os dados de entrada do modelo incluem informações geométricas e parâmetros do solo da barragem. As saídas são os parâmetros de brecha (*e.g.* tamanho da brecha, tempo de formação de brecha, N.A. e taxa de vazão de saída) em cada intervalo durante a simulação (SHI *et al.*, 2015).

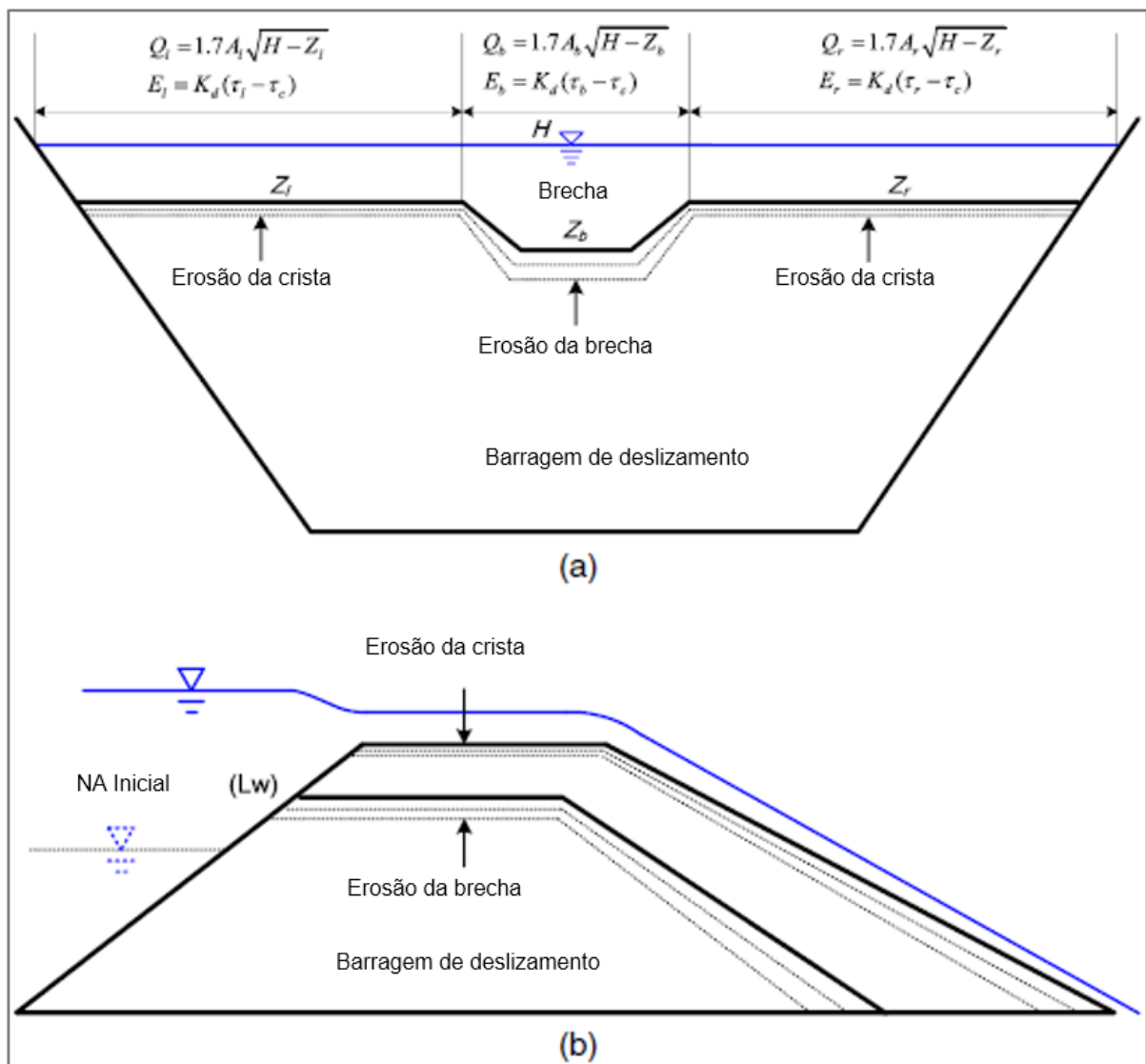
Segundo Shi *et al.* (2015) foram procedidas três grandes modificações no modelo DABA a fim de simular a brecha em rupturas de barragens em cascata;

- (1) A enorme vazão causada pela ruptura da barragem a montante leva ao transbordamento da barragem a jusante. No estudo de Shi *et al.* (2015), a seção transversal da barragem a jusante é dividida em três partes: crista esquerda, brecha e crista direita, como mostrado na Figura 4.17 (a). A vazão de saída total,  $Q_t$ , é a soma das três partes, da brecha, direita e esquerda, como na equação (4.10);

$$Q_t = Q_l + Q_b + Q_r \quad (4.10)$$

Sendo as vazões calculadas como na equação (4.8). As taxas de erosão nessas três partes são calculadas com as equações (4.5 a (4.7). A crista da barragem é assumida na mesma cota ao longo de sua extensão, e a taxa de erosão é assumida como a mesma ao longo da crista da barragem. O ângulo longitudinal (ao longo da direção do fluxo) da superfície da crista durante a erosão é assumido como inalterado nas fases 1 e 2 na Figura 4.16 (b). Deve se notar que os parâmetros  $K_d$  e  $\tau_c$  na parte da brecha e na parte de crista são diferentes e obtido através da análise de interação solo-água (SHI *et al.*, 2015);

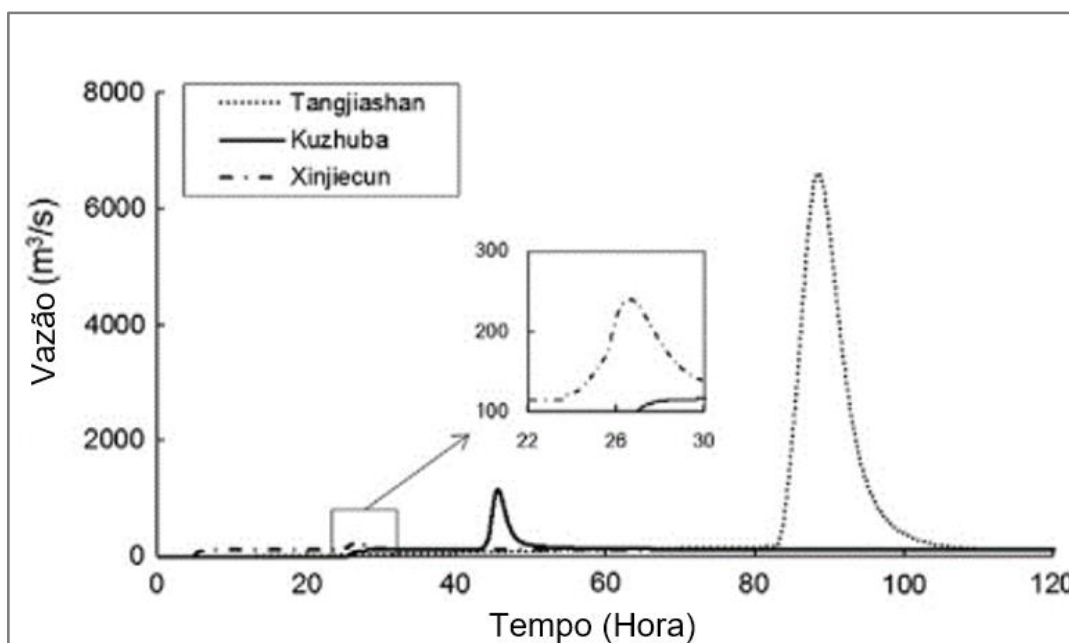
- (2) A erosão na direção longitudinal também é considerada na parte de brecha e nas partes da crista da barragem como mostrado na Figura 4.17 (b). Normalmente, a erosão na parte da brecha é mais rápida do que na crista da barragem, porque a profundidade da água na brecha é maior. A diferença das profundidades do fluxo das águas na parte da brecha e na parte da crista da barragem se tornará cada vez maior durante a formação da brecha, levando a concentração do fluxo de água para a brecha. A erosão na crista da barragem chegará ao fim tão breve a brecha evolua para um certo tamanho. Portanto, apesar dos estágios de formação de brecha na barragem, Figura 4.17 (b), as partes de brecha e de crista da barragem devem ser identificadas separadamente, conforme sua evolução;
- (3) As taxas da vazão de entrada são definidas como uma variável relacionada ao tempo, ao invés de alguns valores constantes. Na análise de brecha de uma única barragem com o modelo DABA, basta ajustar a taxa de entrada como constantes, uma vez que as taxas da vazão de entrada mudam ligeiramente durante uma formação de brecha. No entanto, as taxas da vazão de entrada no lago a jusante podem variar rapidamente em cenários de brecha de barragens em cascata. Assim, a taxa da vazão de entrada é definida como uma variável para o caso da ruptura em cascata, que é determinada pelas simulações das brechas das barragens e pela análise de propagação das cheias.



**Figura 4.17:** Modificações do modelo DABA. (a) Perfil transversal. (b) Perfil longitudinal. Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2015).

Na Figura 4.17,  $A_l$ ,  $A_b$  e  $A_r$  são as áreas molhadas da seção transversal na parte esquerda da crista, na brecha e na parte direita da crista (SHI *et al.* 2015).

Os estudos de Shi *et al.* (2015) concluíram que existem algumas diferenças entre a ruptura das barragens em cascata e a ruptura de uma barragem única. Os parâmetros hidráulicos das brechas independentes para as três barragens são mostrados na Figura 4.18 e Tabela 4.2, ambas adaptadas de Shi *et al.* (2015). Observa-se que as vazões de entrada na ruptura de uma única barragem foram definidas como uma constante de  $113 \text{ m}^3/\text{s}$ . A ruptura em cascata da barragem de Kuzhuba teve dois picos,  $1.240 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $6.883 \text{ m}^3/\text{s}$ , causados pela ruptura de duas barragens, enquanto há apenas um pico em cada caso de ruptura de uma única barragem ( $1.152 \text{ m}^3/\text{s}$  para a barragem de Kuzhuba e  $240 \text{ m}^3/\text{s}$  para a barragem de Xinjiecun, respectivamente).



**Figura 4.18:** Hidrogramas de rupturas em brechas individuais de cada uma das três barragens avaliadas.

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2015).

**Tabela 4.2-** Parâmetros de brecha para as três barragens avaliadas (Adaptado de Shi *et al.*, 2015).

Parâmetros de Brecha	Barragens formadas por corrida de terra		
	Tangjiashan	Kuzhuba	Xinjiecun
Pico de vazão de saída - $Q_p$ ( $m^3/s$ )	6603	1152	240
Profundidade final de brecha - $B_{bf}$ (m)	43,4	28,6	13,0
Largura final da brecha Fundo - $W_{bf}$ (m)	132	109	46
Largura final da brecha Topo (m)	204	157	67
Tempo de início da brecha - $T_i$ (h)	82,9	18,4	19,1
Tempo de desenvolvimento de brecha - $T_d$ (h)	14,6	7,2	7,8
Elevação máxima NA (m)	742,2	664,4	600,6
Profundidade máxima NA (m)	12,4	6,8	4,3
Profundidade de erosão na crista (m)	0,00	0,24	0,37

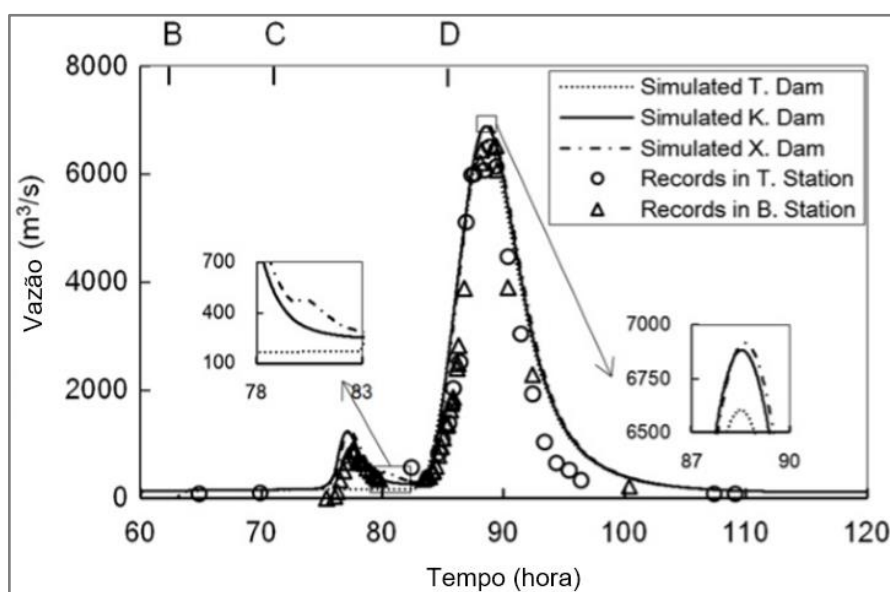
O tamanho da brecha da barragem de Kuzhuba foi muito maior no caso da brecha em cascata. Por exemplo, a profundidade da brecha neste caso foi de 35,3 m, que foi maior que 28,6 m no caso de ruptura da única barragem mostrado na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3. O tempo de fluxo e o tempo de rompimento da barragem de Kuzhuba foram atrasados devido ao bloqueio causados pela barragem Tangjiashan.

O caso da brecha da barragem de Xinjiecun era semelhante, exceto que havia três picos no hidrograma de fluxo de saída. As taxas de pico de escoamento foram 1.230  $m^3/s$ , 482  $m^3/s$  e 6.916  $m^3/s$  nos tempos de 77,3 h, 82,2 h e 88,6 h, respectivamente (Figura 4.19).

**Tabela 4.3-** Parâmetros para barragem de corrida de terra em cascata (Adaptado de Shi *et al.*, 2015).

Parâmetros de Brecha	Barragens formadas por corrida de terra				
	Tangjiashan		Kuzhuba	Xinjiecun	
	Simulado	Observado		Simulado	Observado
Pico de vazão de saída - Qp (m <sup>3</sup> /s)	6603	6500	1240/ 6883 <sup>a</sup>	1230/ 482/ 6916 <sup>a</sup>	6540
Profundidade final de brecha - Bbf (m)	43,4	42	35,3	13,0	-
Largura final da brecha Fundo - Wbf (m)	132	100-145	136	38	-
Largura final da brecha Topo (m)	204	145-225	195	60	-
Tempo de início da brecha - Ti (h)	82,8	71	17,2	14,8	-
Tempo de desenvolvimento de brecha - Td (h)	14,6	14	-	-	-
Elevação máxima NA (m)	742,2	743,1	664,5	603,2	-
Profundidade máxima NA (m)	12,4	11,0	10,8	16,7	-
Profundidade de erosão na crista (m)	0,00	0	0,29	1,17	-

a - Existem dois picos para o hidrograma de saída da barragem Kuzhuba e três picos para o hidrograma de saída da barragem Xinjiecun.



**Figura 4.19:** Taxa de vazão de saída por brechas individuais de cada uma das três rupturas de barragem.

Fonte: Adaptado de Shi *et al.* (2015).

Marche *et al.* (1997) desenvolveram um estudo com simulações uni e bidimensionais para reservatórios em série para La Grande, localizado no Québec setentrional. Sendo os reservatórios em série (La Grande) LA1, LA2, LA3 e LA4 a montante da barragem Robert-Bourassa. La Grande é um complexo de reservatórios principais em série e outros 31 diques localizados em selas topográficas.

O estudo de Marche *et al.* (1997) procurou avaliar possíveis rompimentos em série destes reservatórios e destes diques de sela. Desta forma, os pesquisadores trataram das propagações das vazões em trechos com características longitudinais (cursos de água dos diques), utilizando abordagem unidimensional, e quando estas vazões atingem os reservatórios principais foram utilizadas as representações bidimensionais em condutos livres, em regime transitório, para avaliar as propagações dos hidrogramas. Foram apresentados os resultados de duas combinações possíveis de rupturas, assim nomeados, os resultados dos testes 5 e 21, com análises destes resultados.

As equações uni e bidimensionais utilizadas foram as equações de Saint-Venant. A formulação unidimensional das equações de Saint-Venant citadas por Marche *et al.* (1997) são dadas pelas equações (4.11), (4.12), (4.13) e (4.14):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = TS \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_1}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (4.12)$$

Nas quais:

- $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ );
- $A$  é a área da seção transversal ( $m^2$ );
- $S_o$  é a declividade longitudinal ( $m/m$ );
- $S_f$  é a declividade da linha d'água ( $m/m$ );
- $TS$  é um termo fonte (se positivo) ou saída (se negativo) ( $m^2/s$ );
- $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
- $F_1$  é um termo definido por ( $m^4/s^2$ ):

$$F_1 = Q^2/A + g I_1 \quad (4.13)$$

Na qual:

- $I_1$  é um termo de forma hidrostática (m<sup>3</sup>) dado por:

$$I_1 = \int_0^H (H - \eta) B(x, \eta) d\eta \quad (4.14)$$

Na qual:

- $H(x, t)$  é a profundidade instantânea (m);
- $B$  é a largura local transversal da linha d'água (m);
- $\eta$  é a elevação da superfície livre;
- $x$  é a direção longitudinal.

Marche *et al.* (1997) utilizaram a solução numérica de um esquema explícito de diferenças finitas de MacCormack (1969 *apud* MARCHE *et al.* 1997), e segundo os pesquisadores a resolução bidimensional dinâmica foi feita pelo modelo TASE/SWAN desenvolvido por TASE Software Corporation Inc.

Uma descrição geral deste programa (SERUM) pode ser encontrada em Zhang *et al.* (1992). Este programa é baseado na integração numérica das equações completas de Saint-Venant em formulação bidimensional de fluxo, satisfazendo as equações de conservação de massa e volume (MARCHE *et al.* 1997), e são dadas pela equações (4.15), (4.16), (4.17), (4.18), (4.19) e (4.20) em suas formas conservativas, como:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = TS \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = gH(S_{0x} - S_{fx}) \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\partial G}{\partial x} = gH(S_{0y} - S_y) \quad (4.17)$$

Nas quais:

- $H$  é a profundidade instantânea (m);

- $Q$  é a vazão ( $m^3/s$ );
- $F$  é um termo definido por ( $m^2/s$ ):

$$F = (Q_x^2/H) + (1/2) \cdot g \cdot H^2 \quad (4.18)$$

- $G$  é um termo definido por ( $m^5/s^2$ ):

$$G = Q_x \cdot Q_y / H \quad (4.19)$$

- $S$  é um termo definido por ( $m^2/s$ ):

$$S = (Q_y^2/H) + (1/2) \cdot g \cdot H^2 \quad (4.20)$$

- $TS$  é um termo fonte (se positivo) ou saída (se negativo –  $m^2/s$ );
- $So$  é a declividade na direção  $x$  ou  $y$ ;
- $Sf$  é a declividade da linha de energia na direção  $x$  ou  $y$ ;
- Subscritos  $x$  e  $y$  são as respectivas direções no sistema de coordenadas cartesiano;
- $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
- $n$  é o coeficiente de rugosidade e Manning ( $m^{-1/3} \cdot s$ ).

O artigo de Marche *et al.* (1997) trata apenas das propagações hidráulicas entre os reservatórios principais e dos diques de selas, apresentando os hidrogramas resultantes das combinações avaliadas dos testes 5 e 21. Entretanto, não foram descritas as equações de formação das brechas, em um único barramento ou em série. Apesar da citação do trabalho de Fread (1987), o estudo apresentado pelos pesquisadores procurou avaliar somente a parte hidráulica da propagação de vazões em rupturas em cascata, sem apresentar detalhes das formações das brechas, ou da utilização de alguma adaptação para estas equações de formação de brechas em barragens de solo.

A pesquisa desenvolvida por Zhang e Xu (2017) foi feita em uma calha de material transparente em laboratório com 20,0 m de comprimento por 0,5 m de largura por 1,0 m de altura, e procurou avaliar a ruptura somente de um barramento de montante, trabalhando com a suposição de que o barramento intermediário não romperia, para possibilitar a avaliação das pressões sofridas por este barramento intermediário. Neste caso, procurou-se avaliar, qualitativamente e numericamente, várias possibilidades de enchimento deste barramento intermediário, o que permitiu classificar os dois tipos de padrões de galgamentos possíveis.

Zhang e Xu (2017) classificaram os galgamentos como *Leap* (Pulo), que ocorre com o salto da água por cima do barramento intermediário envolvendo bastante turbulência e assimilação de ar ao escoamento, e *Overflow* (Transbordo) que ocorre com a passagem da água por cima do barramento intermediário com uma taxa de turbulência muito menor. Porém, em ambos os padrões de galgamentos, quando a água alcança a parte montante do reservatório formado pelo barramento intermediário ocorre turbulência com a entrada do hidrograma advindo da ruptura do barramento de montante.

A pesquisa desenvolvida por Cao *et al.* (2014) procurou avaliar numérica e qualitativamente os efeitos hidráulicos da ruptura em cascata por meio do uso de diversos programas. O trabalho avaliou vários arranjos entre as duas barragens simuladas onde variou-se a distância entre os barramentos, altura dos barramentos, profundidades iniciais dos reservatórios, simultaneidade das rupturas ou ruptura em cascata, fundo das calhas fixas ou móveis, e procederam-se comparações entre os resultados por rupturas em cascata, isolada e simultânea. Todavia, não se faz ao menos menção sobre as formulações de equações de brecha adotadas, o que indica que se tratou apenas de uma avaliação hidráulica, sem considerar o processo físico de abertura da brecha e suas implicações nas modelagens hidrológica e hidráulica.

Os estudos que foram desenvolvidos por Hongmin *et al.* (2010) também procuraram avaliar numérica e qualitativamente os efeitos hidráulicos da ruptura em cascata por meio do uso de *softwares*, de forma muito similar ao estudo de Cao *et al.* (2014). Porém, os estudos de Hongmin *et al.* (2010) fazem menção à fórmula de brecha, mas sem indicar se é uma formulação específica para rupturas em cascata.

Os estudos que foram desenvolvidos por Bouchehed *et al.* (2017) utilizaram modelagem hidráulica bidimensional, do programa Telemac 2D e recursos de GIS, para avaliar parâmetros de inundação devido a rupturas em cascata das barragens Mexa e Bougous, localizadas na Argélia, e avaliar os efeitos destas cheias nas cidades a jusante. O estudo de Bouchehed *et al.* (2017) não faz citação de qual equação de brecha foi utilizada.

Altinakar *et al.* (2017) elaboraram estudo de rupturas em cascata para quatro barramentos localizados no Parque Oak Mountain, que por sua vez está localizado no Vale Cahaba Creek. O estudo possui simulações hidrológicas, para obter os hidrogramas de rupturas em série, e simulações hidráulicas bidimensionais, com posterior georreferenciamento das manchas de inundação. Foi verificado que as equações de brecha utilizadas não incluem as condições de

barramentos em cascata, mas sim tratam-se das equações de MacDonald and Langridge-Monopolis (1984), Froehlich (1995), Froehlich (2008) e VonThun e Gillette (1990).

Pereira *et al.* (2003) apresentaram um estudo de modelagem computacional, considerando o modo de falha por meio de galgamento, de ruptura de uma série de barragens em cascata do rio Paranapanema, onde foi considerada a abordagem hidráulica de propagação e trânsito de cheias por oito reservatórios, contando inclusive com mapeamento em GIS das áreas inundadas. Porém, a evolução da brecha foi procedida pela equação de soleira espessa, conforme citado no artigo.

Schaefer e Barker (2007) apresentam dois métodos para representar as rupturas em cascata:

- 1) O primeiro método é uma abordagem mais simples, para estimar somente o pico de descarga de alguma barragem a jusante, sujeita (s) à falha de uma barragem a montante. Este método assumi que cada barragem possa falhar independentemente da outra. São utilizadas equações, apresentadas em Schaefer e Barker (2007), para calcular a vazão de pico de cada barragem. A vazão de pico final é a soma da vazão de pico de cada barragem a montante.
- 2) O segundo método pressupõe que haja uma contribuição dos volumes advindos da barragem, ou das barragens, de montante o que levaria a uma alteração da área da superfície do lago do reservatório de jusante e esta deveria ser corrigida, como exposto a seguir, para poder ser aplicada nas demais equações apresentadas por Schaefer e Barker (2007):

$$S'_a = S_a \left( \frac{V_w + \sum V_{wus}}{V_w} \right) \quad (4.21)$$

Na qual:

- $S'_a$  é a área de superfície ajustada do reservatório a jusante a ser utilizada na equação 9 apresentada por Schaefer e Barker (2007);
- $S_a$  é a área de superfície do reservatório de jusante;
- $V_w$  é o volume de água no reservatório de jusante, excluindo a contribuição (ou as contribuições) da falha da barragem (ou das falhas das barragens) a montante (acre-pé);

- $\Sigma V_{wus}$  é a soma do volume liberado da falha de todas as barragens a montante (acrépé).

Verifica-se que uma das principais diferenças, desta pesquisa para as demais apresentadas, é o material componente dos maciços. De uma forma geral, nas pesquisas consultadas, são utilizados solos, enquanto que para esta pesquisa foi utilizado um material substituto, conforme detalhado no item 5.4, foi utilizado um material composto nomeado MBCA. Pretende-se desenvolver um material barato e disponível que permita ser adaptado em escala para uso em futuros modelos reduzidos. A adição de cimento à mistura permitiu dosar efeitos coesivos em escala que afetam a erodibilidade do maciço.

Outra diferença notável, em relação às demais pesquisas, é que estas não apresentam parâmetros de brechas para as barragens de jusante na ruptura em cascata, apesar de explorarem muito a dinâmica do fenômeno de formação de brecha sobre estas condições.

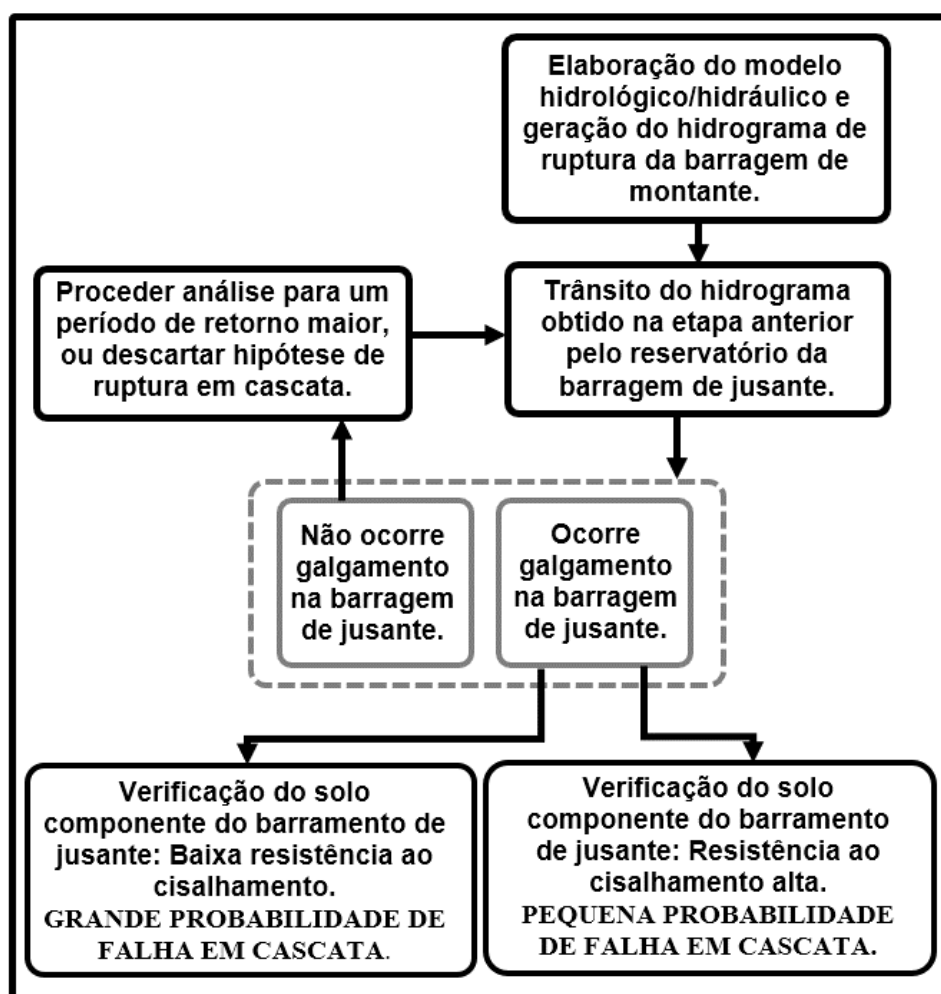
## 5 METODOLOGIA

Procura-se a seguir detalhar as principais etapas metodológicas para o desenvolvimento da pesquisa e dar embasamento teórico para uma formulação de ruptura em cascata.

### 5.1 Etapas Metodológicas para Avaliação da Condição de Ocorrência de Ruptura em Cascata

Dentre as principais questões que podem surgir quando da avaliação de estudos de ruptura de barragens em cascata, talvez a mais importante, é determinar se a barragem de jusante poderá entrar em ruptura por efeito de cascata, considerada a hipótese da ruptura preliminar da barragem a montante.

Assim, para proceder esta avaliação, foi desenvolvido o fluxograma constante da Figura 5.1, aplicável com utilização de programas hidrológicos e/ou hidráulicos, para avaliação do trânsito de cheias, e com levantamento do solo componente da barragem de jusante em análise.



**Figura 5.1:** Fluxograma para avaliação da ocorrência da ruptura em cascata.

Para o fluxograma da Figura 5.1 quando é analisado o trânsito da onda de ruptura da barragem de montante pelo reservatório da barragem de jusante, através de um programa computacional, podem ser considerados os períodos de retorno entre 500, 1.000 a 10.000 anos, ou mesmo da Cheia Máxima Provável (CMP). Cabe uma avaliação deste trânsito da onda de ruptura da barragem de montante para definir exatamente qual período de retorno leva à condição de galgamento na barragem de jusante.

Caso se verifique que não ocorram galgamentos, mesmo em condições extremas de saturação do solo da bacia e da ocorrência da CMP, a hipótese é descartada.

Caso ocorra galgamento, em um período de retorno definido, deve se proceder a uma análise geotécnica, onde são avaliados os parâmetros de resistência dos solos, se estes possuem alta ou baixa plasticidade, alta ou baixa resistência ao cisalhamento, se tratam-se de solos pouco coesivos, como silte-arenosos ou materiais provenientes de processamento mineral (jigues), ou, se tratam-se de materiais argilosos, caracteristicamente coesivos. A análise destes parâmetros conduzirá a escolha entre as hipóteses de ocorrência ou não da ruptura em cascata da barragem de jusante, utilizando-se amostragem dos materiais componentes do maciço da barragem e procedimentos de ensaios geotécnicos laboratoriais, para definição dos valores de resistência ao cisalhamento.

A metodologia desta pesquisa pode ser mais detalhada por meio da elaboração de modelos reduzidos em laboratório para representar barragens em cascata e, a partir das rupturas destes modelos, avaliar os parâmetros de largura média, altura e tempo de formação da brecha para propor uma equação de formação de brecha para barragens em cascata.

Para que se torne possível obter uma equação de formação de brecha em barragens com ruptura em cascata que possa ser aplicada a outras barragens, propõe-se aplicar modelagem hidráulica computacional uni e bidimensional (HEC-RAS 5.0.7) para avaliar, principalmente, a partir de qual distância entre barramentos estas equações não teriam mais validade, ou seja, avaliar suas limitações de aplicabilidade.

Propõe-se, assim, a seguinte sequência metodológica:

- Elaboração e construção dos modelos reduzidos em laboratório para obtenção dos parâmetros característicos para representação da geometria da brecha (largura, altura e inclinação dos taludes da brecha) e tempo de formação;

- Para a elaboração dos modelos reduzidos deverão ser observadas as escalas geométricas e as escalas de erosão, sendo que para esta última foi desenvolvida uma pesquisa específica da MBCA;
- Determinação das escalas e dimensões adequadas para representar os fenômenos hidrológicos e hidráulicos;
- Desenvolvimento das equações representativas das parcelas de energia envolvidas nas formações de brechas das rupturas de montante para jusante para os modelos reduzidos;
- Simulação das rupturas dos modelos reduzidos em laboratório;
- Variação da distância entre os maciços dos modelos reduzidos para avaliar os efeitos de amortecimento, perda de energia e variação dos volumes dos reservatórios;
- Análise dos resultados dos modelos reduzidos;
- Simulação dos parâmetros encontrados em modelo hidrológico para obter hidrogramas de ruptura com resultados desta pesquisa comparados com hidrogramas de rupturas segundo as equações pesquisadas de previsão de geometria de brecha, com posterior geração de mancha de inundação, as quais permitirão comparações de parâmetros como; profundidade, velocidade, tensão de arraste e risco hidrodinâmico.

Para cumprir as etapas da metodologia proposta, outros quesitos foram analisados:

- Desenvolvimento de um referencial teórico;
  - Revisão das equações de brechas existentes, bem como seus limites de aplicação, para uma ou mais barragens;
  - Revisão das equações de brechas para barramentos;
  - Desenvolvimento dos parâmetros escalares adequados;
  - Análise dos fenômenos físicos durante a ruptura da barragem, de forma a ser possível obter parâmetros representativos em barramentos em sequência;
- Estudos dos hidrogramas aplicáveis aos modelos de laboratório e em protótipos;

- Verificação da validade dos parâmetros obtidos para a geometria e tempo de formação de brecha, devido aos efeitos de escala;
- Verificação da validade do critério de tempo mínimo de formação de brecha igual a 15 minutos, sugerido na literatura para rupturas isoladas, no caso de rupturas de barragens em cascata;

## **5.2 Representação para Ruptura por Brecha em Cascata**

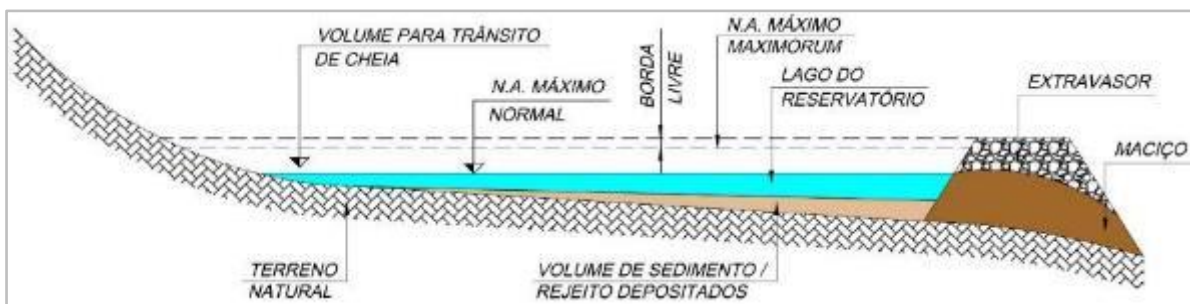
Dentre os principais modos de falha associados às rupturas de barragens citados por ICOLD (1998) estão; galgamento, sismo, *piping*, instabilidade de taludes, falhas na fundação, falhas estruturais. Esta pesquisa trata do modo de falha por galgamento exclusivamente.

Os mecanismos que atuam para a formação do galgamento são, em parte, devidos aos processos hidrológicos e hidráulicos e a outra parte é consequência da passagem das cheias de ruptura por cima do solo, então exposto.

A Figura 5.2 demonstra as parcelas volumétricas envolvidas na formação do escoamento em uma ruptura hipotética, sendo:

- Volume de sedimentos/rejeitos depositados no lago ( $m^3$ ); conforme o projeto do reservatório e tempo de operação recebendo sedimentos/rejeitos;
- Volume para o trânsito de cheias no reservatório; destinado à passagem dos hidrogramas de projeto conforme o porte da barragem e norma aplicável, variando entre 500, 1.000, 10.000 ou CMP ( $m^3$ );
- Lago do reservatório; volume ocupado por água ( $m^3$ ).

A Figura 5.2 demonstra também as estruturas como o extravasor, o maciço da barragem, e outras variáveis notáveis como os níveis de água (N.A.) Máximo Maximorum, N.A. Máximo Normal e a Borda Livre.



**Figura 5.2:** Parcelas volumétricas envolvidas em ruptura de barragem.

O desenho esquemático da Figura 5.3 apresenta o processo no qual se desenvolve a formação de brecha em uma barragem (falha por galgamento) localizada a jusante de uma primeira barragem, onde ocorre a primeira ruptura.

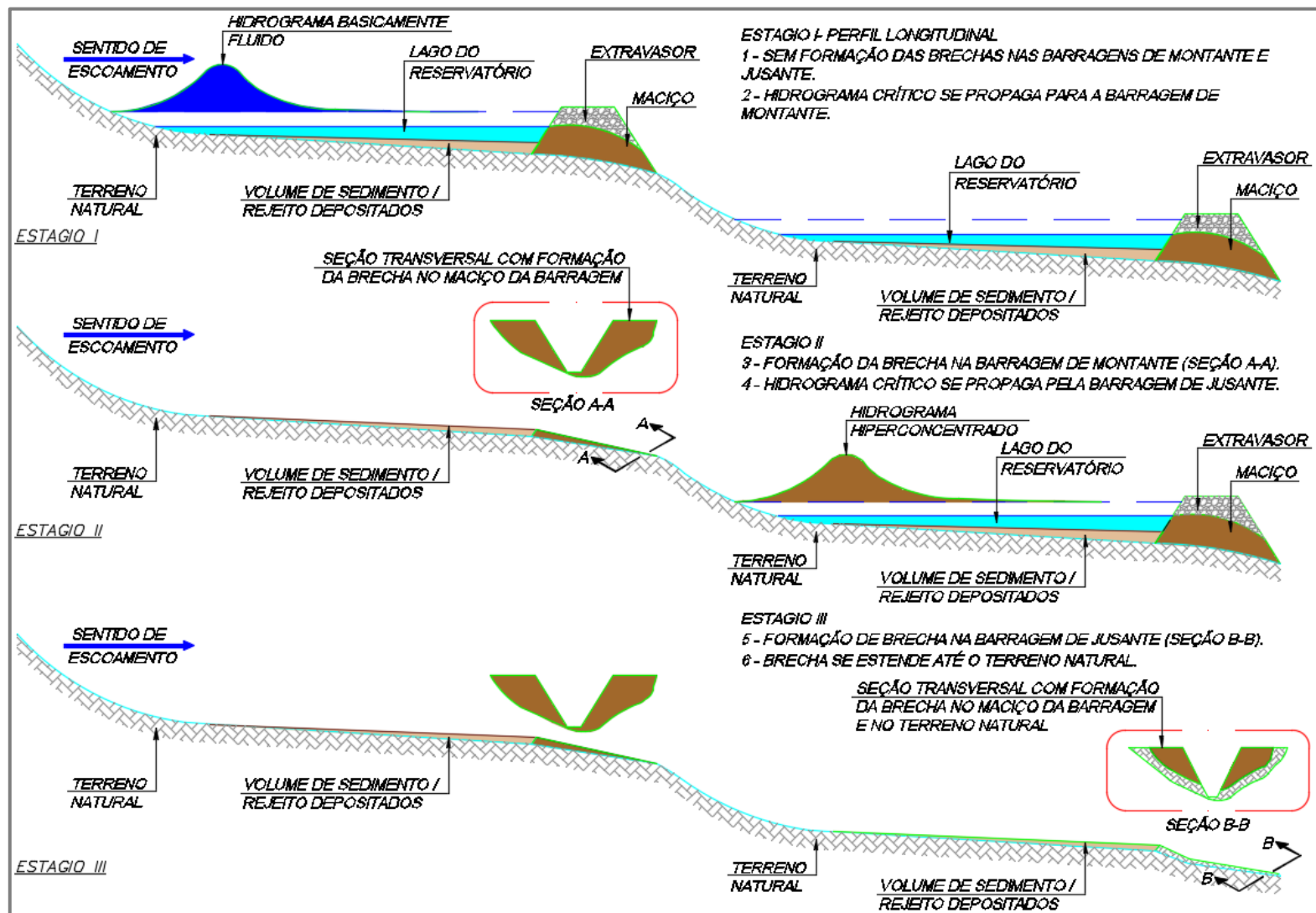
Com o aporte do hidrograma (Estágio I – Figura 5.3), advindo da área de drenagem da primeira barragem ao maciço da primeira barragem (montante) ocorrerá uma brecha (Detalhe 1 – Seção A-A) nesta primeira barragem e haverá a propagação de um hidrograma com maior volume e energia para o lago do reservatório da segunda barragem. Este segundo hidrograma possui uma taxa muito maior de sedimentos, rejeitos e sólidos (solo retirado dos rejeitos presentes no lago e da brecha formada na primeira barragem) acarretando um hidrograma com maior volume e maior pico de vazão (Estágio II – Figura 5.3).

A chegada do segundo hidrograma ao lago do reservatório de jusante (Estágio III – Figura 5.3) leva à formação de uma brecha com características principais de ser amplamente mais larga, mais profunda (com premissa inclusive de atingir parte do terreno natural), e com tempo de formação menor, ou seja, formação mais rápida (Detalhe 2 – Seção B-B). Durante o processo de trânsito do segundo hidrograma no segundo reservatório (jusante), pode ocorrer o amortecimento ou não deste hidrograma, conforme a distância entre as estruturas e os volumes disponíveis nos reservatórios.

Nesta pesquisa pressupõe-se que os barramentos são muito próximos, de forma que a passagem do segundo hidrograma, resultante da soma dos hidrogramas da primeira barragem e do hidrograma da área de drenagem da segunda barragem, vai causar o rompimento do maciço da segunda barragem, formando uma brecha maior que aquela que ocorreria em uma ruptura isolada.

Assumem-se como verdadeiras as premissas estabelecidas pois:

- Os volumes envolvidos no segundo hidrograma apresentam potencial para causar uma ruptura a jusante;
- A proximidade entre as estruturas pressupõe que haverá conservação de uma parcela de energia, que contribuirá para uma brecha mais acentuada na segunda barragem. Como citado por Luo *et al.* (2017) uma onda proveniente de uma ruptura da barragem de montante destruirá a barragem de jusante até uma certa extensão, pois possui uma quantidade considerável de energia ao passar pelo canal e pelo reservatório a jusante. A barragem a jusante entrará em colapso, se esta não puder resistir ao impacto da inundação, resultando em uma ruptura acentuada.



**Figura 5.3:** Previsão de processo de formação de brechas em barragens sequenciais.

### 5.3 *Descrição Matemática da Formação da Brecha na Barragem de Jusante*

Para uma definição formal e estimativa das parcelas de energia envolvidas na formação da brecha da barragem de jusante, ou formação de brechas por ruptura em cascata, expõe-se a seguir uma descrição a partir da hipótese de uma ruptura de uma barragem localizada a montante, como segue.

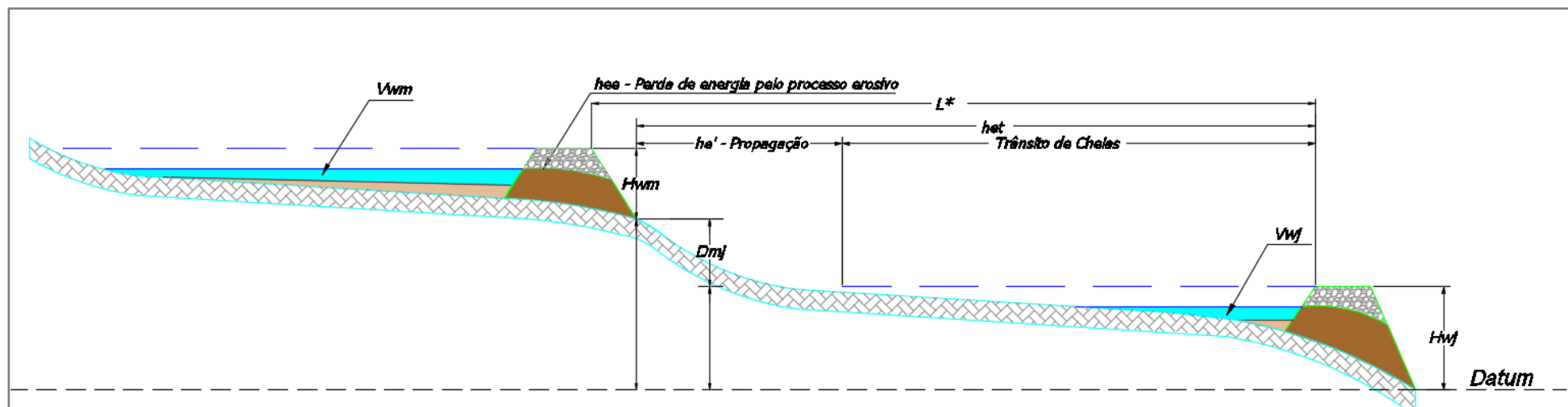
As parcelas de energia envolvidas nas formações de brechas e armazenadas nas barragens podem ser aproximadas pelos seguintes fatores:

- Alturas das barragens (assumidas iguais à altura de armazenamento);  $H_{w_m}$  e  $H_{w_j}$  (m);
- Desnível entre os barramentos de montante e jusante;  $D_{mj}$  (m);
- Volumes armazenados nas barragens;  $V_{w_m}$  e  $V_{w_j}$  ( $m^3$ );
- Os índices  $j$  e  $m$  se referem a jusante ou montante, respectivamente.

A Figura 5.4 ilustra estes fatores de energia em suas posições, sendo estas:

- $h_{ee}$  é a perda de energia (ou de carga) pelo processo erosivo do maciço de montante (m.c.a.);
- $h_{et}$  é perda de energia pela interação entre as partículas sólidas e líquidas, e por eventuais mudanças de regimes, percorrendo o vale a jusante da barragem de montante (m.c.a.);
- $h_e$  é a perda de carga por atrito no trecho entre a barragem de montante e a crista da barragem de jusante (m.c.a.).

A Figura 5.4 ainda ilustra a Distância de Segurança ( $L^*$ ), que é uma distância a jusante de uma barragem onde pode-se construir outra barragem garantindo-se condições seguras para não ocorrer uma ruptura em cascata.



**Figura 5.4:** Fatores de energia envolvidos nas formações de brecha.

Segundo Powledge *et al.* (1989) quando se avalia a hipótese da formação de uma brecha descreve-se este fenômeno em três regimes de fluxo hidráulico e zonas de erosão para a formação de brecha por galgamento. Na região do fluxo subcrítico na crista da barragem, a declividade da linha de energia, as velocidades e as tensões de cisalhamento são relativamente baixas e a erosão ocorrerá somente se os materiais da crista forem altamente erodíveis. Uma transição para o fluxo supercrítico ocorre na porção a jusante da crista. As inclinações da linha de energia e as tensões de cisalhamento são mais altas nesta região, e a erosão é às vezes observada no ponto inicial na borda de jusante da crista.

As pesquisas de Powledge *et al.* (1989), como todas as demais pesquisas sobre brechas de ruptura por galgamento, assumem uma velocidade de trânsito de cheias no reservatório da barragem nula ou muito baixa, como afirmado anteriormente. Porém, no caso da ruptura em cascata esta condição inicial não é válida, pois a chegada da onda de ruptura da barragem de montante levaria a um aumento considerável da declividade da linha de energia, das velocidades e das tensões de cisalhamento.

Considerando o Parâmetro de Formação de Brecha (PFB) como um indicador da energia acumulada, como proposto por Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984):

$$PFB = V_w \cdot H_w \quad (5.1)$$

Embora o PFB seja um parâmetro interessante para avaliar o potencial de formação de brecha em uma ruptura isolada, este não consegue incorporar a energia residual da ruptura da barragem de montante para a barragem de jusante em um sistema de ruptura em cascata, além de não considerar o desnível entre os barramentos.

No caso de rupturas em cascata, os termos da equação (5.1) podem ser multiplicados por  $\gamma_m$  (peso específico médio dos materiais retidos no reservatório, componentes do maciço da barragem e do volume de água liberados durante o evento de ruptura), para torná-la adequada a uma aproximação por meio da energia total contida no reservatório (equação (5.2)) conforme adaptado de Vianna (1997):

$$E = \gamma_m H_w V_w \quad (5.2)$$

Sendo  $E$  na equação (5.2) a energia total (J) associada ao reservatório.

Considerando um referencial de um *datum* (Figura 5.4) no pé da barragem de jusante, pode-se avaliar a energia residual advinda da barragem de montante que atingiria a barragem a jusante pela equação (5.3):

$$\Delta ER_m = \gamma_m (H_{Wm} - h_{ee} - h_{et} - h_{e'} + D_{mj}) V_{Wm} \quad (5.3)$$

Na qual  $\Delta ER_m$  é a variação da energia residual da barragem a montante (J) decorrente da ruptura e propagação da onda de cheia pelo vale de jusante até atingir a barragem de jusante;

A energia que atuará para a formação da brecha na barragem de jusante é dada por:

$$ERB_j = \Delta ER_m + \gamma_m H_{wj} V_{wj} \quad (5.4)$$

Sendo  $ERB_j$  a energia disponível de ruptura da barragem de jusante (J), composta pela variação da energia residual da barragem a montante acrescida da energia contida no reservatório de jusante, a qual será mobilizada para aumentar a formação da brecha de jusante a partir de um gatilho promovido pela chegada da onda de ruptura de montante. A variação da energia residual da barragem a montante é a parcela de energia, convertida em forma de energia cinética, que iniciará e promoverá uma brecha na barragem de jusante. Sendo esta parcela significativa, acredita-se que a brecha resultante na barragem de jusante será maior que aquela obtida a partir de formulações desenvolvidas para rupturas individuais.

Desta forma, pode-se escrever o PFB total a atingir uma barragem de jusante como na equação (5.5), o que pode ser útil quando se desconhece o  $\gamma_m$  a ser determinado para ambas as barragens.

$$PFB_j = (H_{Wm} - h_{ee} - h_{et} - h_{e'} + D_{mj}) V_{Wm} + (H_{Wj}) V_{Wj} \quad (5.5)$$

Apesar das formulações de discretização das parcelas de energia, desenvolvidas acima, a avaliação da ruptura de um conjunto de barragens deve ser procedida por meio de *softwares* hidrológicos ou hidráulicos. Esta formulação adaptada pode ser útil na comparação a valores já indicados na literatura.

Analisando a equação (5.3), é possível perceber que há uma distância de afastamento entre as barragens para a qual a energia de ruptura da barragem de montante será significativamente dissipada até atingir o reservatório da barragem de jusante, tornando as rupturas isoladas ou não ocorrendo condições para a ruptura em cascata:

$$H_{Wm} - hee - het - he' + D_{mj} = 0 \quad (5.6)$$

Portanto, a equação (5.6) leva ao conceito de *Distância de Segurança* ( $L^*$ ), ou seja, para uma determinada barragem existente pode-se avaliar a partir de qual distância a jusante, considerando-se as condições topográficas locais, pode-se construir outra barragem de forma que não sejam formadas condições de ruptura em cascata. Quando a equação (5.6) é nula, a variação da energia residual da barragem a montante não intensificará a formação de brecha na barragem de jusante, embora ainda possa ocorrer devido à insuficiência de seu sistema extravasor quando comparado à magnitude da onda de cheia de ruptura gerada.

Pode-se também deduzir a equação (5.7), onde verifica-se que  $L^*$  deve ser analisado como segue, e deve ser menor ou igual a unidade, para garantia da segurança relacionada ao processo de cascata:

$$L^* = H_T / he \quad (5.7)$$

Na qual:

$$hee + het + he' = he \quad (5.8)$$

$$H_{Wm} + D_{mj} = H_T \quad (5.9)$$

Assim, pode-se evitar a construção de barragens localizadas muito próximas, evitando-se a formação de condições para uma ruptura em cascata. Para isto, podem ser utilizados *softwares* hidrológicos e/ou hidráulicos para avaliar qual a  $L^*$  para cada par de barragens. Outra interpretação da equação (5.3 e da equação (5.4 é que estas são aproximações da energia residual da ruptura da barragem de montante entre barramentos próximos, e quanto mais afastados os barramentos, mais significativo se torna o amortecimento da onda de ruptura de montante no reservatório da barragem de jusante.

Conceitualmente, pode-se afirmar que a energia da onda de ruptura da barragem de montante depende principalmente dos parâmetros:

- Volume da barragem de montante (m<sup>3</sup>);
- Volume para amortecimento da barragem de jusante (m<sup>3</sup>);

- Altura da barragem de montante (m);
- Desnível entre as barragens de montante e jusante (m);
- Distância entre os barramentos (m).

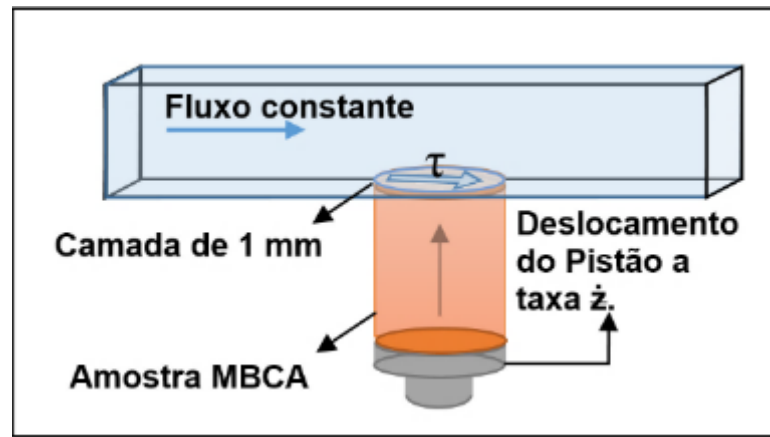
Como estes parâmetros variam para cada par de barramentos em análise a possibilidade da ocorrência da ruptura em cascata deve ser individualizada, como proposto, para quaisquer pares de barragens. Desta forma, são estes os principais parâmetros a serem representados nos modelos reduzidos em laboratório, os quais foram elaborados com uso do material desenvolvido (MBCA).

#### **5.4 Material Utilizado - MBCA**

A modelagem física em laboratório pode ser utilizada para representar fenômenos que ocorrem em estruturas hidráulicas, tais como canais e barragens. Para representar barragens, os fenômenos mais reproduzidos em modelos físicos reduzidos, são as rupturas hipotéticas de maciços, com a verificação de formação de brecha como proposto por Saliba (2009).

Como afirmado anteriormente, adotou-se a opção de um material que não se incorpore ao fluxo e possa ser captado antes de entrar no sistema de bombas, para compor os maciços dos barramentos. O componente principal deste material é um granulado de borracha produzido comercialmente pela moagem e reciclagem de pneus diversos (Granulado Borracha Malha 10 SC 11) ao qual são acrescidas taxas de cimento de acordo com a resistência ao cisalhamento que se queira atingir.

Porém, as taxas mais adequadas de cimento na MBCA devem ser testadas para representar as taxas de erosão similares àquelas de um solo em estudo. Assim, foi adaptado de Briaud *et al.* (2001) um aparato para esta finalidade como demonstrado na Figura 5.5.



**Figura 5.5:** Arranjo esquemático para determinação de taxa de erosão.

Fonte: Adaptado de Briaud *et al.*, 2001.

Inicialmente as formulações apresentadas por Briaud *et al.* (2001) demonstram que a tensão crítica de arraste é linearmente proporcional ao  $d_{50}$  de um solo. Conforme Briaud *et al.* (2001) as formulações foram desenvolvidas para solos que não possuem ação de outras forças que não o atrito entre os grãos, ou seja, para solos granulares tipo areia e pedrisco.

Porém, para esta pesquisa, o material difere do material ensaiado por Briaud *et al.* (2001), pois se trata de um material com características distintas (MBCA) com uma coesão simulada pelo efeito aglomerante do cimento adicionado.

O objetivo da pesquisa é desenvolver testes em um aparato adaptado, inspirado no equipamento descrito por Briaud *et al.* (2001), e obter taxas reais de erosão da MBCA, as quais são representações das taxas de erosão de solos sobre efeitos de uma tensão cisalhante promovida por um fluxo constante. O fluxo constante erosivo pode ser devido às turbulências que ocorrem em pilares de pontes, como descrito no próprio texto de Briaud *et al.* (2001), ou como ocorre em processos de erosões de maciços de barragens, como descrito por Saliba (2009).

O uso deste aparato em detrimento de outros ensaios, tais como Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961), decorre da praticidade, pois o volume da amostra é reduzido (cerca de 300 mL), como pela flexibilidade em atingir velocidades de escoamento compatíveis com as velocidades de escoamento observadas em rupturas, que podem atingir dezenas de metros por segundo. Embora se trate de um dispositivo em conduto forçado, as pressões no teste são mantidas inferiores a 1 m.c.a, pois se utilizam bombas centrífugas que produzem grandes vazões para baixas alturas manométricas ( $n = 1.750$  rpm).

Estas taxas de erosão do composto MBCA foram determinadas para várias vazões, de forma que sua aplicação em outros modelos físicos reduzidos seja representativa destas várias condições hidrodinâmicas. Foram utilizadas as vazões entre 17,6 e 68,0 m<sup>3</sup>/h, e sempre que possível procurou-se verificar as condições para vazões em torno de 20, 30, 40, 50 e 60 m<sup>3</sup>/h.

O mecanismo de teste de erosão desenvolvido, o *Erosion Function Apparatus (EFA)*, utiliza amostras de solo em tubos de paredes finas para gerar uma taxa de erosão e de esforços cisalhantes por meio do fluxo d'água passante em determinada velocidade (BRIAUD *et al.*, 2001). A partir dos princípios utilizados para seu funcionamento, foi reproduzido um aparato de erosão semelhante no CPH/UFMG, no qual foram realizados os experimentos desta pesquisa.

Para a realização do teste de erosão o aparato apresenta uma caixa retangular com dimensões transversais de 9,63 cm de largura e 7,88 cm de altura, possuindo 18,30 cm de comprimento, revestidas lateralmente por acrílico, para ser possível a visualização e monitoramento do teste. A água captada em um reservatório, com ajuda de duas bombas ligadas em paralelo, é conduzida ao aparato e retorna para o mesmo reservatório, concluindo assim, um circuito fechado. Na parte inferior dessa caixa, está localizado um furo que permite introduzir um tubo de ensaio com diâmetro interno de 40,0 mm, no qual a amostra a ser testada (Corpo de Prova - CP) é inserida, com utilização de um pistão (CAMPOS *et al.*, 2018a).

Devido às características elásticas do material a ser ensaiado (MBCA), foram necessárias as seguintes etapas para promover a expulsão de vazios do material e elaborar os CPs (CAMPOS *et al.*, 2018a):

- Pesa-se uma parcela de borracha granulada (em torno de 130 g);
- Pesa-se uma parcela de cimento (em taxas crescentes para cada CP);
- Promove-se a mistura da borracha granulada e do cimento previamente pesado em recipiente fechado;
- Procede-se a umidificação da amostra (verificando-se que não pode haver excesso que cause escorrimento de água ou formação de poças no fundo da amostra);
- Preliminarmente a compactação, ou adensamento das amostras no tubo de ensaio, é necessário lubrificar a superfície interna do tubo, para que a rugosidade desta superfície

não gere atrito e dificulte o deslocamento da amostra, levando a possíveis fissuras ou fragmentação da amostra durante o ensaio;

- O material MBCA é colocado, para ser compactado ou adensado, em três camadas nos tubos de ensaio, que possuem 40,0 mm de diâmetro interno e 165,0 mm de altura média;
- Cada camada é compactada por uma carga dinâmica padrão de 1 kg com uma altura de queda de 10,0 cm com 10 golpes cada camada, com o pistão que cobre toda a área do tubo de ensaio;
- Entre cada camada é feita uma escarificação, da camada anterior, para conectar as camadas e se evitar um plano de ruptura;
- As amostras são mantidas em uma câmara úmida durante 24 horas para promover a cura do cimento.

Estas etapas permitem expulsar o excesso de ar que preenche os vazios e acomodar as partículas, ainda ocupá-los por água e cimento, qualificando os CPs a uma melhor performance para o ensaio.

Para o ensaio tipo adensado as etapas são as mesmas, exceto que se substituiu a compactação por:

- A amostra é adensada em três camadas por uma carga dinâmica do pistão, o qual pesa exatamente 206 gramas, com 10 golpes de uma altura de aproximadamente 10 cm, sem utilizar outra carga de compactação e sem o operador exercer carga alguma;

O procedimento de condução do ensaio do CP é feito cumprindo-se as seguintes etapas:

- Mede-se a altura efetiva do corpo de prova a ser inserido no *EFA*, descontando-se a altura não ocupada pela MBCA ( $h'$ );
- Coloca-se o tubo de ensaio do CP anteriormente produzido no pistão do aparato, com posterior fixação das peças de encaixe;
- Estabelecimento de uma vazão constante, levando a uma tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) constante;

- Inicia-se a contagem do tempo;
- Imprime-se uma velocidade constante ao mecanismo de ascensão do CP, inserindo-o no tubo de ensaio, de forma que sempre haja uma camada uniforme de 1 mm a ser erodida;
- Terminada a erosão completa do corpo de prova finda-se a contagem do tempo.

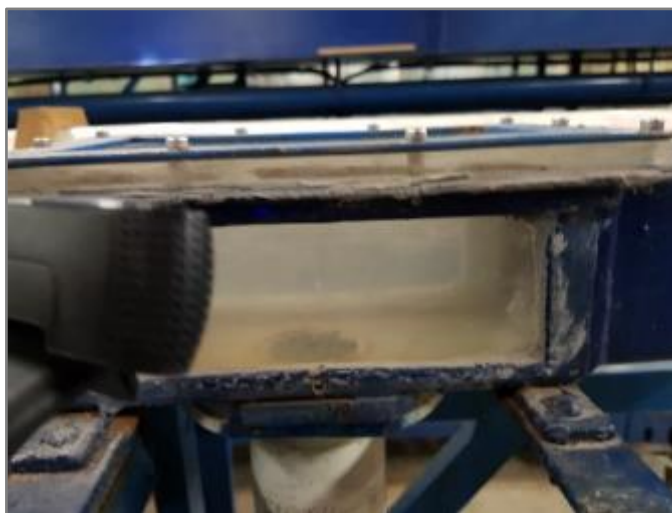
É importante lembrar que tais etapas deverão ser mantidas quando da utilização da MBCA em modelos reduzidos em escala.

Finalizado o ensaio pode-se determinar a taxa de erosão média das amostras ( $\dot{z}$ ) dividindo-se a altura total ( $h$ , em mm) pelo tempo total de erosão de cada corpo de prova ( $t$ , em horas), conforme a equação (5.10 (BRIAUD *et al.* 2001), com resultados em mm/h.

$$\dot{z} = \frac{h}{t} \quad (5.10)$$

Segundo Briaud *et al.* (2001) este procedimento deve ser feito cuidadosamente, pois as taxas de erosão são de complexa determinação, notadamente para os solos coesivos, como argilas, sendo inclusive observado para estes solos, sobre efeitos de fluxos constantes, que fenômenos de soltura de pequenos blocos de 1 cm<sup>3</sup> podem ocorrer, caso existam nas superfícies aparente destes solos fissuras que promovam o início deste fenômeno.

Para o caso específico desta pesquisa este mesmo fenômeno é observado se a velocidade de inserção do CP dentro do fluxo levar a uma altura superior a 1 mm, com desagregação de um bloco da amostra e, assim, a erosão não é representativa de um efeito hidráulico superficial constante (CAMPOS *et al.*, 2018a). A Figura 5.6 ilustra o processo de ensaio.



**Figura 5.6:** Processo de simulação da taxa de erosão (CAMPOS *et al.*, 2018a).

O cálculo da tensão de cisalhamento,  $\tau$ , foi procedido de acordo com a equação (5.11):

$$\tau = \frac{1}{8} f \rho V^2 \quad (5.11)$$

Na qual:

- $\tau$  é a tensão de cisalhamento causada pelo escoamento (Pa);
- $f$  é o fator de atrito, obtido do ábaco de Moody (adimensional), o qual é função do número de Reynolds e da rugosidade específica do tubo ( $\varepsilon/D$ );
- $\rho$  é a massa específica da água, adotada igual a 998,0 kg/m<sup>3</sup>;
- $V$  é a velocidade média na seção (m/s).

Quando as forças de arraste impostas pelo escoamento, caracterizadas por uma tensão cisalhante, superam as forças agregadoras providas pelo cimento entre as partículas do granulado de borracha e o peso submerso das partículas de borracha, ocorre então a remoção destas partículas ao longo do CP inserido no *EFA*.

Para que fosse possível comparar estes resultados com os resultados publicados por outros pesquisadores, como Briaud (2001), Briaud *et al.* (2007), Briaud (2008), Briaud *et al.* (2008) e Mantovanelli *et al.* (2017) foram utilizadas relações de análise dimensional e de semelhança hidráulica, como pode ser desenvolvido a partir da bibliografia técnica, como em Giles (1992).

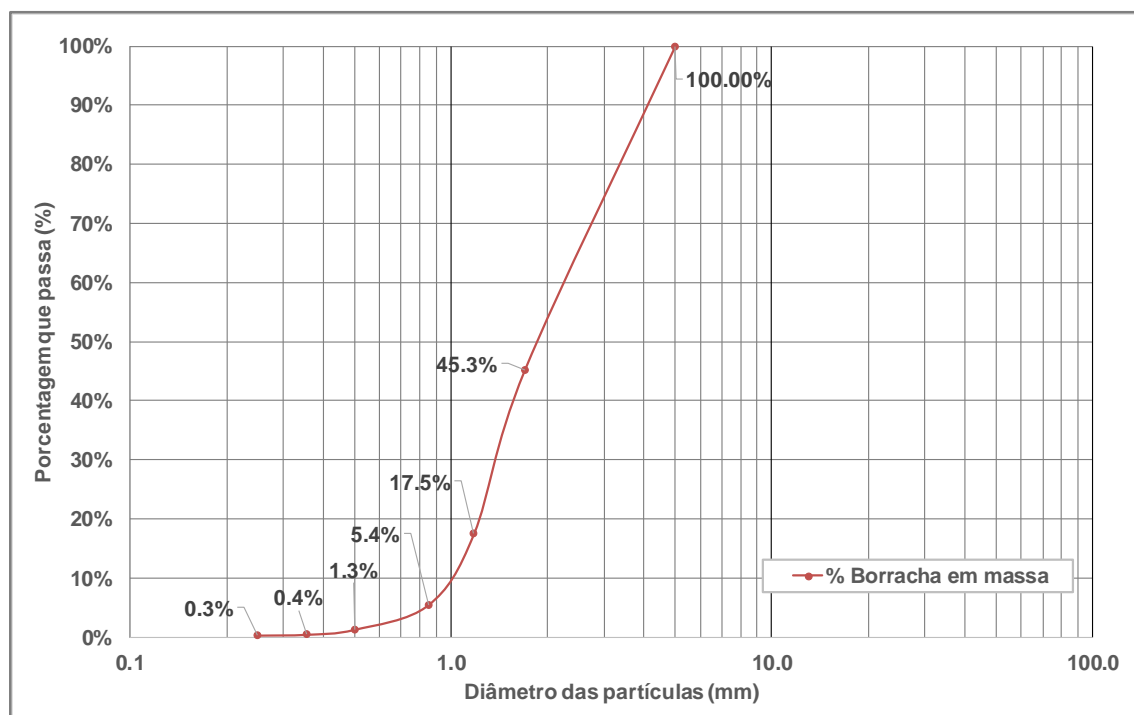
### 5.4.1 Granulometria da MBCA

Foi desenvolvido um ensaio de granulometria com uma amostra de 721,0 g do material de granulado de borracha, para conhecimento de suas dimensões características. Os resultados se encontram nas curvas granulométricas da Tabela 5.1 e na Figura 5.7.

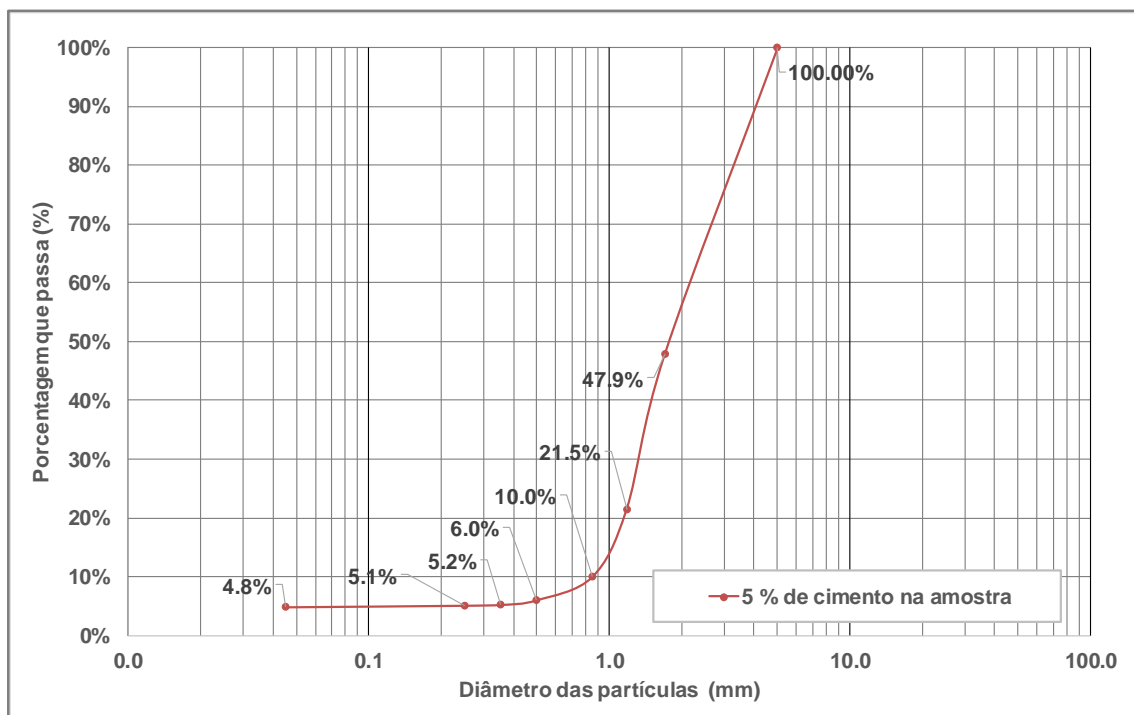
Para ilustrar como esta curva pode se alterar pela adição de cimento foram desenvolvidas as curvas granulométricas para misturas de borracha moída e cimento a 5% e 10% de adição de cimento em massa (Figura 5.8 e a Figura 5.9), considerando que a dimensão característica do cimento seja 45  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 5.1-** Ensaio de granulometria do granulado de borracha.

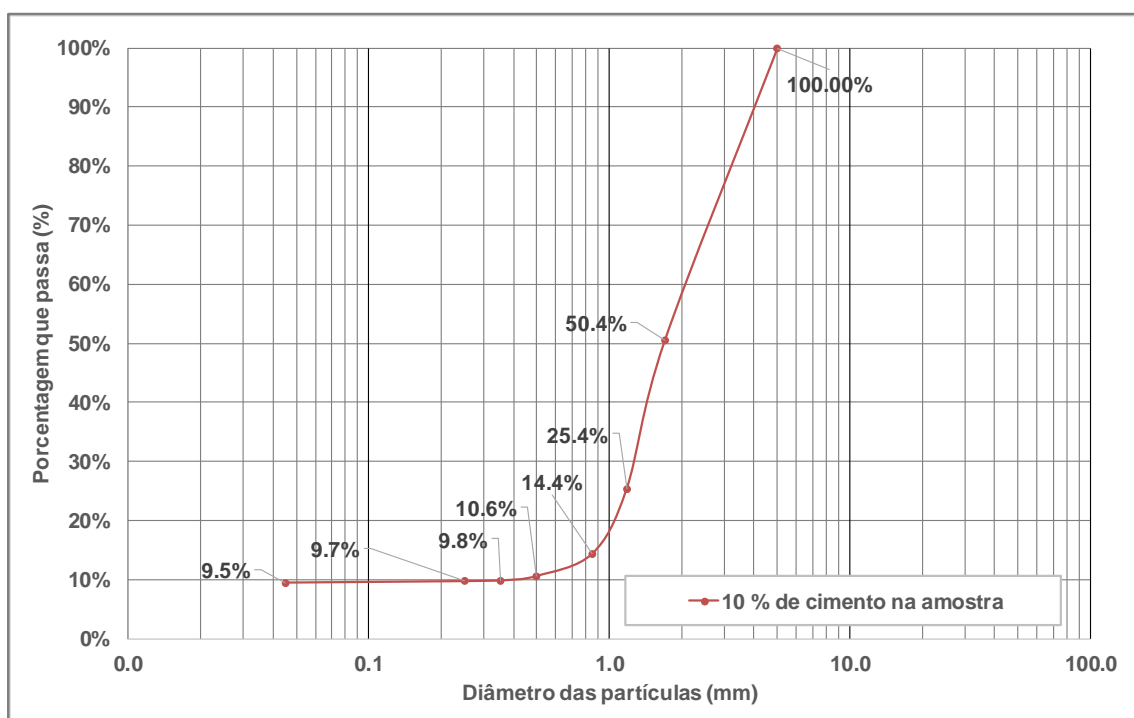
Peneira	Quantidade Retida (g)	Abertura malha (mm)	% Retida	% Passada
		5,000	0,00%	100,00%
# 1,70 mm (ABNT 12)	393,0	1,700	54,7%	45,3%
# 1,18 mm (ABNT 14)	199,0	1,180	27,7%	17,5%
# 850 $\mu\text{m}$ (ABNT 20)	87,0	0,850	12,1%	5,4%
# 500 $\mu\text{m}$ (ABNT 35)	30,0	0,500	4,2%	1,3%
# 355 $\mu\text{m}$ (ABNT 45)	6,0	0,355	0,8%	0,4%
# 250 $\mu\text{m}$ (ABNT 60)	1,0	0,250	0,1%	0,3%
# 45 $\mu\text{m}$ (ABNT 326)	2,0	0,045	0,3%	0,0%



**Figura 5.7:** Curva granulométrica da borracha – sem cimento.



**Figura 5.8:** Curva granulométrica da mistura borracha e cimento (5% em massa).



**Figura 5.9:** Curva granulométrica da borracha e cimento (10% em massa).

Considerando as equações de escala apresentadas, esse material pode ter tamanho real entre 4,5 mm e 170,0 mm e pôde ser classificado como uma mistura de areia, cascalho e pedra de mão,

que são materiais presentes em muitas barragens. O material da borracha granulada tem um peso específico de 1,30 g/cm<sup>3</sup>.

#### 5.4.2 Energia de compactação da MBCA

Como descrito no item 5.4 para a análise das taxas de erodibilidade da MBCA, nos CPs do *EFA*, e para a construção dos maciços dos modelos reduzidos, foi necessário a compactação, ou adensamento pela redução dos vazios entre os grãos, permitindo melhor rearranjo entre estes, com maior contato com o material cimentício.

A energia de compactação pode ser definida por (PINTO, 2006):

$$E_c = \frac{MHN_gN_c}{V} \quad (5.12)$$

Na qual:

- $E_c$  é a energia de compactação (kg/cm<sup>2</sup>);
- $M$  é a massa do soquete (kg);
- $H$  é a altura de queda do soquete (cm);
- $N_g$  é a número de golpes por camada;
- $N_c$  é a número de camadas;
- $V$  é a Volume do solo compactado (cm<sup>3</sup>).

A análise dimensional entre as energias de compactação utilizadas para desenvolver os CPs (que foram testados no *EFA*) e entre um ensaio de Proctor Normal, e entre os CPs (que foram testados no *EFA*) e os modelos reduzidos construídos no canal, pode ser dada pela equação:

$$E_{cr} = \frac{M_r H_r N_{gr} N_{cr}}{V_r} \quad (5.13)$$

Os termos com índice  $r$  na equação (5.13) indicam a relação entre modelo e protótipo, entre as abordagens possíveis (CPs (testados no *EFA*) e ensaio de Proctor Normal, e CPs e os modelos reduzidos).

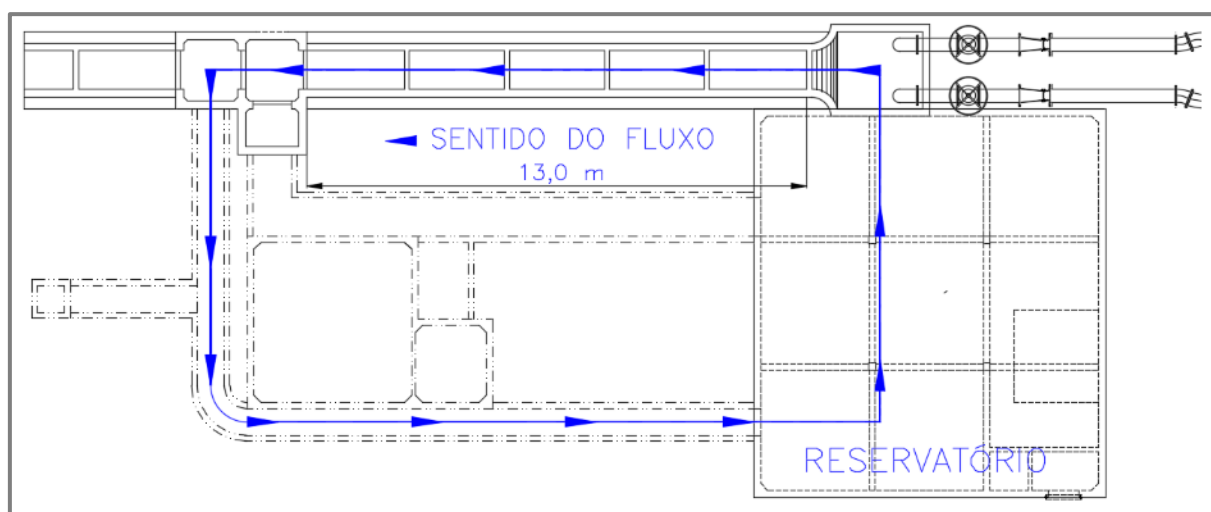
Nesta pesquisa procurou-se relacionar a energia de compactação utilizada na MBCA para os CPs com a energia utilizada pelo operador para compactar o mesmo material no momento de modelar os maciços dos modelos reduzidos, considerando-se as relações da equação (5.13), de forma a se manter similaridades de escala entre o modelo (CP) e o protótipo (modelos reduzidos), permitindo-se calibrar a taxa de cimento na MBCA.

Contudo, o material MBCA possui propriedades elásticas o que torna o processo de compactação não muito eficiente, somente favorecendo a acomodação entre os grãos da borracha. Não foi possível realizar um controle de compactação da MBCA, sendo esta uma limitação da pesquisa.

### 5.5 Simulações do Modelo Reduzido em Laboratório

Preliminarmente às simulações dos cenários definitivos foi desenvolvido um modelo matemático unidimensional em regime transitório utilizando-se os dados obtidos com a simulação dos barramentos do cenário I P (preliminar), utilizando o *software* HEC-RAS 5.0.7, para verificar as condições de velocidades e tensões de arraste durante a formação de brecha em cascata, permitindo-se correlacionar estes parâmetros com aqueles encontrados nos ensaios da MBCA no *EFA*, com o objetivo de calibrar e validar a taxa de cimento por massa a ser utilizada na MBCA para estes demais ensaios.

Os modelos reduzidos foram desenvolvidos no laboratório de hidráulica da UFMG, CPH, no canal apresentado na Figura 5.10, a qual indica o sentido do fluxo e as dimensões do trecho em que foram inseridos os modelos dos barramentos.



**Figura 5.10:** Canal utilizado para ruptura de modelos reduzidos de barramentos em cascata.

Trata-se de um canal de seção quadrada com 1,0 m de base por 1,0 m de altura. O desenvolvimento do trecho útil do canal para as simulações ocupa 13,0 m, por onde as vazões o percorrem longitudinalmente, e este trecho fica entre duas caixas, uma a montante para entrada e regularização da vazão, e outra a jusante para captação e retorno ao reservatório do caudal à bomba.

Devido às dimensões deste canal pôde-se testar os modelos na escala 1:100, onde procurou-se ajustar a mesma escala para todas as dimensões, sempre que possível, sendo estas as alturas, larguras, bases e declividades dos barramentos, e variar a distância entre os barramentos para avaliar o efeito da distância a ser percorrida pela onda de ruptura.

As construções dos modelos reduzidos neste canal, para avaliar a ruptura em cascata, seguiram uma metodologia similar àquela descrita no item 5.4, que descreve o método de camadas da MBCA nos CPs de ensaio, ou seja, o maciço foi construído em camadas com o material pesquisado (MBCA) de alturas de 4 cm +/- 1 cm e compactadas conforme descrito anteriormente. Para a mistura e homogeneização do material foi utilizada uma betoneira de 150 L de capacidade nominal e 70 L de capacidade efetiva.

O canal foi previamente revestido com uma fita adesiva de cor preta (para permitir o escaneamento, pois cores transparentes e translúcidas causam deformações nas imagens do *Scan 3D*) com superfície rugosa para fixação dos modelos no local correto e evitar o translado dos modelos em relação ao canal, devido ao empuxo exercido pela água dos reservatórios durante os ensaios. A Figura 5.11 exemplifica as condições de um dos cenários elaborados durante a pesquisa. Cada teste foi preparado com um período de 24 horas de antecedência, para promover condições similares aos CPs da MBCA ensaiada no *EFA*.

Durante os testes preliminares verificou-se que o material da MBCA era muito permeável, o que conduzia a processos de elevado gradiente freático com formação de ruptura por *piping*, e foram diversas as tentativas de se desenvolver uma técnica para impermeabilizar o paramento de montante, sem adicionar mais resistência aos maciços das barragens senão aquela devida ao cimento da MBCA. Assim, por tentativas, chegou-se a uma técnica de pulverização de água seguida de pulverização de argila em pó, formando uma camada extremamente fina (cerca de 3 mm, Figura 5.11) sem resistência perceptível, mas que impede que ocorra fluxo freático e sua danosa consequência de formar *piping* durante o ensaio, sendo que esta pesquisa tem foco nos processos de galgamento.



**Figura 5.11:** Modelos de barragens em cascata preparados no canal.

## **5.6 Análises a Partir dos Parâmetros das Brechas**

A altura de uma barragem é indicativo da energia potencial armazenada e o volume é indicativo da reserva de energia e, segundo MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), verificou-se que o PFB, quando utilizado para avaliar o volume de material removido na brecha durante a ruptura, resultaram em uma dispersão mínima entre os dados analisados naquela pesquisa, sendo que esta variável apresenta uma consistência razoável para prever o volume da brecha, e para a vazão de pico.

Hagen (1982, *apud* MacDonald e Langridge-Monopolis, 1984) utilizou uma relação entre os volumes contidos nas barragens e suas alturas, de forma muito similar à desenvolvida por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), e obteve resultados similares a estes, com boas correlações.

Desta forma, pretende-se mensurar as brechas, as quais foram geradas nos modelos reduzidos, por meio de escaneamento 3D, obtendo seus parâmetros principais, sendo estes; geométricos (largura, altura e inclinação dos taludes laterais) e de tempo de formação, para cada um dos 3 cenários desenvolvidos, como exposto no item 6.2. Com estes dados obtidos pôde-se correlacionar as variações destes parâmetros (geométricos e de tempo) com as variáveis entre os diversos cenários (distância entre os barramentos, diferentes volumes armazenados e

diferentes alturas), correlacionar as larguras e os tempos de formação das brechas de jusante comparadas as de montante, e finalmente obter uma proposta de correção das equações de brecha para barragens em cascata.

### 5.6.1 Levantamento 3D das geometrias dos modelos

O recurso utilizado para o levantamento das geometrias dos barramentos, para as condições dos barramentos pré e pós-ruptura, foi o uso de um sensor de escaneamento 3D, o 3D *Scan* (*Microsoft Corporation*).

#### 5.6.1.1 Tecnologia de câmera de detecção de profundidade

O presente estudo utilizou a tecnologia de câmeras de detecção de profundidade. Segundo Marinello *et al.* (2015) este sensor inclui um emissor laser infravermelho, uma câmera infravermelha e uma câmera RGB. Aqueles pesquisadores descrevem que a informação de profundidade é obtida através de um processo de triangulação. Uma grade de difração divide o laser infravermelho em um determinado padrão que é projetado na cena. O padrão é coletado pela câmera infravermelha e comparado com o projetado. Os deslocamentos locais geram um mapa de disparidade, onde os valores de deslocamento maiores correspondem a posições mais distantes do sensor e, inversamente, valores menores correspondem a posições mais próximas do sensor. A Figura 5.12 apresenta um arranjo dos sensores componentes do Kinect II, utilizado nesta pesquisa.

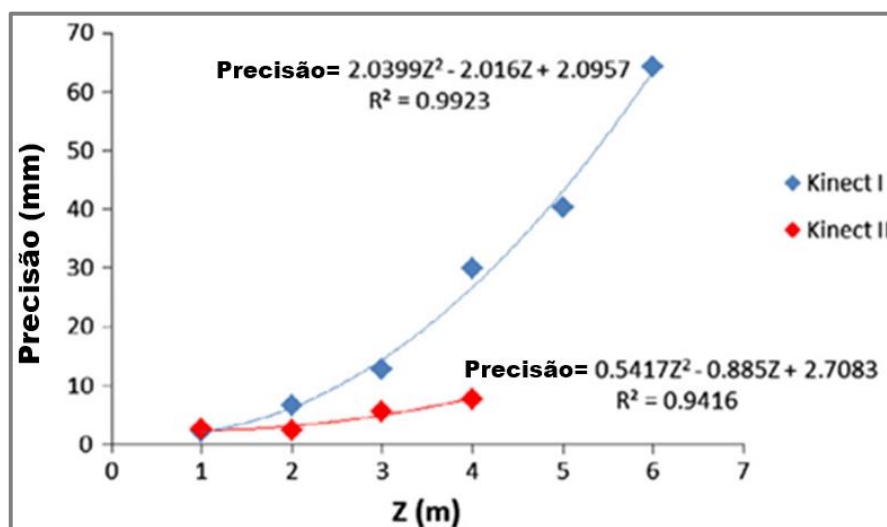


**Figura 5.12:** Scanner a laser Kinect II com câmera RGB, sensor IR e Iluminador infravermelho.

Fonte: Gonzalez *et al.* (2015).

Segundo Gonzalez *et al.* (2015) o Kinect II apresenta uma precisão variando entre 0,3 mm, para alcance de 1,0 m, a 7,5 mm, para alcance de 4,0 m. A faixa de alcance desta pesquisa se situa entre 1,0 e 2,0 m, conforme dispositivo elaborado para permitir o escaneamento dos maciços dos modelos reduzidos. Assim, verifica-se da Figura 5.13, que a precisão de levantamento pode variar entre 0,3 mm e 0,4 mm para esta pesquisa.

A partir das imagens escaneadas podem ser feitas medições diretas das propriedades geométricas destas, principalmente a largura da brecha formada e a declividade dos taludes laterais, e avaliações qualitativas a partir das feições geométricas constantes das figuras 3D.



**Figura 5.13:** Tendência de precisão com alcance para Kinect I e Kinect II.

Fonte: Adaptado de Gonzalez *et al.* (2015).

### 5.6.2 Fatores escalares

Os processos erosivos envolvidos em rupturas de barragens homogêneas em solo compactado por galgamento apresentam condições de escoamento turbulentas com velocidades elevadas na zona de erosão (parte da crista e talude de jusante). As excessivas tensões cisalhantes impostas pelo escoamento ao material do maciço são responsáveis pela erosão. Estas tensões estão associadas ao peso específico do fluido e às perdas de carga, portanto, às velocidades de escoamento. As velocidades, por sua vez, são resultantes do processo de conversão entre energia potencial em cinética, descontadas as perdas de energia (ou de carga). Portanto, a semelhança hidráulica pode ser obtida mantendo-se as mesmas relações entre forças inerciais (relacionadas à velocidade de escoamento, portanto, à energia cinética) e gravitacionais (relacionadas à energia potencial do escoamento), pela manutenção do número de Froude (Fr).

Neste caso, como demonstrado em Novak *et al.* (2010) as vazões entre os modelos e as dimensões dos protótipos, para um modelo homogêneo, leva à equação (5.14):

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = L_r^{2,5} \quad (5.14)$$

Na qual;

- $Q_r$  é o fator de escala para vazão;
- $Q_m$  é a vazão no modelo (m<sup>3</sup>/s);
- $Q_p$  é vazão no protótipo (m<sup>3</sup>/s);
- $L_r$  é o Fator de Escala.

Para planejar os experimentos, foram procedidas simulações preliminares em software hidrológico HEC-HMS 4.2.1 com dados das bacias hidrográficas das barragens de montante e de jusante, fontes inspiradoras desta pesquisa, para determinar a faixa de vazões extremas possíveis de ocorrer durante evento de ruptura que devem ser simuladas nos modelos reduzidos. Os resultados se encontram na Tabela 5.2.

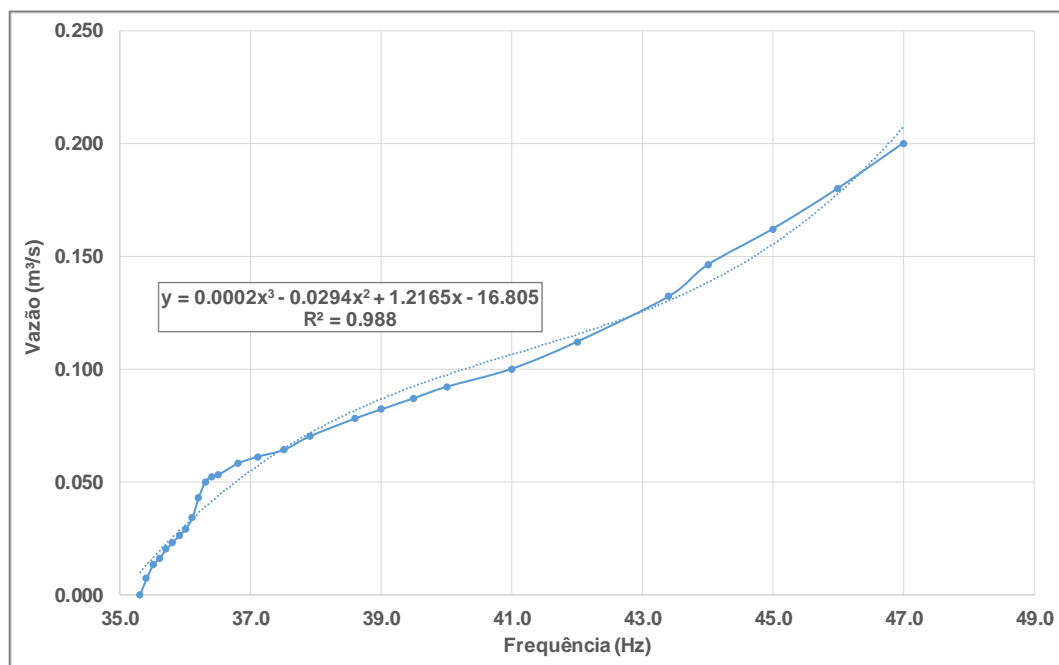
**Tabela 5.2-** Faixa de vazões simuladas e faixa de vazões para o modelo reduzido.

Vazões obtidas em simulação hidrológica (m <sup>3</sup> /s)	Vazão para o modelo reduzido ( $Q_r$ ) (m <sup>3</sup> /s)
2500	0,025
1500	0,015

Para o acionamento das bombas do canal do CPH foi determinada uma curva de vazões, de acordo com a operação do inversor que é utilizado para acioná-las, com um medidor de vazão ultrassônico instalado na tubulação que interliga as bombas ao reservatório de montante do canal, onde foram desenvolvidos os modelos físicos reduzidos. A Tabela 5.3 apresenta as leituras da frequência, da potência e das vazões, registradas no dia 26 de setembro de 2018, e o gráfico da Figura 5.14 apresenta as curvas destes pontos registrados, com uma curva de regressão cúbica, evidenciando uma razoável correlação entre as variáveis. Verifica-se na Tabela 5.3 que a faixa de operação desta pesquisa se situa entre 35,5 e 35,8 Hz.

**Tabela 5.3-** Variação da vazão com a frequência e com a potência.

Frequência (Hz)	Potência (W)	Leitura medidor de vazão ultrassônico (m <sup>3</sup> /s)
35.3	58.83	0.000
35.4	59.00	0.007
35.5	59.17	0.013
35.6	59.33	0.016
35.7	59.50	0.020
35.8	59.67	0.023
35.9	59.83	0.026
36.0	60.00	0.029
36.1	60.17	0.034
36.2	60.33	0.043
36.3	60.50	0.050
36.4	60.67	0.052
36.5	60.83	0.053
36.8	61.33	0.058
37.1	61.83	0.061
37.5	62.50	0.064
37.9	63.17	0.070
38.6	64.33	0.078
39.0	65.00	0.082
39.5	65.83	0.087
40.0	66.67	0.092
41.0	68.33	0.100
42.0	70.00	0.112
43.4	72.33	0.132
44.0	73.33	0.146
45.0	75.00	0.162
46.0	76.67	0.180
47.0	78.33	0.200



**Figura 5.14:** Curva de variação da vazão com a frequência do inversor.

As dimensões dos modelos reduzidos, largura, altura e comprimento, foram deduzidas diretamente das equações (5.15 a (5.17:

$$h_r = L_r \quad (5.15)$$

$$W_r = L_r \quad (5.16)$$

$$x_r = L_r \quad (5.17)$$

Sendo  $h_r$ ,  $W_r$  e  $x_r$ , nestas equações, iguais à profundidade, largura e comprimento (m), respectivamente, conforme apresentado por Julien (2002).

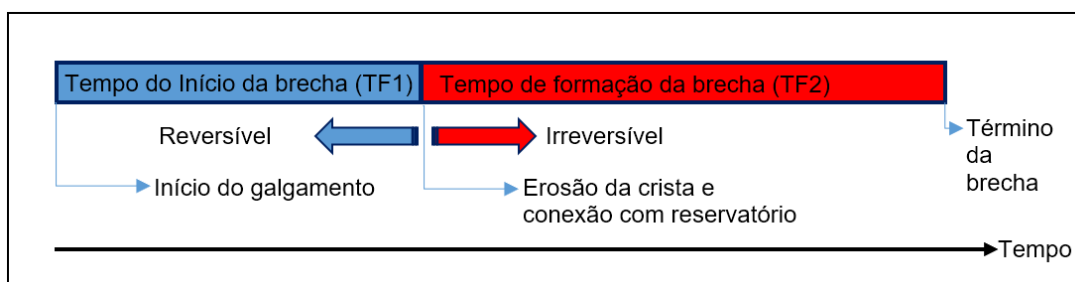
A avaliação do tempo de formação de brecha, entre os modelos e os protótipos, pode ser realizada por (JULIEN, 2002):

$$t_r = \sqrt{L_r} \quad (5.18)$$

Na qual  $t_r$  é o tempo de formação de brecha em análise.

Para a determinação dos períodos que definem as fases que envolvem a formação completa da brecha, nesta pesquisa, adota-se a definição de Wahl (1998, 2004) e conforme a Figura 5.15:

- Tempo do início da brecha: começa com o primeiro fluxo sobre ou através de uma barragem, o que iniciará o alerta, a evacuação ou uma eminente conscientização da falha potencial da barragem. O tempo de início da brecha termina no início da fase de formação da brecha. Este é o intervalo de tempo onde pode-se atuar para impedir a evolução da brecha (reversível - TF1);
- Tempo de formação da brecha: é a duração de tempo entre a primeira formação de brecha na face a montante da barragem, até que a brecha seja totalmente formada. Para as brechas por galgamento o tempo de formação da brecha é considerado após ocorrer erosão na face de jusante da barragem, e quando esta erosão alcança a crista, resultando na conexão com o reservatório da barragem na face a montante, onde já não se pode atuar para impedir a evolução da brecha (irreversível - TF2).



**Figura 5.15:** Tempos de início e de formação de brecha.

### 5.6.3 Filmagem e análise temporal de formação das brechas

Antes das realizações dos ensaios são fixadas e ligadas simultaneamente duas câmeras (Logitech modelo C920 1080p full HD) conforme Figura 6.2, cada uma filmando um barramento individualmente, para que se crie o registro da evolução temporal das brechas, antes, durante e após os eventos de ruptura, os quais foram analisados posteriormente, para definição dos tempos de formação das brechas.

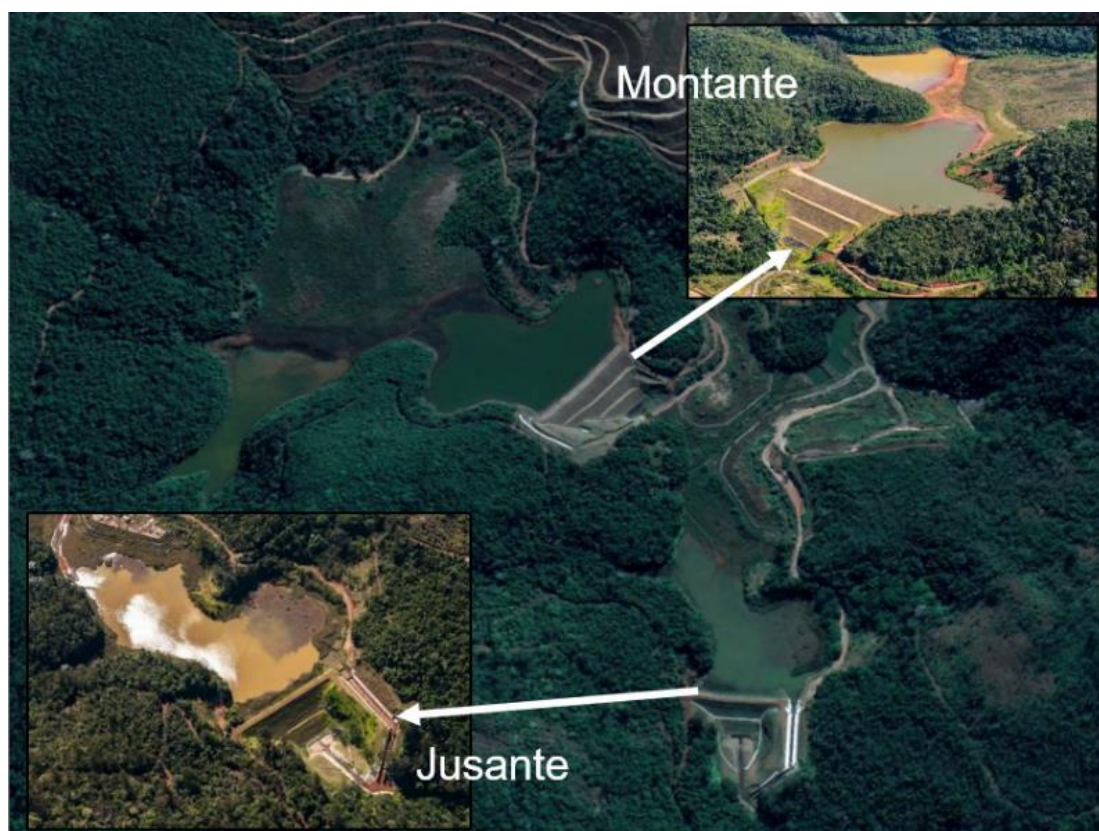
As filmagens foram analisadas utilizando-se o *software* Kinovea 8.27 para estimar indiretamente pelas imagens a largura média das brechas, após os ensaios preliminares, permitindo-se definir a evolução temporal das larguras destas, para serem utilizadas como dados no modelo HEC-RAS 5.0.7, com a finalidade de calibrar a porcentagem de cimento na MBCA para os próximos cenários de testes, uma vez que foi necessária a calibração de cimento entre os ensaios procedidos no *EFA*, com os CPs em condutos forçados, e os ensaios procedidos no canal aberto.

Para manipulação, tratamento, consistência e obtenção dos dados dos barramentos escaneados foi utilizado o *software* MeshLab v2016.12.

## 6 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE RUPTURA EM CASCATA

Uma das possibilidades de aplicação de ruptura em cascata são as barragens descritas a seguir, que se situam em Minas Gerais. Estas barragens foram escolhidas devido ao arranjo dos seus reservatórios. A Figura 6.1 apresenta uma imagem de satélite com detalhes de cada uma das barragens utilizadas como exemplo de aplicação. Tratam-se de barragens de contenção de rejeito de mineração, e estas serão aqui nomeadas barragens de montante e jusante. Estas barragens serviram de fonte de inspiração para a avaliação das rupturas em cascata e foram procedidas alterações das principais variáveis que determinam a formação da brecha a jusante, a saber:

- Distância entre os barramentos;
- Volume dos reservatórios.



**Figura 6.1:** Vista panorâmica das barragens.

Fonte: Google Earth (Acesso: 16/04/2019).

### 6.1 Caracterização das Barragens

A seguir são listados os principais dados das barragens de montante e de jusante, que foram utilizados para embasar os modelos reduzidos, na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1-** Dados característicos das barragens modeladas.

Parâmetro	Barragem de montante	Barragem de jusante
Elevação da crista <sup>1</sup> (m):	688,0	660,7
Elevação da fundação no eixo da barragem <sup>1</sup> (m):	657,0	637,2
Altura da barragem <sup>1</sup> (m):	31,0	23,5
Largura da barragem <sup>2</sup> (m):	201,0	134,0
Comprimento da barragem <sup>2</sup> (m):	135,0	81,0
Volume do reservatório <sup>1</sup> – V <sub>w</sub> (m <sup>3</sup> ):	800.200	400.000
Fator de Formação de Brecha (1.000 m <sup>3</sup> .m):	24.806	9.400
SI (m <sup>3</sup> /m):	25.813	17.021
Tempo de formação de brecha Froehlich <sup>3</sup> (min.):	9,7	9,1
Tempo de formação de brecha <sup>4</sup> (min.):	15,0	15,0
Largura superior da brecha Froehlich (m):	62,2	48,2
Largura média da brecha Froehlich ( $\bar{B}$ ) (m):	31,2	24,7
Largura inferior da brecha Froehlich (m):	0,2	1,2
Altura da brecha Froehlich <sup>3</sup> (m):	31,0	23,5
<i>k</i> <sub>o</sub> Froehlich <sup>3</sup> :	1,3	1,3
Declividade taludes laterais Froehlich <sup>3</sup> (z) (m/m):	1,0	1,0

1 ANM - Agência Nacional de Mineração: Classificação das Barragens de Mineração Brasileiras - Data Base Janeiro/2019: Extração SIGBM para classificação - atualizada em 23.01.2019.

2 Estimado utilizando base em SRTM.

3 Calculado de acordo com Froehlich (2008).

4 Baseado no mínimo tempo de formação de brecha como proposto por Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984).

Considerando a escala para os modelos, 1:100, chega-se ao tempo médio de formação de brecha para a barragem de montante e de jusante de 56 s a partir das formulações propostas por Froehlich (2008).

## 6.2 Cenários de Análise

Considerando as possibilidades geométricas do canal instalado no CPH, procurou-se atender a representatividade geométrica das barragens que inspiraram esta pesquisa, procurando abranger as variáveis envolvidas na ruptura em cascata. Preliminarmente aos cenários definitivos de análise foram desenvolvidos 2 cenários preliminares, para testar os parâmetros, o uso da MBCA e a metodologia de execução dos ensaios, cujos dados são apresentados na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2-** Cenários preliminares para aperfeiçoamento da metodologia.

Cenário	Distância entre as barragens ( $\Delta L$ - cm)	Altura do modelo da barragem de montante (H1 - cm)	Altura do modelo da barragem de jusante (H2 - cm)	Revestimento do paramento barragem de montante	Revestimento do paramento barragem de jusante	Taxa de cimento na MBCA (%)	Vazão ( $m^3/s$ )
I P	196,0	19,0	19,0	Ausente	Argila	5,0	0,020
II P	196,0	29,0	19,0	Argila	Argila	3,0 *	0,020

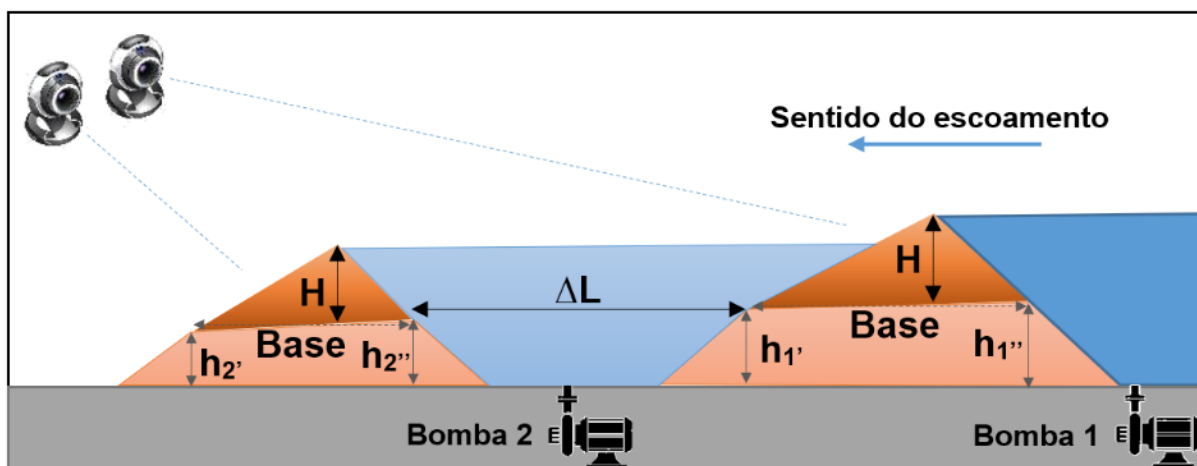
\* - Ensaio procedido com material do maciço reciclado.

A partir da experiência adquirida dos ensaios preliminares e da calibração definitiva da taxa de cimento na MBCA, pôde-se definir 3 cenários de análise definitivos, com três testes para os dois primeiros cenários e um teste para o terceiro cenário. A Tabela 6.3 apresenta as variáveis dos 3 cenários definitivos, sendo estas variáveis a distância entre os barramentos e, conforme a Tabela 6.4, as alturas finais dos barramentos, devido à variação de alturas dos lastros de terreno natural.

**Tabela 6.3-** Cenários definitivos para avaliação da brecha em cascata.

Cenário	Teste	Distância entre as barragens ( $\Delta L$ - cm):	Altura do modelo da barragem de montante (H1 - cm):	Altura do modelo da barragem de jusante (H2 - cm)	Revestimento do paramento barragem de montante	Revestimento do paramento barragem de jusante	Taxa cimento na MBCA (%)	Vazão simulada ( $m^3/s$ )
I	1	203,8						
	2	203,8						
	3	203,8						
II	1	465,0	19,0	19,0	Argila	Argila	4,5	0,016
	2	465,0						
	3	465,0						
III	1	698,0						

Em todos os cenários definitivos as bases das barragens de montante e de jusante possuem comprimentos iguais 81 cm. Para demonstrar como foram alteradas as variáveis dos cenários seguem o esquemático da Figura 6.2 e a Tabela 6.4, com o arranjo dos modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante e com a locação das duas câmeras, para registro simultâneo dos fenômenos durante os ensaios.



**Figura 6.2:** Esquemático de arranjo dos ensaios das barragens em cascata.

As denominações de  $h_1'$ ,  $h_1''$ ,  $h_2'$  e  $h_2''$  da Figura 6.2 se referem as alturas que representam o terreno natural (lastro), a partir do qual se instalam os modelos reduzidos das barragens. Estas alturas estão referenciadas em relação ao fundo do canal utilizado, considerado nivelado e plano. Os valores das alturas  $h_1'$ ,  $h_1''$ ,  $h_2'$  e  $h_2''$  estão listados na Tabela 6.4.

**Tabela 6.4-** Valores de  $h_1'$ ,  $h_1''$ ,  $h_2'$  e  $h_2''$  (conforme Figura 6.2).

Cenário	Teste	$h_2'$ (cm)	$h_2''$ (cm)	$h_1'$ (cm)	$h_1''$ (cm)
I	1	2,0	5,0	12,0	17,0
	2				
	3				
II	1	2,0	5,0	27,0	30,0
	2				
	3				
III	1			39,0	42,0

Estes lastros, utilizados para representar o terreno natural e a declividade existente neste terreno, avaliada em 0,0374 m/m, foram construídos com MBCA, porém com uma taxa muito superior de cimento do que aquela utilizada nos modelos das barragens, sendo esta taxa de 15,0%, para que se viabilizasse a sua reutilização durante a bateria de ensaios e possibilitar a verificação da ocorrência de condições hidrodinâmicas extremas durante as rupturas, por ações das velocidades e tensões de arrastes superiores àquelas suportadas pelos modelos reduzidos das barragens.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 *Material Componente dos Maciços - MBCA*

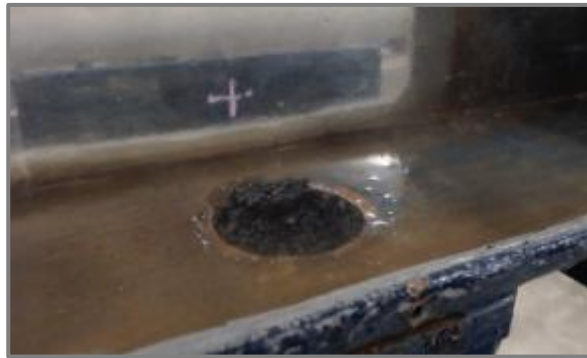
Para a caracterização da resistência ao cisalhamento da MBCA foram elaborados 200 ensaios completos em várias séries de testes, o que possibilitou o desenvolvimento do material componente dos modelos das barragens. Dentre estes, 144 ensaios foram utilizados para definir e otimizar a metodologia de expulsão dos vazios entre os grãos da MBCA nos tubos de ensaios e para definir qual a faixa de vazão seria utilizada para ensaiar determinada concentração de cimento no CP, uma vez que uma faixa de vazão inadequada pode levar à ocorrência de uma entre as duas seguintes situações distintas que conduzem ao descarte do ensaio (CAMPOS *et al.*, 2018a):

- Quando a vazão é elevada a tensão de cisalhamento crítica ( $\tau$ ) aplicada é muito superior à resistência da MBCA, assim, o material é removido por formação de vórtice no CP, tornando o resultado inconclusivo;
- Quando a vazão é baixa a tensão de cisalhamento crítica ( $\tau$ ) aplicada é muito inferior a resistência da MBCA, e o material não sofre erosão, mesmo exposto por um longo período de tempo, assim, conduzindo a um resultado inconclusivo;

A Figura 7.1 (a, b, c e d) ilustra as etapas características dos ensaios no *EFA*.

A Figura 7.2 ilustra uma das condições na qual o ensaio pode ser considerado como não representativo, quando ocorre desprendimento do material (MBCA) por meio de vórtice com deslocamento vertical das partículas e o fluxo colide com a parte posterior do tubo do CP, levando ao deslocamento do material de forma inadequada.

A Tabela 7.1 apresenta os dados de todos os CPs dos ensaios que tiveram melhor qualificação de erosão ao longo de todo o comprimento dos CPs, com seus principais parâmetros obtidos para execução dos ensaios (CAMPOS *et al.*, 2018a).



a-) CP inserido e o MBCA posicionado em altura adequada.



b-) Início da passagem do fluxo. Inicia-se a contagem do tempo de erosão.



c-) Observa-se desprendimento de material em camada exposta de aproximadamente 1 mm.



d-) Final do ensaio em condições adequadas de representatividade (sem vórtice).

**Figura 7.1:** Etapas características (a, b, c e d) do ensaio de erosão no *EFA*.



**Figura 7.2:** Desprendimento do material por vórtice com deslocamento vertical das partículas.

**Tabela 7.1-** Dados dos CPs registrados antes dos ensaios.

Ensaio N°	CP N°	Borracha [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Cimento [g]	Cimento massa [%]	Cimento volume [%]	H [cm]	h' [cm]	H efetiva [cm]	Tipo de Ensaio
1	CP1	123	178,4	5,0	4,1	5,0	16,6	2,4	14,2	Compactado 1 kg
2	CP2	129	193,5	10,0	7,8	9,5	16,6	1,2	15,4	
3	CP4	129	193,5	20,0	15,5	19,1	16,6	1,2	15,4	
4	CP5	125	189,8	25,0	20,0	24,6	16,6	1,5	15,1	
5	CP6	124	164,6	30,0	24,2	29,8	16,6	3,5	13,1	
6	CP7	125	186,0	35,0	28,0	34,5	16,5	1,7	14,8	
7	CP8	128	184,7	40,0	31,3	38,5	16,5	1,8	14,7	
8	CP9	129	196,0	5,0	3,9	4,8	16,6	1,0	15,6	Adensado 1 kg
9	CP10	130	191,0	10,0	7,7	9,5	16,5	1,3	15,2	
10	CP11	128	197,3	15,0	11,7	14,4	16,6	0,9	15,7	
11	CP12	128	197,3	20,0	15,6	19,2	16,5	0,8	15,7	
12	CP14	128	196,0	30,0	23,4	28,8	16,5	0,9	15,6	
13	CP15	129	199,8	35,0	27,1	33,4	16,6	0,7	15,9	
14	CP16	129	197,3	40,0	31,0	38,2	16,6	0,9	15,7	
15	CP1	130	189,8	4,0	3,1	3,8	16,6	1,5	15,1	Compactado 1 kg
16	CP2	130	193,5	9,0	6,9	8,5	16,6	1,2	15,4	
17	CP3	130	199,8	14,0	10,8	13,3	16,6	0,7	15,9	
18	CP4	130	189,8	19,0	14,6	18,0	16,6	1,5	15,1	
19	CP5	130	191,0	24,0	18,5	22,7	16,6	1,4	15,2	
20	CP6	130	192,3	29,0	22,3	27,5	16,6	1,3	15,3	
21	CP7	130	197,3	34,0	26,2	32,2	16,5	0,8	15,7	
22	CP8	130	194,8	39,0	30,0	36,9	16,5	1,0	15,5	
23	CP9	130	199,8	4,0	3,1	3,8	16,6	0,7	15,9	Adensado 1 kg
24	CP10	130	196,0	9,0	6,9	8,5	16,5	0,9	15,6	
25	CP11	130	193,5	14,0	10,8	13,3	16,6	1,2	15,4	
26	CP12	130	201,1	19,0	14,6	18,0	16,5	0,5	16	
27	CP13	130	194,8	24,0	18,5	22,7	16,5	1,0	15,5	
28	CP14	130	196,0	29,0	22,3	27,5	16,5	0,9	15,6	
29	CP15	130	196,0	34,0	26,2	32,2	16,6	1,0	15,6	
30	CP16	130	131,9	39,0	30,0	36,9	16,6	6,1	10,5	
31	CP1	128	193,5	3,0	2,3	2,9	16,6	1,2	15,4	Compactado 1 kg
32	CP2	130	194,8	8,0	6,2	7,6	16,6	1,1	15,5	
33	CP3	130	196,0	13,0	10,0	12,3	16,6	1,0	15,6	
34	CP3	130	199,8	18,0	13,8	17,0	16,6	0,7	15,9	
35	CP6	129	194,8	28,0	21,7	26,7	16,6	1,1	15,5	
36	CP7	129	196,0	33,0	25,6	31,5	16,5	0,9	15,6	
37	CP8	128	193,5	38,0	29,7	36,5	16,5	1,1	15,4	
38	CP9	129	194,8	3,0	2,3	2,9	16,6	1,1	15,5	Adensado 1 kg
39	CP10	129	193,5	8,0	6,2	7,6	16,5	1,1	15,4	
40	CP11	130	197,3	13,0	10,0	12,3	16,6	0,9	15,7	
41	CP12	128	194,8	18,0	14,1	17,3	16,5	1,0	15,5	
42	CP14	130	198,5	28,0	21,5	26,5	16,5	0,7	15,8	
43	CP15	128	193,5	33,0	25,8	31,7	16,6	1,2	15,4	
44	CP16	130	191,0	38,0	29,2	36,0	16,6	1,4	15,2	

Ensaio N°	CP N°	Borracha [g]	Volume [cm <sup>3</sup> ]	Cimento [g]	Cimento massa [%]	Cimento volume [%]	H [cm]	h' [cm]	H efetiva [cm]	Tipo de Ensaio
45	CP8	130	191,0	28,0	21,5	26,5	16,5	1,3	15,2	Comp. 1 kg
46	CP1	130	197,3	42,0	32,3	39,8	16,6	0,9	15,7	
47	CP2	130	168,4	43,0	33,1	40,7	16,6	3,2	13,4	Compactado
48	CP3	130	193,5	44,0	33,8	41,7	16,6	1,2	15,4	1 kg
49	CP4	130	196,0	45,0	34,6	42,6	16,6	1,0	15,6	
50	CP6	127	193,5	41,0	32,3	39,7	16,6	1,2	15,4	
51	CP7	125	182,2	42,0	33,6	41,4	16,5	2,0	14,5	Compactado
52	CP8	131	187,2	43,0	32,8	40,4	16,5	1,6	14,9	1 kg
53	CP9	130	192,3	44,0	33,8	41,7	16,6	1,3	15,3	
54	CP2	130	196,0	33,0	25,4	31,2	16,6	1,0	15,6	Compactado
55	CP5	130	196,0	36,0	27,7	34,1	16,6	1,0	15,6	1 kg
56	CP6	130	198,5	37,0	28,5	35,0	16,6	0,8	15,8	

Na Tabela 7.1 apresentam-se as seguintes propriedades dos CPs:

- Ensaio N°: Número de ordenação;
- CP N° (numeral): Corpo de Prova utilizado na pesquisa;
- Borracha (g): Quantidade de granulado de borracha em gramas utilizada na MBCA;
- Volume (cm<sup>3</sup>): Volume ocupado pela MBCA;
- Cimento (g): Quantidade de cimento em gramas utilizada na MBCA;
- Cimento massa (%): Proporção em massa de cimento por granulado de borracha;
- Cimento volume (%): Proporção em volume de cimento por granulado de borracha;
- H (cm): Altura total do CP;
- h' (cm): Altura não preenchida por MBCA no CP;
- H efetiva (cm): Altura efetiva do CP;
- Tipo de Ensaio: Compactado (1 kg) ou adensado.

A Tabela 7.2 apresenta todos os resultados dos CPs simulados, constantes da Tabela 7.1, para obtenção de uma taxa de erosão representativa (CAMPOS *et al.*, 2018a).

**Tabela 7.2-** Resultados dos ensaios dos CPs.

Ensaio N°	CP N°	Cimento massa [%]	Q [m³/h]	V [m/s]	Re	$\tau$ [Pa]	$\dot{Z}$ [mm/h]	Tempo [s]
1	CP1	4,1	20,0	0,73	61502	1,3	6816	75
2	CP2	7,8	18,8	0,69	57812	1,2	1598	347
3	CP4	15,5	25,4	0,93	78107	2,1	2174	255
4	CP5	20,0	30,3	1,11	93175	2,9	937	580
5	CP6	24,2	67,2	2,46	206646	12,5	1615	292
6	CP7	28,0	67,2	2,46	206646	12,5	882	604
7	CP8	31,3	67,2	2,46	206646	12,5	713	742
8	CP9	3,9	20,2	0,74	62117	1,4	3510	160
9	CP10	7,7	20,4	0,75	62732	1,4	1710	320
10	CP11	11,7	25,1	0,92	77185	2,1	2055	275
11	CP12	15,6	28,0	1,03	86103	2,6	3123	181
12	CP14	23,4	35,1	1,29	107936	3,8	597	940
13	CP15	27,1	50,0	1,83	153755	7,7	957	598
14	CP16	31,0	64,8	2,37	199266	13,0	1692	334
15	CP1	3,1	20,8	0,76	63962	1,4	4314	126
16	CP2	6,9	20,8	0,76	63962	1,4	1760	315
17	CP3	10,8	23,0	0,84	70727	1,7	3868	148
18	CP4	14,6	23,0	0,84	70727	1,7	2303	236
19	CP5	18,5	26,2	0,96	80568	2,2	1648	332
20	CP6	22,3	40,3	1,48	123926	5,0	2623	210
21	CP7	26,2	48,0	1,76	147605	7,1	1495	378
22	CP8	30,0	67,0	2,45	206031	12,4	1165	479
23	CP9	3,1	26,1	0,96	80260	2,2	8177	70
24	CP10	6,9	26,1	0,96	80260	2,2	4011	140
25	CP11	10,8	34,4	1,26	105783	3,7	3647	152
26	CP12	14,6	35,2	1,29	108243	3,8	1289	447
27	CP13	18,5	45,0	1,65	138379	6,3	1187	306
28	CP14	22,3	67,2	2,46	206646	12,5	994	137
29	CP15	26,2	67,2	2,46	206646	12,5	1195	470
30	CP16	30,0	67,2	2,46	206646	12,5	669	565
31	CP1	2,3	19,4	0,71	59657	1,3	7200	77
32	CP2	6,2	19,1	0,70	58734	1,3	2426	230
33	CP3	10,0	24,5	0,90	75340	2,0	3304	170
34	CP3	13,8	28,3	1,04	87025	2,6	2862	200
35	CP6	21,7	28,9	1,06	88870	2,7	2278	245
36	CP7	25,6	39,0	1,43	119929	4,7	1060	530
37	CP8	29,7	47,0	1,72	144530	6,8	689	805
38	CP9	2,3	17,6	0,64	54122	1,1	6200	90
39	CP10	6,2	18,3	0,67	56274	1,2	2157	257
40	CP11	10,0	25,9	0,95	79645	2,2	3425	165
41	CP12	14,1	25,9	0,95	79645	2,2	2458	227
42	CP14	21,5	40,8	1,49	125464	5,2	2495	228
43	CP15	25,8	46,7	1,71	143607	6,8	1263	439
44	CP16	29,2	67,4	2,47	207261	12,5	1276	429
45	CP8	21,5	46,1	1,69	141762	6,6	2736	200
46	CP1	32,3	50,3	1,84	154677	7,8	965	586
47	CP2	33,1	68,0	2,49	209107	12,8	196	2460
48	CP3	33,8	67,4	2,47	207261	12,5	245	2267

Ensaio N°	CP N°	Cimento massa [%]	Q [m <sup>3</sup> /h]	V [m/s]	Re	$\tau$ [Pa]	$\dot{Z}$ [mm/h]	Tempo [s]
49	CP4	34,6	67,4	2,47	207261	12,5	NE*	NE*
50	CP6	32,3	67,4	2,47	207261	12,5	NE*	NE*
51	CP7	33,6	67,4	2,47	207261	12,5	NE*	NE*
52	CP8	32,8	67,4	2,47	207261	12,5	NE*	NE*
53	CP9	33,8	67,4	2,47	207261	12,5	NE*	NE*
54	CP2	25,4	48,0	1,76	147605	7,1	3304	170
55	CP5	27,7	46,1	1,69	141762	6,6	2265	248
56	CP6	28,5	50,0	1,83	153755	7,7	1210	470

\* - NE - Corpos de prova com concentração de cimento que se apresentaram Não Erosíveis (NE) em máximas vazões.

Na Tabela 7.2 identificam-se os seguintes resultados dos ensaios dos CPs:

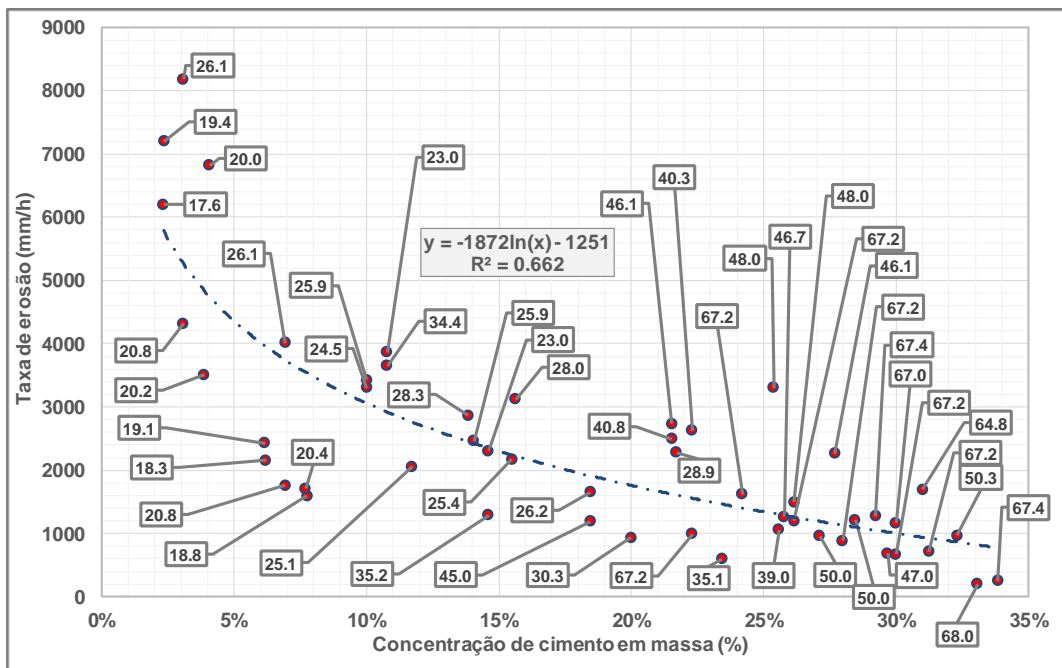
- Ensaio N°: Número de ordenação;
- CP N° (numeral): Corpo de Prova utilizado na pesquisa;
- Cimento massa (%): Proporção em massa de cimento por granulado de borracha;
- Q (m<sup>3</sup>/h): Vazão de ensaio;
- V (m/s): Velocidade média na seção de ensaio;
- Re: Número de Reynolds, utilizado para o estimar o valor de f no ábaco de Moody;
- $\tau$  (Pa): Tensão de cisalhamento, conforme equação (5.11);
- $\dot{Z}$  (mm/h): Taxa de erodibilidade obtida;
- Tempo (s): Tempo total de ensaio.

Os resultados completos destes testes se encontram no Apêndice I.

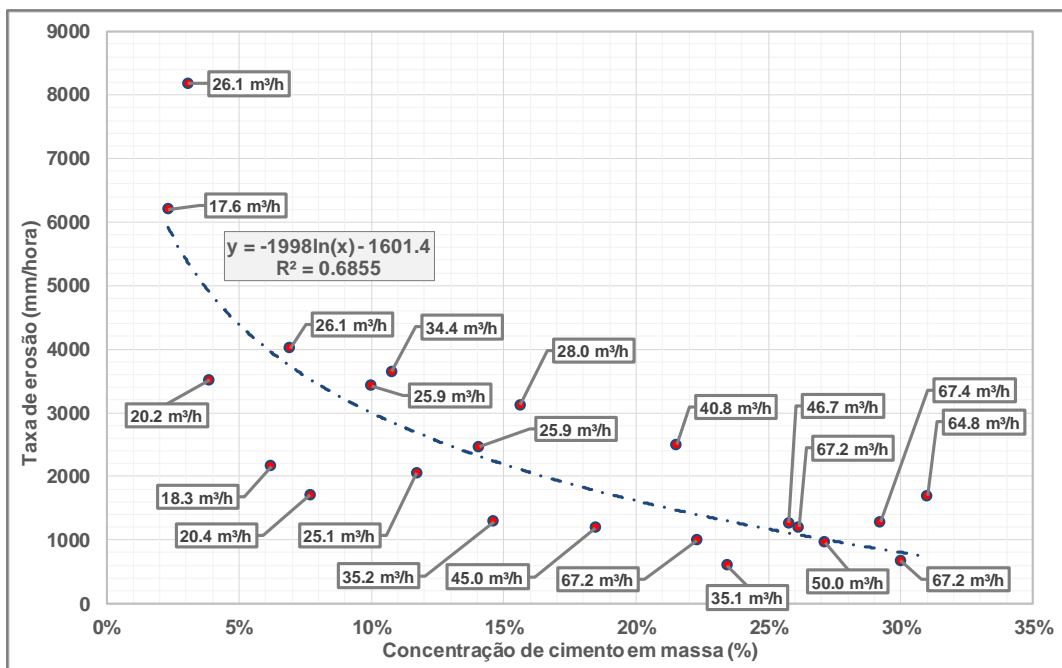
Os gráficos da Figura 7.3, Figura 7.4 e Figura 7.5 apresentam os resultados com a curva de regressão logarítmica e correlação para todos os ensaios validados (para todos os ensaios adensados e compactados), somente para os ensaios adensados, e somente para os ensaios compactados, respectivamente.

Todos os gráficos destas figuras ainda apresentam o valor da vazão utilizada no ensaio, nos rótulos dos pontos.

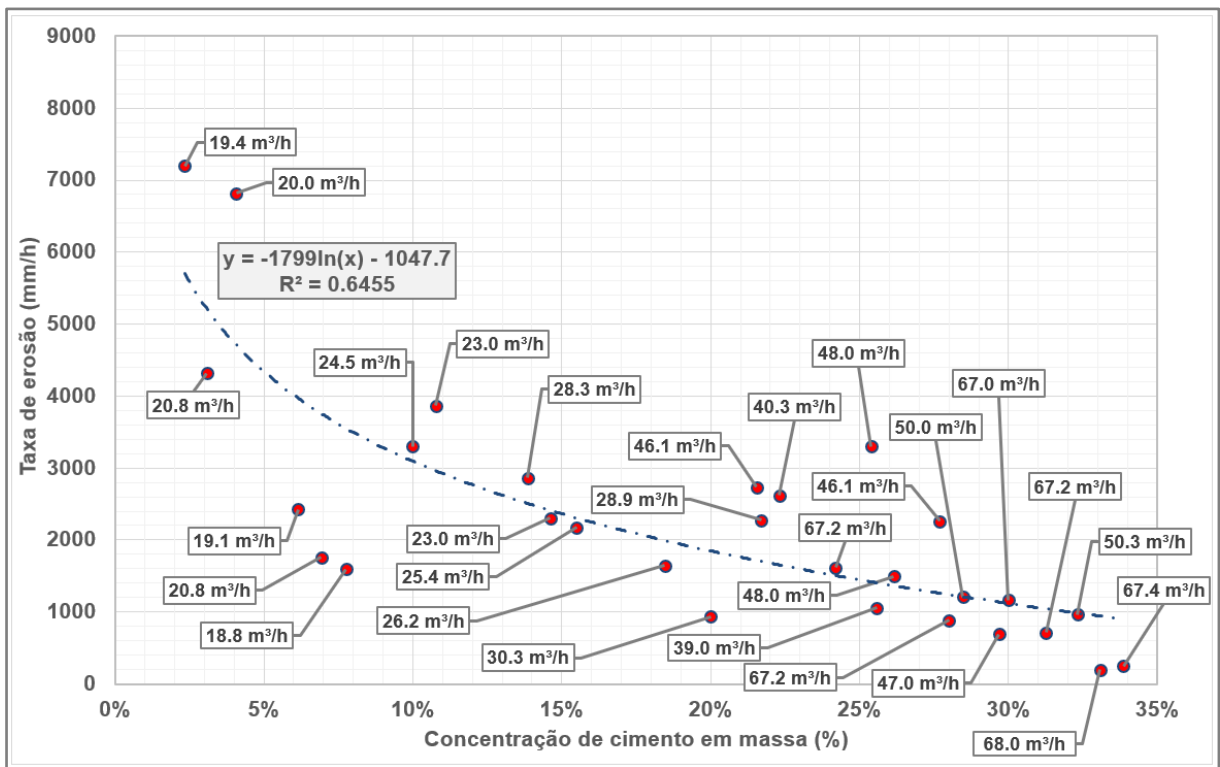
Cabe observar que devido ao excesso de pontos alguns gráficos omitem a unidade, como descrito na legenda de cada figura.



**Figura 7.3:** Regressão logarítmica e correlação para todos os ensaios (unidade dos valores nos rótulos em  $m^3/h$  – CAMPOS *et al.* 2018a).



**Figura 7.4:** Regressão logarítmica e correlação para ensaios tipo adensado (CAMPOS *et al.* 2018a).



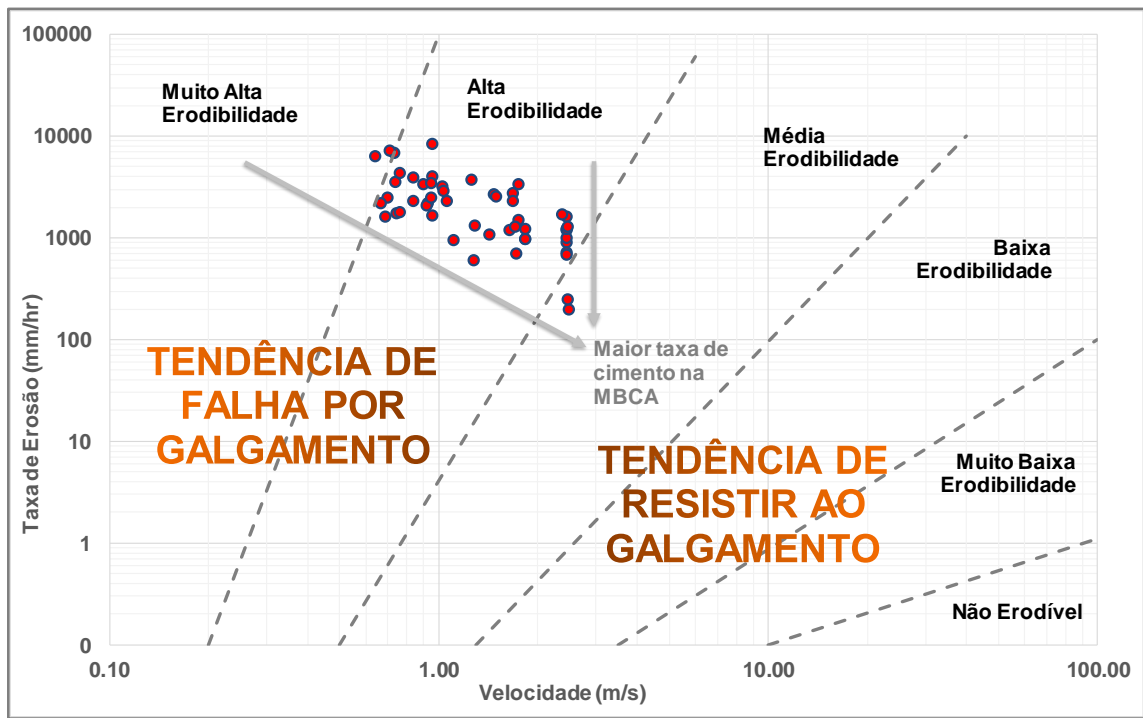
**Figura 7.5:** Regressão logarítmica e correlação para ensaios tipo compactado 1 kg (CAMPOS *et al.* 2018a).

Cabe destacar que não foram plotados nos gráficos apresentados os pontos 49 a 53 da Tabela 7.1 e Tabela 7.2, por estes apresentarem uma taxa nula de erodibilidade. Foi considerado Não Erodível (NE) o CP que foi submetido a máxima vazão possível de ser simulada no *EFA*, o que corresponde a aproximadamente 68,0 m<sup>3</sup>/h, e não apresentou nenhuma erodibilidade por 10 minutos. Assim, pôde-se determinar o limite superior da concentração de cimento na MBCA, ou o limite de erodibilidade do *EFA*.

O gráfico da Figura 7.6 apresenta a erodibilidade por velocidade do fluxo, no qual se verificam as zonas de tendência geotécnica a falha por galgamento (no caso dos solos) e a zona de tendência a resistir ao galgamento, conforme proposto por Briaud *et al.* (2008). Neste gráfico se encontram plotados (pontos vermelhos) os 56 resultados encontrados nesta pesquisa.

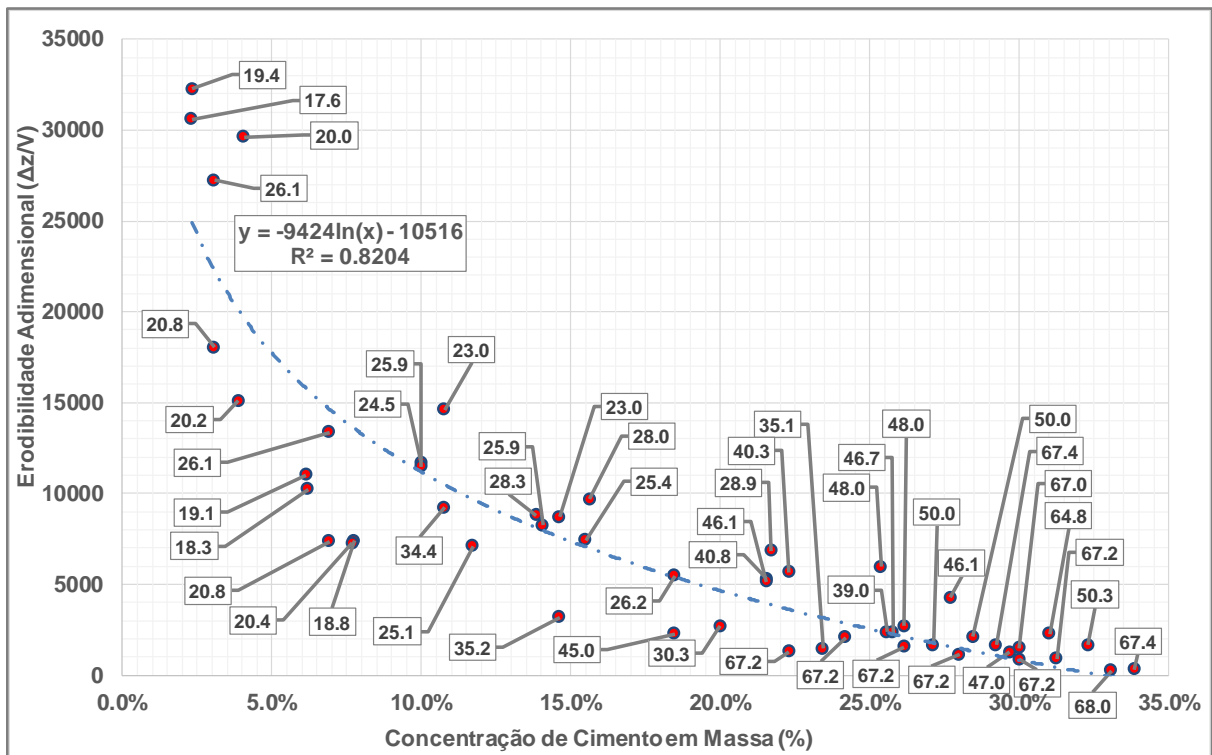
Também se verifica uma tendência de menores taxas de erodibilidade para taxas maiores de cimento na MBCA, com comportamento mais resistivo ao cisalhamento hidrodinâmico.

Pôde-se constatar uma limitação desta pesquisa, pois as maiores velocidades analisadas são iguais ou inferiores a 2,5 m/s, sendo esta a principal limitação do *EFA*.



**Figura 7.6:** Análise da erodibilidade por velocidade de escoamento.

O gráfico da Figura 7.7 apresenta os resultados de forma adimensionalizada, erodibilidade por velocidade do fluxo, correlacionadas as taxas de cimento em massa.



**Figura 7.7:** Taxas de erosão adimensionalizada em função da taxa de cimento na MBCA.

## 7.2 Simulações de Ruptura de Barragens em Cascata

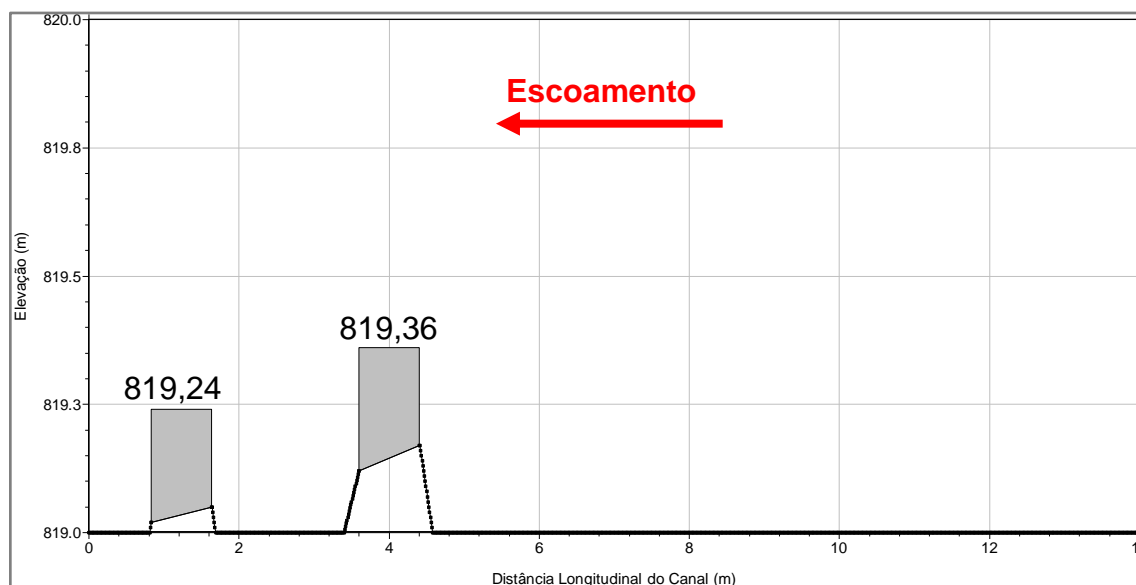
Como citado no item 5.5, preliminarmente às simulações dos cenários definitivos foi desenvolvido um modelo unidimensional em regime transitório dos barramentos representando o cenário I P, utilizando o HEC-RAS 5.0.7, para correlacionar as condições de velocidades e tensões de arraste entre os ensaios da MBCA no *EFA* e permitir a calibração da taxa de cimento por massa a ser utilizada na MBCA para os ensaios seguintes.

Assim, o hidrograma modelado possuía vazões variando entre 0,001 m<sup>3</sup>/s e 0,125 m<sup>3</sup>/s. O pico do hidrograma foi determinado pela equação de escoamento uniforme, baseando-se na largura de ruptura do teste preliminar I P, obtida por meio do software Kinovea, o qual permitiu analisar as filmagens de formação de brecha dos modelos reduzidos.

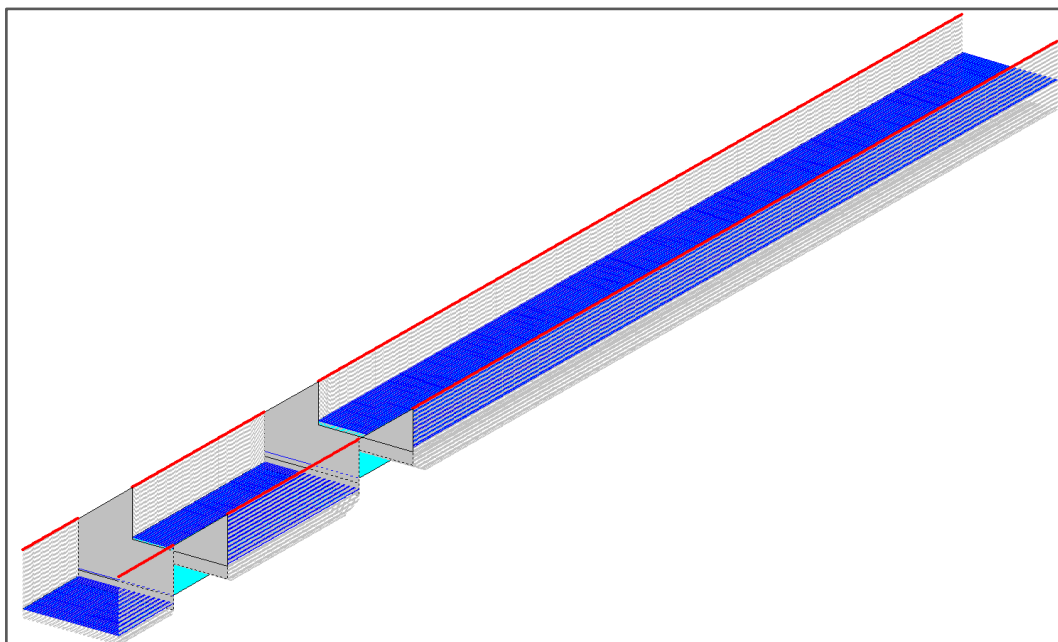
As brechas a montante e a jusante simuladas apresentaram tempos de formação de 65 s e 33 s, largura de ruptura de 628 mm e 965 mm, respectivamente, e paredes laterais verticais para as duas barragens. Os dados apresentados estão listados na Tabela 8.2.

### 7.2.1 Avaliação em modelo unidimensional – HEC-RAS

A Figura 7.8 e a Figura 7.9 expõem o modelo em perfil longitudinal e em perspectiva, respectivamente.

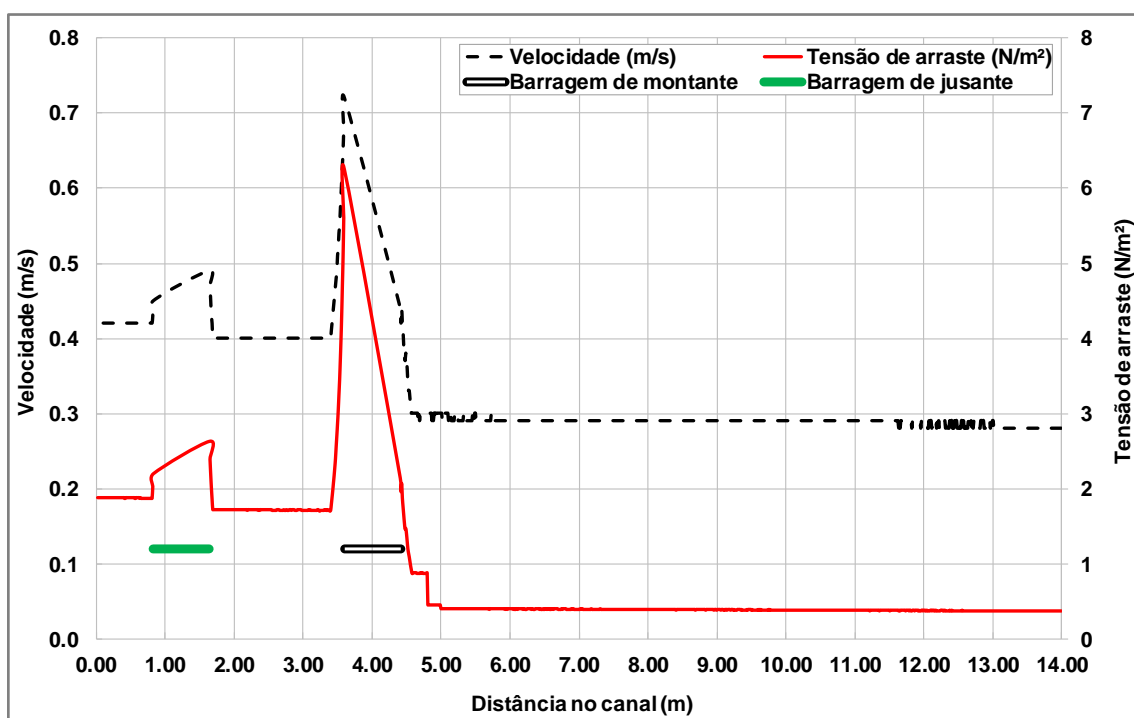


**Figura 7.8:** Perfil longitudinal modelo HEC-RAS unidimensional.



**Figura 7.9:** Perspectiva do modelo HEC-RAS unidimensional.

A amplitude das variáveis velocidade e tensões de arraste, ao longo do canal modelado, se encontram na Figura 7.10.



**Figura 7.10:** Resultado do modelo HEC-RAS com dados do cenário I P.

Os resultados indicaram velocidades variando de 0,29 m/s a 0,72 m/s, e indicaram amplitude de tensão de cisalhamento do escoamento variando de 0,92 N/m<sup>2</sup> a 6,25 N/m<sup>2</sup>.

Sob essas condições de velocidades, segundo Campos *et al.* (2018a), a taxa de cimento por massa na MBCA, que leva a uma taxa de erosão constante, deve estar entre 2,3% e 7,8%.

Para a variável tensão de arraste verifica-se, a partir da análise da Tabela 7.2, que não existe uma correlação adequada entre a faixa determinada no modelo numérico e aquelas determinadas para a resistência a tensão de arraste da MBCA ensaiada no *EFA*. Cabe ressaltar que o cálculo da tensão de arraste para a resistência da MBCA foi feita pela equação (5.11, a qual utiliza parâmetros do ábaco de Moody para tubulações fechadas, e que o cálculo da tensão de arraste para canais abertos no HEC-RAS 5.0.7 é feita pela equação (4.6).


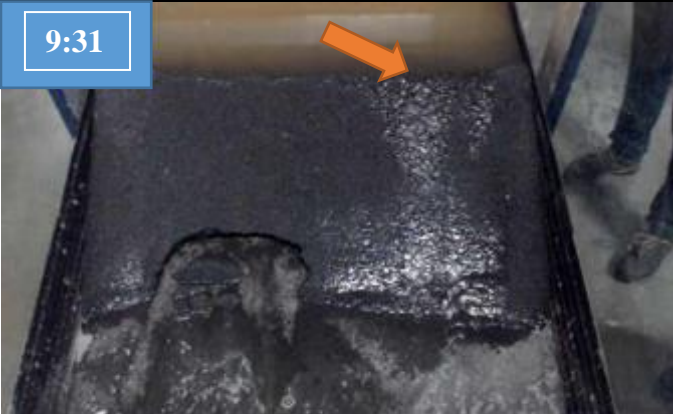


Assim, optou-se pela proposição dos Cenários I a III da Tabela 6.3 com os modelos reduzidos construídos com taxas de cimento de 4,5% para a MBCA, objetivando que a ruptura ocorra em espaços de tempo razoavelmente curtos, mas registráveis por meio de filmagem. Taxas mais elevadas de cimento na MBCA podem levar a modelos reduzidos não destrutíveis pela ação do fluxo e/ou levar a tempos de rupturas extremamente longos, o que inviabilizaria a análise do processo de ruptura em cascata.

### **7.2.2 Tempo de formação da brecha**

A análise do tempo de formação de brecha foi procedida conforme descrito no item 5.1. A Tabela 7.3 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.4 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante para o Cenário I P.


O tempo de ocorrência do momento analisado, entre a Tabela 7.3 a Tabela 7.20, se encontram na quadrícula branca na margem superior de cada figura, em minutos e segundos.

**Tabela 7.3-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I P – Barragem de montante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:13</p>	Desplacamento localizado do pé devido à surgência.	 <p>9:31</p>	Início do galgamento.
 <p>9:34</p>	Início da ruptura por galgamento.	 <p>9:41</p>	Avanço da brecha para montante por erosão regressiva, no local do galgamento.


Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:44</p>	<p>Avanço da brecha para montante por erosão regressiva, no local do galgamento, forma-se conexão com o reservatório.</p>	 <p>9:46</p>	<p>Avanço da brecha rapidamente.</p>
 <p>9:47</p>	<p>Alargamento da brecha para as ombreiras a partir da parte central do modelo.</p>	 <p>10:18</p>	<p>Brecha atinge forma próxima da final e reservatório já deplecionou quase totalmente, levando a erosões somente na base da brecha.</p>





---

Momento analisado	Observação
<p data-bbox="190 215 302 279">11:22</p> 	<p data-bbox="1205 422 1624 459">A brecha atinge sua forma final.</p>

---

**Tabela 7.4-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I P – Barragem de jusante.


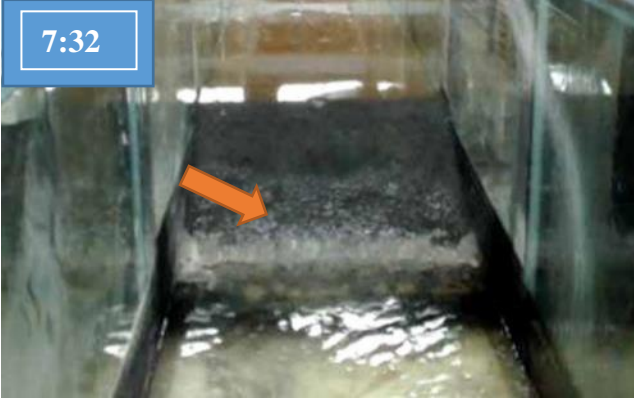






Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:21</p>	<p>Início de fluxo pela fundação da barragem de jusante. A camada de argila impede um fluxo maior.</p>	 <p>9:49</p>	<p>Início da chegada da onda da ruptura da barragem de montante. Ocorre galgamento brusco.</p>
 <p>9:52</p>	<p>Onda da ruptura da barragem de montante ocupa toda a seção.</p>	 <p>9:57</p>	<p>Erosão regressiva se desenvolve rapidamente no paramento de jusante.</p>





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="159 193 309 277">10:01</p>	<p data-bbox="831 261 1115 576">Continuidade da erosão regressiva se desenvolvendo rapidamente no paramento de jusante.</p>	 <p data-bbox="1115 193 1265 277">10:08</p>	<p data-bbox="1787 261 2069 576">Ocorre deplecionamento do reservatório e a parte central da brecha se aproxima da geometria final.</p>
 <p data-bbox="159 699 309 783">10:22</p>	<p data-bbox="831 804 1115 1059">Já não ocorre remoção de material da barragem de jusante.</p>	 <p data-bbox="1115 699 1265 783">10:25</p>	<p data-bbox="1787 884 2069 975">Final da formação da brecha.</p>



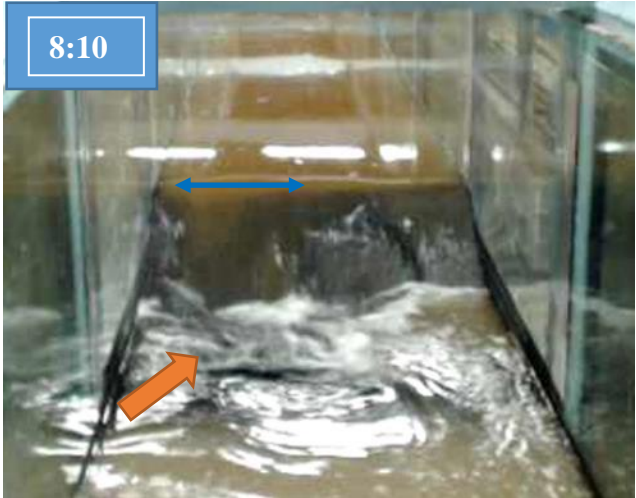
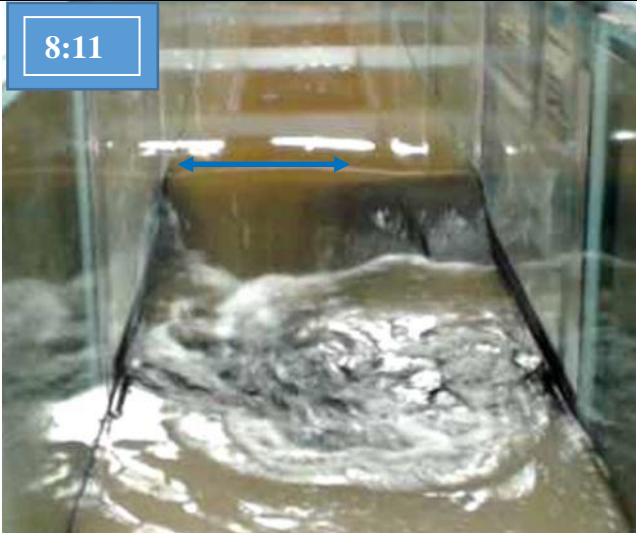
Analisando os dados das filmagens verifica-se que o TF1 é igual a 18 s e o TF2, tempo de formação de brecha, para a barragem de montante foi de 65 s. Para a barragem de jusante o TF1 é igual a 0 e o TF2 foi de 33 s. A razão do tempo de formação da brecha dos modelos das barragens de jusante pela de montante é igual a 0,51.

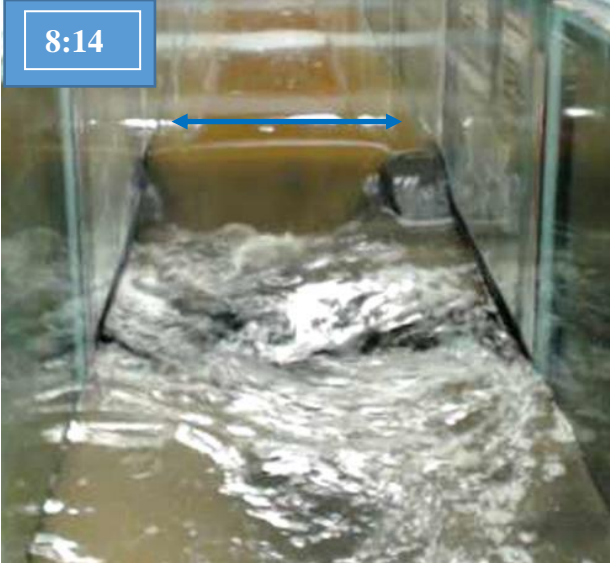
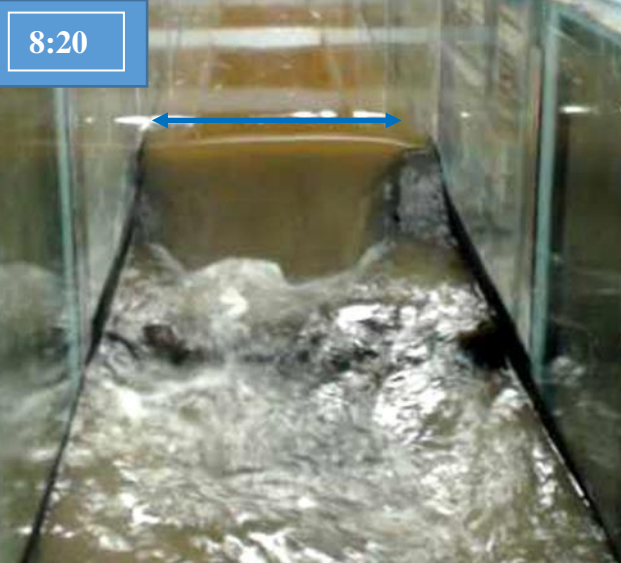
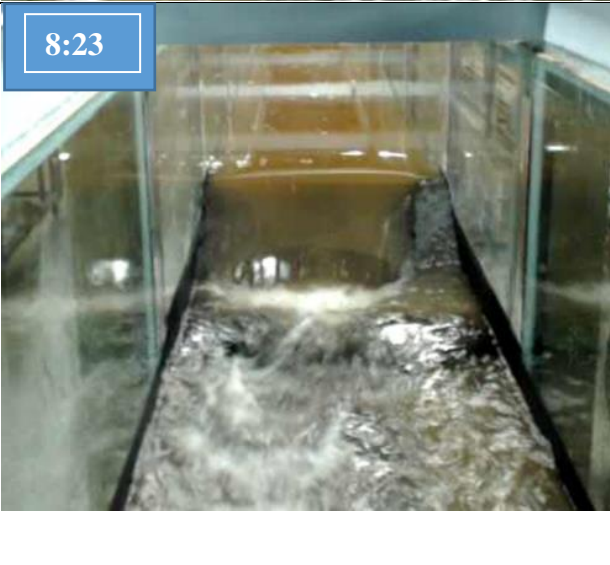

A Tabela 7.5 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.6 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante, ambas para o Cenário II P.


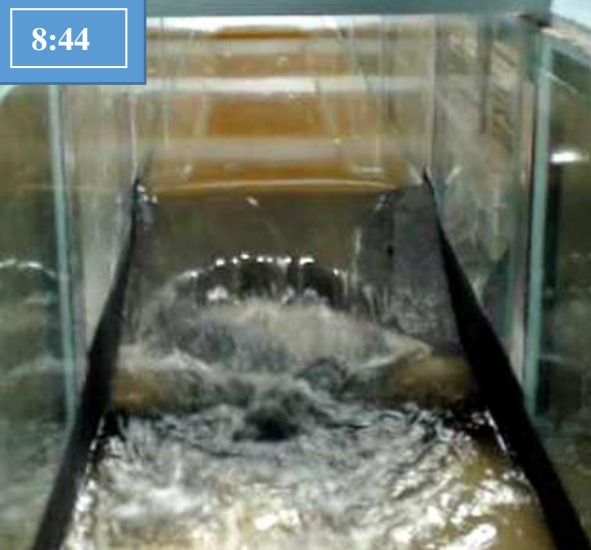
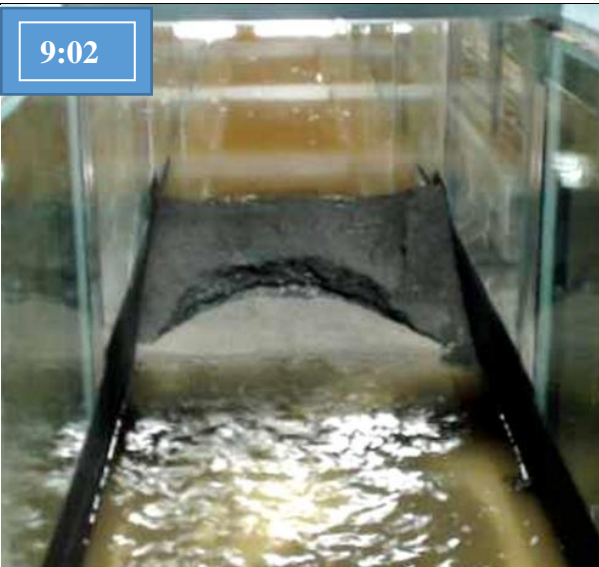
**Tabela 7.5-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II P – Barragem de montante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 	<p>Saturação do pé do talude de jusante.</p>	 	<p>Início do galgamento sem formação de brecha no local piloto (rebaixo proposital para formar brecha).</p>
 	<p>Início da remoção de material na parte central do maciço.</p>	 	<p>O fluxo começa a se expandir lateralmente e ganha maior área, levando a uma vazão maior.</p>





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
	<p>O fluxo ocupa toda a extensão lateral do modelo, o reservatório de jusante está praticamente cheio.</p> <p>O material desprendido do talude de jusante é removido em sua superfície.</p>		<p>O fluxo ocupa todo o talude de jusante, mas o maciço resiste a formar a brecha.</p> <p>Verifica-se que o fluxo é maior na parte central do maciço.</p>
	<p>O fluxo central aumenta e remove mais material da parte central do maciço de jusante.</p> <p>O fluxo que percorre o talude de jusante já encontra um lago, do reservatório da barragem de jusante.</p>		<p>O lago de jusante alcança o pé da barragem a montante, onde o fluxo causa turbulência (principalmente na parte central).</p>





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="197 217 259 248">8:08</p> 	<p data-bbox="826 204 1099 679">Região mais vulnerável do talude de jusante (parte esquerda – sentido montante jusante) se rompe devido ao fluxo constante e forma o início da brecha.</p>	<p data-bbox="1153 217 1216 248">8:09</p> 	<p data-bbox="1767 288 2007 596">A brecha se expande rapidamente pelo talude de jusante, em direção a parte central do maciço.</p>
<p data-bbox="197 802 259 834">8:10</p> 	<p data-bbox="826 790 1099 1265">O aumento de fluxo abrupto pela brecha promove o seu repentino desenvolvimento. A onda da ruptura de montante alcança o reservatório da barragem de jusante.</p>	<p data-bbox="1153 775 1216 807">8:11</p> 	<p data-bbox="1767 762 2007 1294">A brecha aumenta proporcionalmente com aumento do fluxo. O reservatório de jusante tem seu nível elevado, com propagação da onda de ruptura de montante.</p>

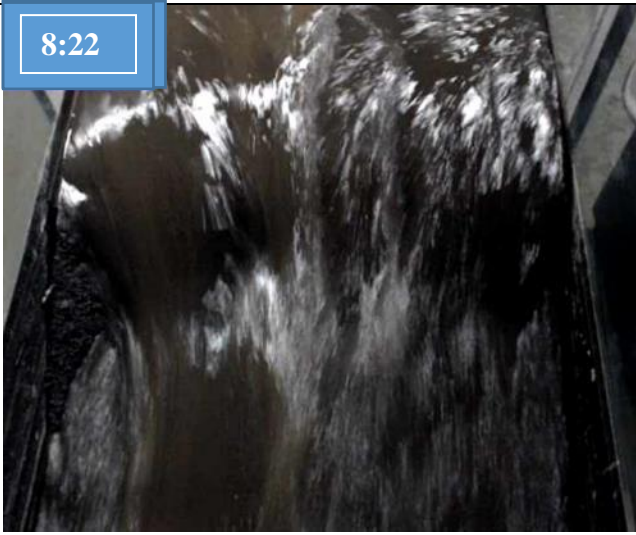
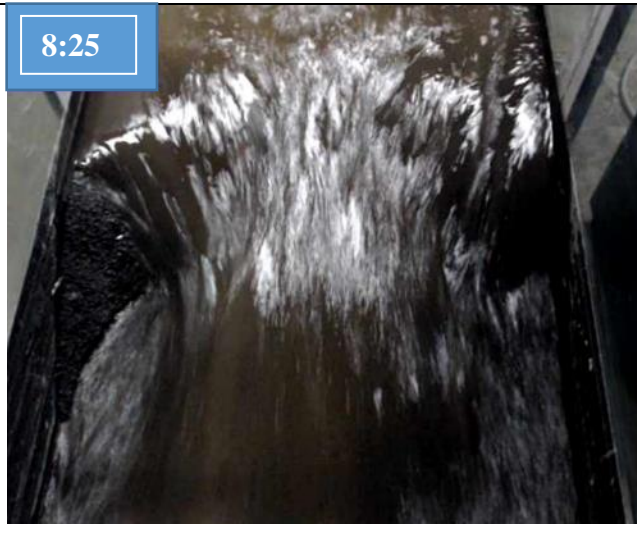
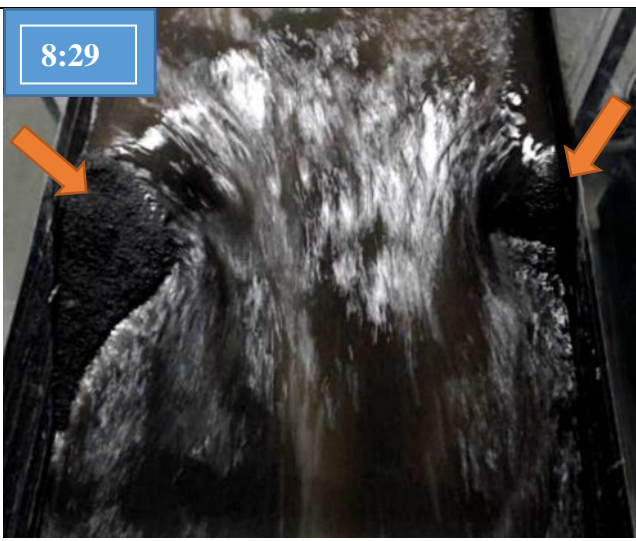

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="190 215 280 263">8:14</p> 	<p data-bbox="828 263 1097 630">A brecha aumenta em sua largura, com uma maior vazão passando por esta, alcançando o reservatório da barragem de jusante.</p>	<p data-bbox="1153 215 1243 263">8:20</p> 	<p data-bbox="1769 263 2004 630">Início da ruptura de jusante começa a influenciar as condições de montante, devido ao esvaziamento do lago.</p>
<p data-bbox="190 782 280 829">8:23</p> 	<p data-bbox="828 766 1097 1292">O esvaziamento do reservatório de jusante promove um amortecimento menor da onda da ruptura de montante, com maior velocidade de propagação da mesma.</p>	<p data-bbox="1153 782 1243 829">8:26</p> 	<p data-bbox="1769 766 2004 1292">A geometria da brecha praticamente se estabiliza. Se formou um arco junto ao terreno natural da barragem, o fluxo não promove mais o aumento.</p>


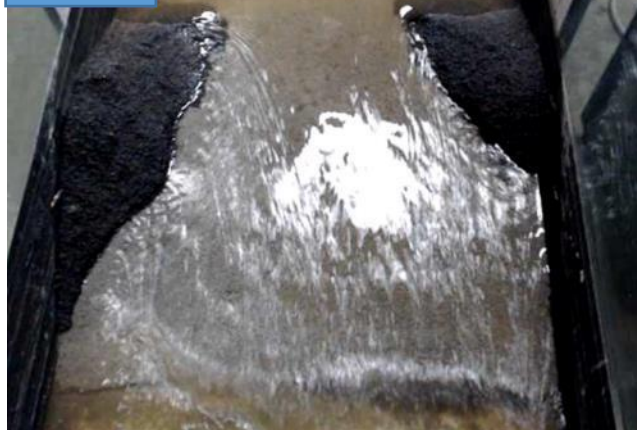
Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<div data-bbox="161 199 309 279" data-label="Text">8:38</div> 	<p>Com o esvaziamento do reservatório de montante a geometria da brecha se estabiliza. O arco tem uma sutil expansão em direção as ombreiras.</p>	<div data-bbox="1140 199 1288 279" data-label="Text">8:44</div> 	<p>Ocorre deslocamento do material que forma o arco e a brecha se propaga para montante.</p>
<div data-bbox="161 758 309 837" data-label="Text">9:02</div> 	<p>Fim do ensaio.</p>		

**Tabela 7.6-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II P – Barragem de jusante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>7:48</p>	<p>O reservatório da barragem de jusante permanece em processo de enchimento. Não se observa infiltração pelo maciço.</p>	 <p>8:12</p>	<p>Reservatório da barragem de jusante completamente cheio e na eminência de começar o galgamento. Não se observa infiltração pelo maciço.</p>
 <p>8:13</p>	<p>Começo do galgamento (o início da formação de brecha na barragem de montante foi as 8:08) após 5 segundos da brecha a montante.</p>	 <p>8:14</p>	<p>Material mais superficial e sem coesão que cobre o talude de jusante da barragem de jusante é removido.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<div data-bbox="159 193 322 277" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">8:17</div> 	<p>Passagem do fluxo pela parte central começa a formar brecha no pé da barragem do maciço de jusante.</p>	<div data-bbox="1070 193 1234 277" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">8:18</div> 	<p>A erosão no pé do talude de jusante avança em direção a crista do modelo e se alarga.</p>
<div data-bbox="159 727 322 812" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">8:19</div> 	<p>O efeito de formação de brecha por erosão do talude de jusante se amplifica em direção de montante.</p>	<div data-bbox="1070 727 1234 812" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin-bottom: 5px;">8:20</div> 	<p>A brecha tem sua largura mais ampliada, alcançando toda a largura da barragem.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="159 188 322 272">8:22</p>	<p data-bbox="792 188 1070 724">As ombreiras do modelo são mais resistentes e a formação da brecha ocorre na parte central.</p>	 <p data-bbox="1070 188 1234 272">8:25</p>	<p data-bbox="1704 188 2002 724">Enquanto a vazão diminui a parte central do modelo é mais afetada pelo processo erosivo.</p>
 <p data-bbox="159 724 322 809">8:29</p>	<p data-bbox="792 724 1070 1267">As ombreiras (em suas parcelas de montante) são a única parte do maciço que resta. A parte central do maciço está completamente erodida.</p>	 <p data-bbox="1070 724 1234 809">8:38</p>	<p data-bbox="1704 724 2002 1267">As ombreiras (em suas parcelas de montante) são a única parte do maciço que resistem. O terreno natural é atingido em toda a parte central do modelo.</p>





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="159 193 322 272">8:51</p> 	<p data-bbox="792 331 1070 533">Chegada do evento que ocorre as 8:44 na barragem de montante.</p>	<p data-bbox="1070 193 1211 272">9:02</p> 	<p data-bbox="1704 193 2002 229">Ensaio terminado.</p>





Para o Cenário II P, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.5 e Tabela 7.6, verifica-se que o TF1 foi de 35 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 36 s, e para a barragem de jusante o TF1 é igual a 0 s e o TF2 foi de 12 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens de jusante pelo montante é igual a 0,33.


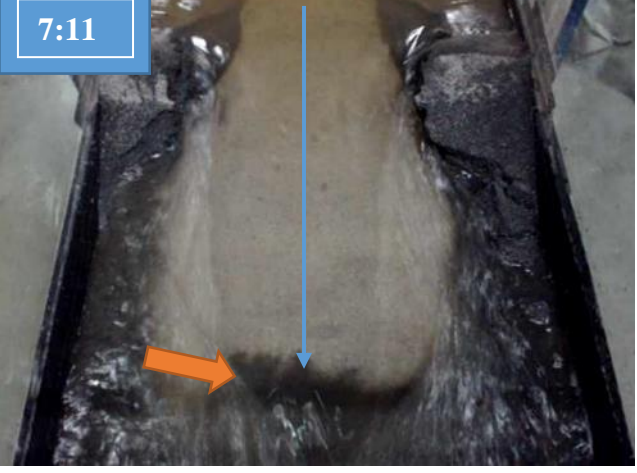


Verifica-se que o tempo de início de brecha (TF1) para a barragem de jusante é geralmente igual a 0 s, pois a chegada da onda de montante é abrupta, levando a ocorrência direta do tempo de formação de brecha (TF2).



A Tabela 7.7 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.8 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante para o Cenário I Teste 1.

**Tabela 7.7-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 1 – Barragem de montante.





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>6:41</p>	<p>Surgência no pé do talude de jusante e deslocamento localizado do material.</p>	 <p>6:48</p>	<p>Início do galgamento sem formação de brecha no local piloto (rebaixo proposital para formar brecha). Material do pé do talude se desloca para jusante.</p>
 <p>6:51</p>	<p>Material na parte central do maciço de jusante é erodido, e conexão com o reservatório é estabelecida. Formação de várias fissuras no maciço.</p>	 <p>6:52</p>	<p>Material do talude de jusante é deslocado e a brecha começa a ganhar forma.</p>


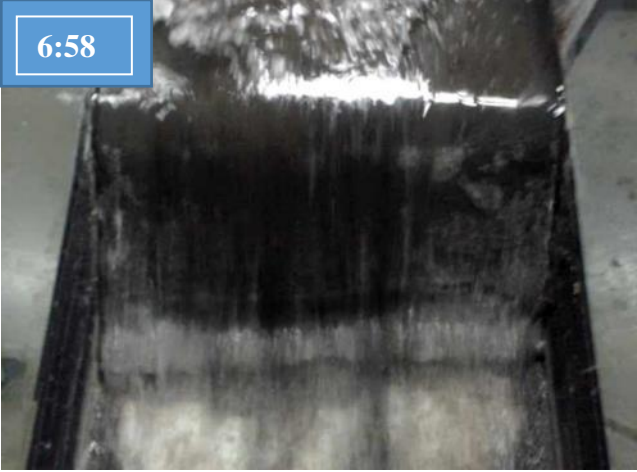
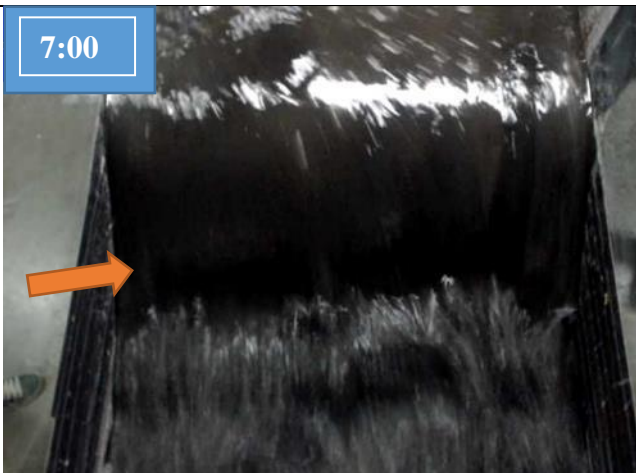

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>6:55</p>	<p>A brecha se expande lateralmente e o fluxo aumenta rapidamente, levando, conseqüentemente, a um maior aumento da brecha.</p>	 <p>6:57</p>	<p>O fluxo desloca o material do talude de jusante para o reservatório a jusante, com fluxo maior na parte central do maciço.</p>
 <p>6:59</p>	<p>O fluxo atinge o lastro do terreno natural, mas ainda ocorre remoção de material das laterais do maciço de jusante.</p>	 <p>7:01</p>	<p>O lago (formado pelo reservatório da barragem de jusante) se encontra próximo de sua cota máxima e com formação de remanso em direção a barragem de montante. Contudo, a brecha continua aumentando.</p>

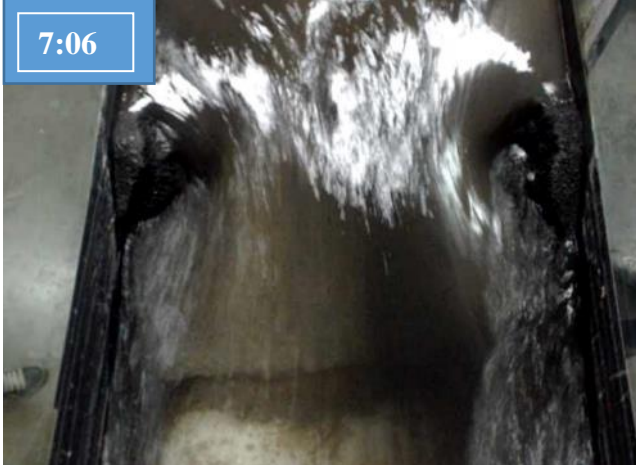


Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="161 204 309 279">7:07</p>	<p data-bbox="817 199 1052 734">O reservatório de jusante começa a esvaziar durante a formação da brecha de jusante, e a geometria da brecha de montante está praticamente formada.</p>	 <p data-bbox="1079 204 1227 279">7:11</p>	<p data-bbox="1736 231 2060 662">Com o aumento do fluxo, devido a formação da brecha de jusante, o material do maciço de montante próximo ao pé é arrancado pelo fluxo e rapidamente conduzido a jusante.</p>
 <p data-bbox="161 753 309 828">7:13</p>	<p data-bbox="817 798 1052 1173">O aumento de fluxo lateral leva a remoção de material dos taludes de jusante ao longo de todo pé do talude.</p>	 <p data-bbox="1079 753 1227 828">7:22</p>	<p data-bbox="1736 758 2060 1236">A passagem do fluxo pela parte inferior da brecha remove material desta região e o talude atinge ângulo negativo (além do vertical). Esta condição promove a queda de material ao final do processo.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="159 193 315 272">7:40</p> 	<p data-bbox="792 193 1077 667">A brecha tem sua largura final, e o reservatório de montante está praticamente vazio. Este é o fim do tempo de formação de brecha.</p>	<p data-bbox="1077 193 1234 272">8:06</p> 	<p data-bbox="1711 193 2072 667">O material do talude vertical se desprende, mas os parâmetros largura e altura da brecha já se encontram praticamente definidos.</p>

**Tabela 7.8-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 1 – Barragem de jusante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>6:04</p>	<p>O reservatório da barragem de jusante está em processo de enchimento. Observa-se infiltração pelo maciço com pequena saída pelo pé lado direito e esquerdo.</p>	 <p>6:10</p>	<p>Remoção de material do pé do talude de jusante.</p>
 <p>6:25</p>	<p>Remoção de material do pé do talude de jusante de forma generalizada.</p>	 <p>6:42</p>	<p>Apesar das trincas no pé do talude de jusante, o modelo permanece estável, sem formação de uma brecha definida.</p>





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="159 193 315 272">6:56</p>	<p data-bbox="815 368 1128 459">Início do galgamento na parte central do maciço.</p>	 <p data-bbox="1151 193 1308 272">6:58</p>	<p data-bbox="1807 204 2040 624">A onda da ruptura de montante atinge a barragem de jusante e a remoção de material do pé do talude jusante é instantânea.</p>
 <p data-bbox="159 687 315 767">7:00</p>	<p data-bbox="837 842 1106 986">O talude de jusante é completamente destruído.</p>	 <p data-bbox="1151 687 1308 767">7:04</p>	<p data-bbox="1807 699 2040 1166">A geometria da brecha começa a ser formada, com destaque dos taludes laterais aparecendo, devido a diminuição do fluxo.</p>

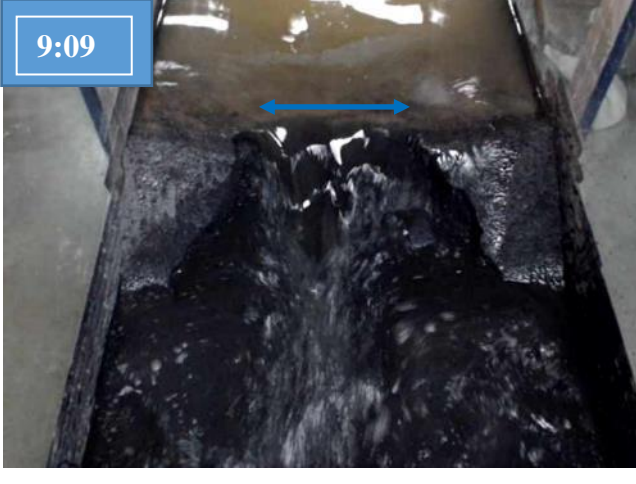
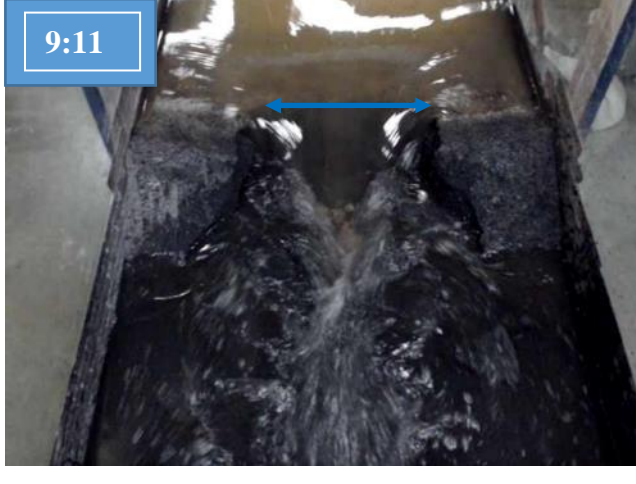


Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="174 204 309 268">7:06</p>	<p data-bbox="815 256 1122 568">As ombreiras do modelo são mais resistentes e a formação da brecha ocorre na parte central, onde o fluxo é mais intenso.</p>	 <p data-bbox="1167 204 1301 268">7:12</p>	<p data-bbox="1807 233 2024 592">A brecha já alcança sua geometria final, com remoção de pouco material nos estágios finais.</p>
 <p data-bbox="174 703 309 767">7:28</p>	<p data-bbox="815 871 2024 959">O fluxo é reduzido pelo esvaziamento. A geometria já está definida, com somente remoção de material lateral dos taludes de jusante, na parte de jusante da brecha. Ensaio terminado.</p>		


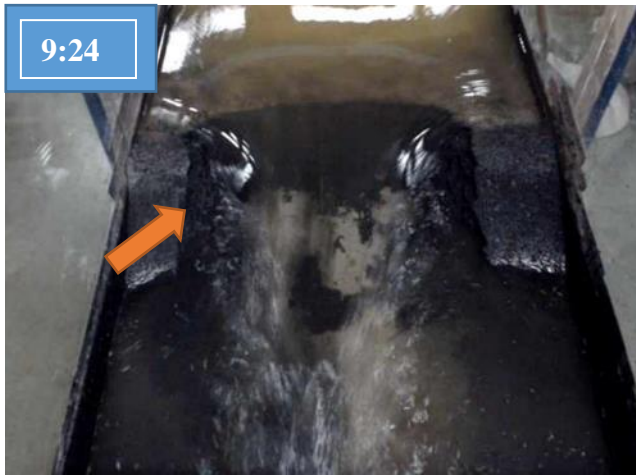


Para o Cenário I Teste 1, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.7 e Tabela 7.8, verifica-se que o TF1 foi de 10 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 49 s, e para a barragem de jusante o TF1 é adotado igual a 0 s e o TF2 foi de 16 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens é igual a 0,33.

A Tabela 7.9 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.10 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante para o Cenário I Teste 2.

**Tabela 7.9-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 2 – Barragem de montante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="163 248 309 328">8:53</p> 	<p data-bbox="815 248 1032 724">Com os reservatórios de montante e de jusante cheios ocorre deslocamento localizado de parte do pé do talude de jusante.</p>	<p data-bbox="1066 248 1211 328">9:03</p> 	<p data-bbox="1718 248 2029 724">Início do galgamento sem formação de brecha no local piloto (rebaixo proposital para formar brecha). Ocorre outro deslocamento localizado de parte do pé do talude de jusante no lado direito.</p>
<p data-bbox="163 732 309 812">9:05</p> 	<p data-bbox="815 892 1032 1043">Deslocamentos generalizados no talude de jusante.</p>	<p data-bbox="1066 732 1211 812">9:07</p> 	<p data-bbox="1718 780 2029 1155">O fluxo pelo talude de jusante alcança o reservatório e faz conexão com o mesmo e a brecha começa a apresentar definição geométrica.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<div data-bbox="159 193 309 277" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">9:09</div> 	<p>A brecha se expande pelo maciço.</p>	<div data-bbox="1055 193 1205 277" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">9:11</div> 	<p>Continuidade de expansão da brecha.</p>
<div data-bbox="159 679 309 764" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">9:13</div> 	<p>O reservatório de jusante está cheio, e causa remanso para montante, afogando a brecha.</p>	<div data-bbox="1055 679 1205 764" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">9:19</div> 	<p>O remanso carrega material desprendido pelo reservatório de jusante.</p>




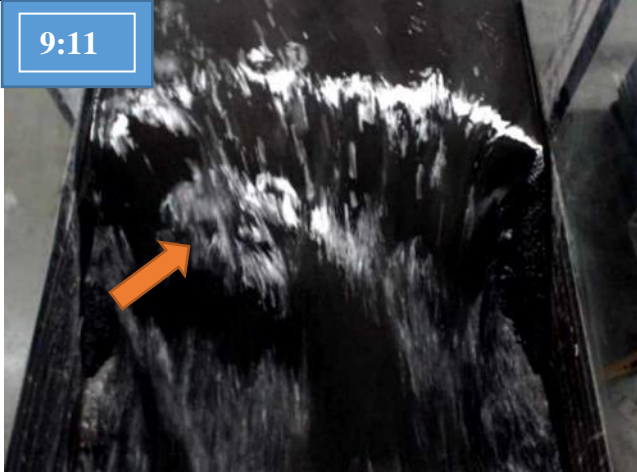
Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:22</p>	<p>O reservatório de jusante começa a esvaziar.</p>	 <p>9:24</p>	<p>Com esvaziamento do reservatório, e aumento das velocidades, ocorre remoção dos taludes laterais da brecha. Ruptura do talude de jusante.</p>
 <p>9:28</p>	<p>Mais material é removido devido às altas velocidades, e a brecha se alarga pelo talude de jusante.</p>	 <p>9:36</p>	<p>Com o baixo fluxo ocorre formação de sulcos nas partes baixas da brecha.</p>




---

Momento analisado	Observação
<p data-bbox="165 193 309 272">9:55</p> 	<p data-bbox="1330 384 1518 416">Fim do ensaio.</p>

---

**Tabela 7.10-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 2 – Barragem de jusante.




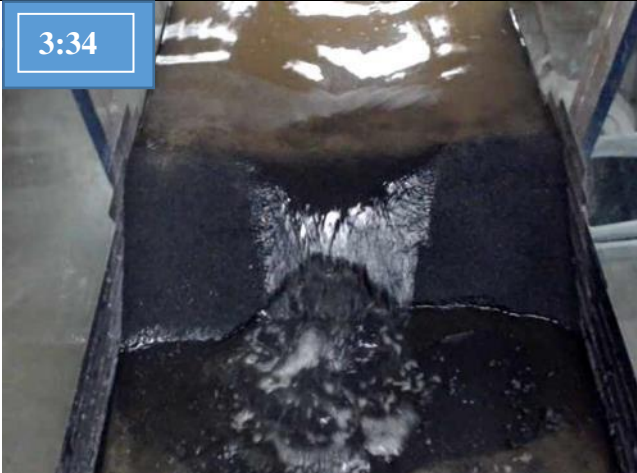

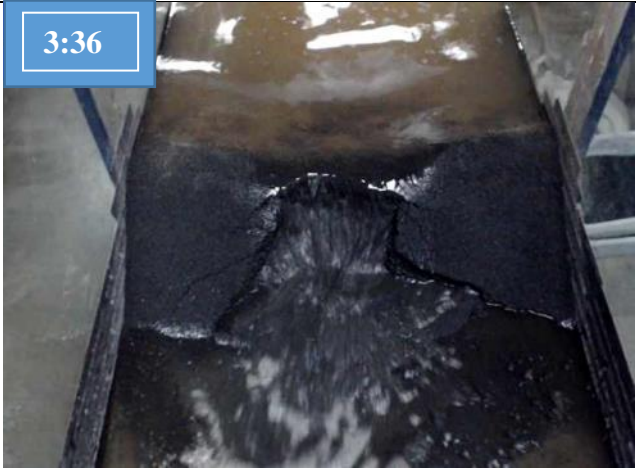


Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:00</p>	<p>Chegada da onda da ruptura de montante.</p>	 <p>9:03</p>	<p>Início do galgamento, após amortecimento no reservatório de jusante.</p>
 <p>9:09</p>	<p>Brecha forma-se rapidamente com fluxo passando por todo o maciço.</p>	 <p>9:11</p>	<p>Deslocamento massivo de material do maciço devido às altas velocidades.</p>



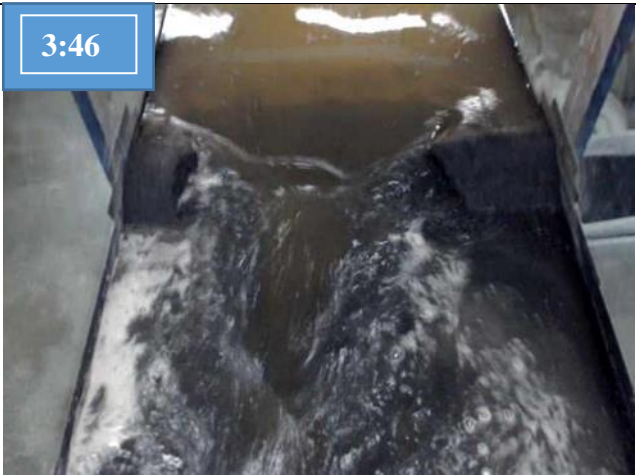
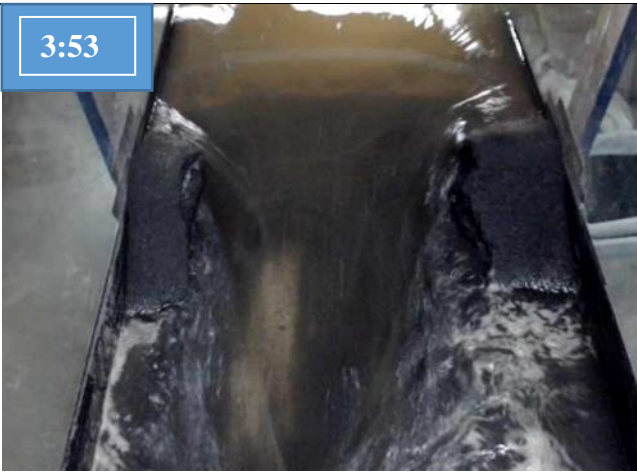
Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="168 204 302 272">9:14</p> 	<p data-bbox="824 363 996 507">A brecha se alarga rapidamente.</p>	<p data-bbox="1041 204 1176 272">9:22</p> 	<p data-bbox="1684 308 1883 560">Continuidade de desprendimento de material dos taludes.</p>
<p data-bbox="168 742 302 810">9:29</p> 	<p data-bbox="1227 906 1473 991">Brecha já formada. Fim do ensaio.</p>		



Para o Cenário I Teste 2, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.9 e Tabela 7.10, verifica-se que o TF1 foi de 12 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 31 s e, para a barragem de jusante o TF1 é adotado igual a 0 s e o TF2 foi de 19 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens é igual a 0,61.

A Tabela 7.11 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.12 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante para o Cenário I Teste 3.


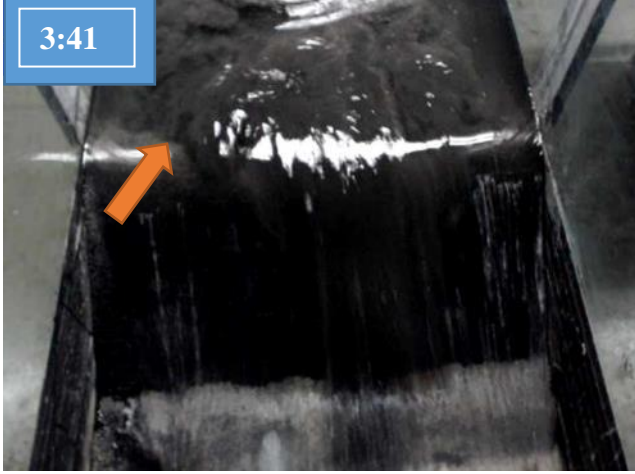
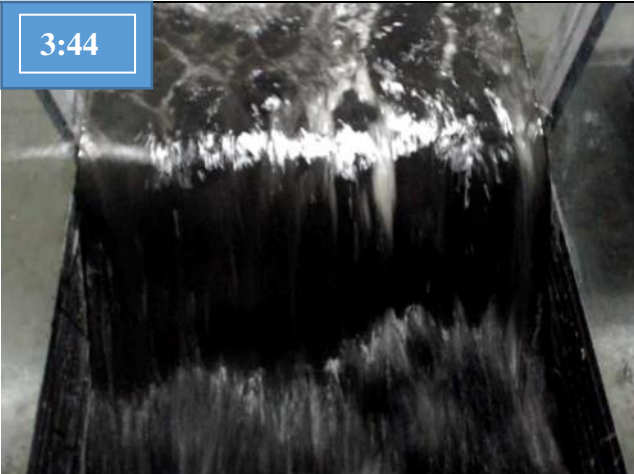
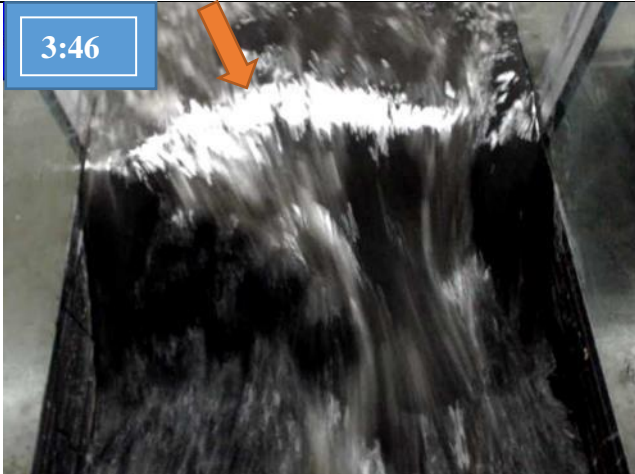
**Tabela 7.11-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 3 – Barragem de montante.

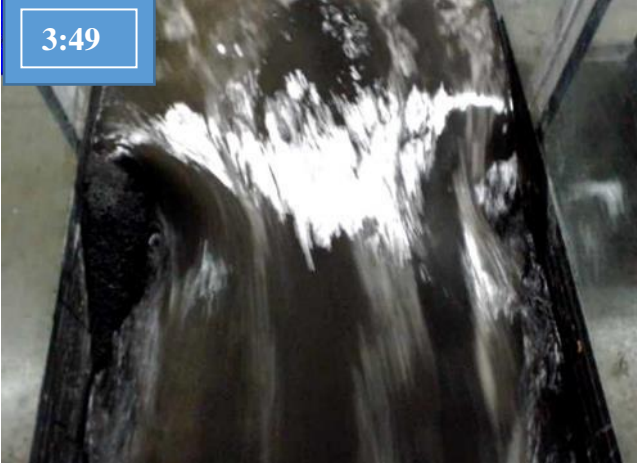



Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 	<p>Início do galgamento simultaneamente ao deslocamento junto ao pé do talude de jusante.</p>	 	<p>O fluxo advindo do reservatório promove o começo da remoção de material no talude de jusante.</p>
 	<p>A brecha se desenvolve para montante e se alarga.</p>	 	<p>O reservatório se conecta com a brecha, e o processo se torna mais rápido.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<div data-bbox="159 193 309 272" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">3:39</div> 	<p>Continuidade de evolução da brecha.</p>	<div data-bbox="1048 193 1198 272" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">3:43</div> 	<p>A brecha se alarga devido a remoção de grandes placas de material.</p>
<div data-bbox="159 683 309 762" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">3:46</div> 	<p>O reservatório de jusante está cheio e ocorre remanso nos taludes de jusante.</p>	<div data-bbox="1048 683 1198 762" style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content;">3:53</div> 	<p>Após ruptura da barragem de jusante os reservatórios se esvaziam rapidamente, com consequente aumento da brecha.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
	<p>Desprendimento de parte da crista esquerda e continuidade de remoção de material dos taludes.</p>		<p>Com laminação do fluxo ocorre formação de sulcos na parte inferior dos taludes, porém a brecha praticamente não evolui mais.</p>
	<p>Fim do ensaio.</p>		

**Tabela 7.12-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário I Teste 3 – Barragem de jusante.



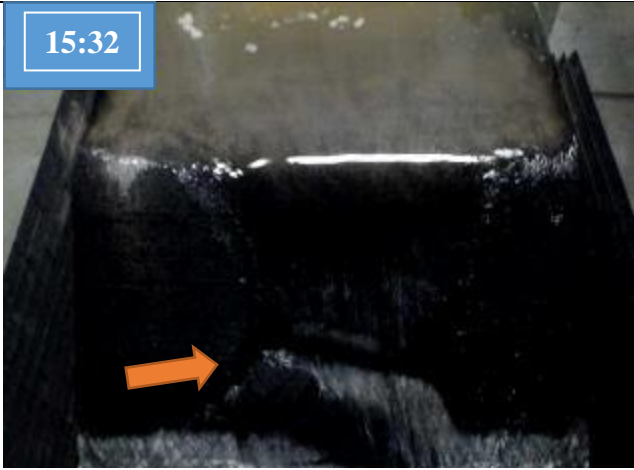

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>3:38</p>	<p>Início do galgamento, com a chegada da onda de ruptura de montante.</p>	 <p>3:41</p>	<p>Chegada do material removido da barragem de montante.</p>
 <p>3:44</p>	<p>Galgamento ocorre de forma generalizada por toda a barragem.</p>	 <p>3:46</p>	<p>A concentração do fluxo na parte central da barragem indica que a brecha se formou rapidamente neste local.</p>

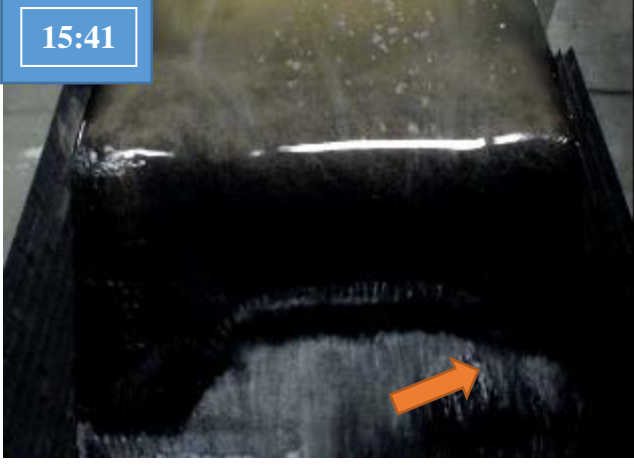



Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>3:49</p>	<p>Continuidade de formação da brecha.</p>	 <p>4:00</p>	<p>A brecha continua evoluindo.</p>
 <p>4:01</p>	<p>Ocorre a última remoção de material da brecha, e a brecha se estabiliza.</p>	 <p>4:06</p>	<p>Fim do ensaio.</p>

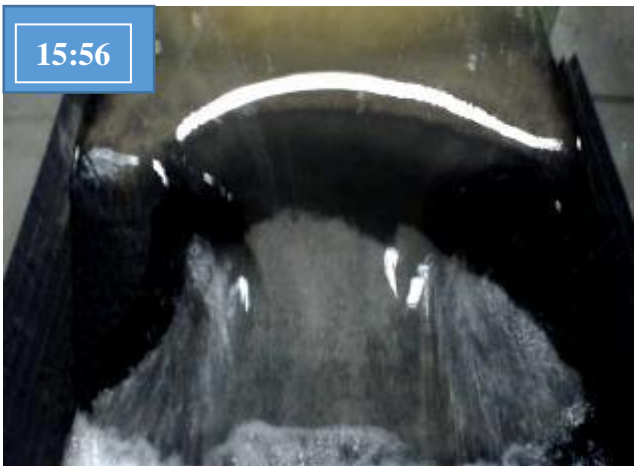


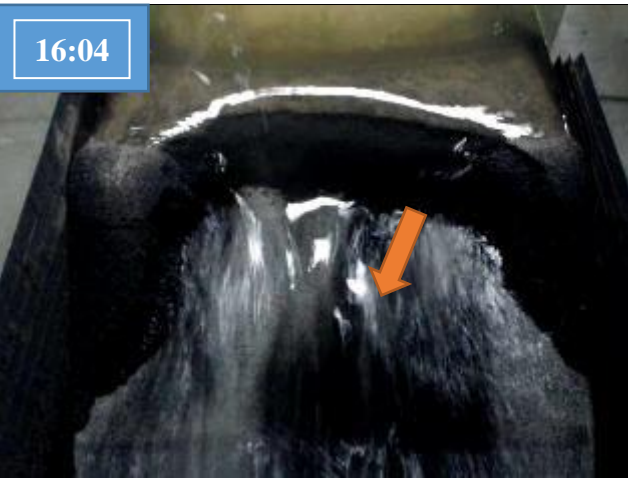
Para o Cenário I Teste 3, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.11 e Tabela 7.12, verifica-se que o TF1 foi de 6 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 26 s, e para a barragem de jusante o TF1 é adotado igual a 0 s e o TF2 foi de 20 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens é igual a 0,77.

A Tabela 7.13 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.14 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante, ambas para o Cenário II Teste 1.

**Tabela 7.13-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 1 – Barragem de montante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>15:29</p>	<p>Início do galgamento.</p>	 <p>15:31</p>	<p>Começo de remoção de material no pé do talude de jusante.</p>
 <p>15:32</p>	<p>A erosão regressiva começa a se desenvolver pelo talude de jusante.</p>	 <p>15:36</p>	<p>Ocorrem deslocamentos ao longo do talude de jusante.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="159 193 309 268">15:41</p> 	<p data-bbox="808 308 1037 507">Ocorrem deslocamentos laterais no talude de jusante.</p>	<p data-bbox="1061 193 1211 268">15:47</p> 	<p data-bbox="1720 336 1966 480">Continuidade dos deslocamentos do talude de jusante.</p>
<p data-bbox="159 671 309 746">15:50</p> 	<p data-bbox="808 786 1037 1034">Ocorre um deslocamento da crista que leva a conexão com o reservatório.</p>	<p data-bbox="1061 671 1211 746">15:53</p> 	<p data-bbox="1720 842 1966 986">Aumento da brecha rapidamente pelas laterais.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="159 209 309 288">15:56</p>	<p data-bbox="846 347 1010 539">A brecha continua se expandindo lateralmente.</p>	 <p data-bbox="1061 209 1211 288">16:02</p>	<p data-bbox="1727 371 1966 515">Perdas de material nas laterais da brecha.</p>
 <p data-bbox="159 751 309 831">16:03</p>	<p data-bbox="813 858 1039 1114">Continuidade das perdas de material nas laterais da brecha.</p>	 <p data-bbox="1061 751 1211 831">16:04</p>	<p data-bbox="1715 914 1980 1058">Perda de material na parte central do maciço.</p>

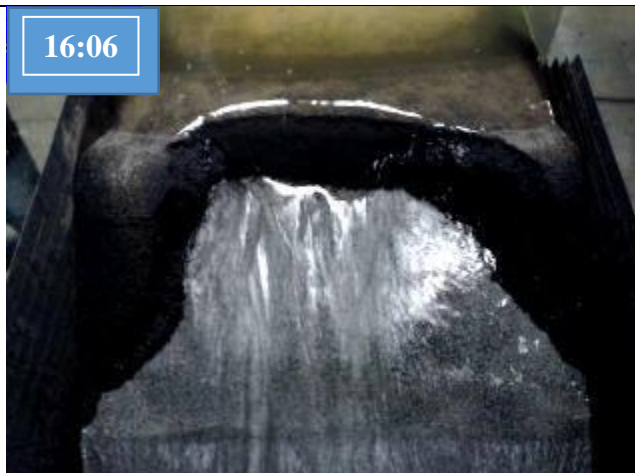
---

Momento analisado

Observação

---




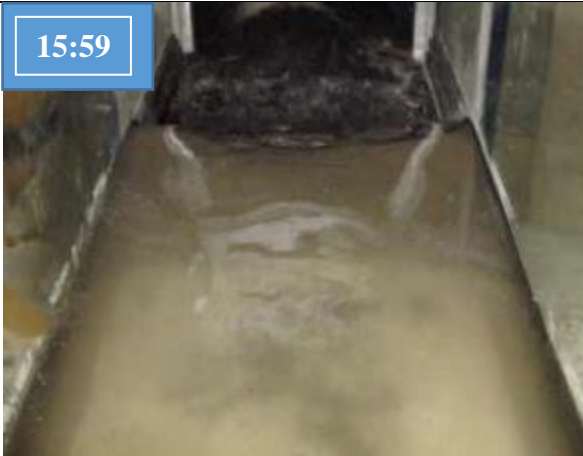
16:06

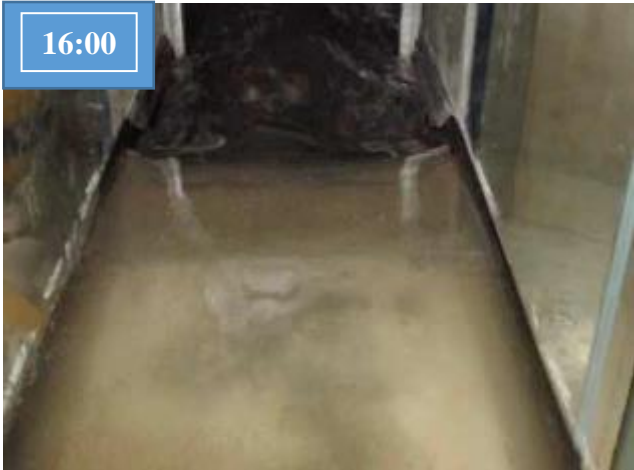





A geometria da brecha está formada, sem mais remoção de material.

Fim do ensaio.

**Tabela 7.14-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 1 – Barragem de jusante.




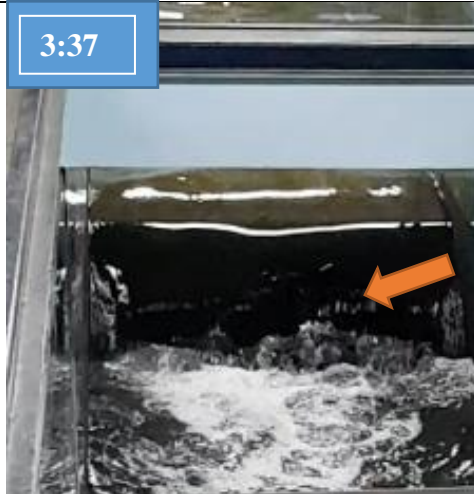
Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>15:55</p>	<p>Início do galgamento na parte central do maciço.</p>	 <p>15:56</p>	<p>Propagação da onda de ruptura de montante pelo reservatório de jusante.</p>
 <p>15:58</p>	<p>A brecha já atinge a crista (onde pôde-se notar um deslocamento) e verifica-se o material removido na parte de jusante do canal.</p>	 <p>15:59</p>	<p>O reservatório se conecta com a brecha, e o processo se torna mais rápido. Material em grande quantidade é lançado para jusante.</p>





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="159 199 309 279">16:00</p>	<p data-bbox="813 391 1077 486">Continuidade de evolução da brecha.</p>	 <p data-bbox="1106 199 1234 279">16:02</p>	<p data-bbox="1686 311 2040 566">A brecha se alarga devido a remoção de grandes placas de material. Chegada do material da barragem de montante.</p>
 <p data-bbox="159 742 309 821">16:05</p>	<p data-bbox="813 821 1077 1141">A barragem de jusante é coberta pela passagem do material removido da barragem de montante.</p>	 <p data-bbox="1106 742 1234 821">16:08</p>	<p data-bbox="1686 742 2040 1220">O material removido da barragem de montante que não galgou a barragem de jusante é armazenado no reservatório da barragem de jusante, o fluxo já é pequeno e a brecha tem sua forma final. Fim do ensaio.</p>

Para o Cenário II Teste 1, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.13 e Tabela 7.14, verifica-se que o TF1 foi de 21 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 16 s, e para a barragem de jusante o TF1 é adotado igual a 0 s e o TF2 foi de 13 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens é igual a 0,81.





A Tabela 7.15 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.16 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante para o Cenário II Teste 2.



**Tabela 7.15-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 2 – Barragem de montante.



Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p>3:01</p> 	<p>Início do galgamento.</p>	<p>3:08</p> 	<p>Desplacamento junto ao pé do talude de jusante devido ao fluxo pelo talude.</p>
<p>3:10</p> 	<p>A erosão regressiva se prolonga pelo talude de jusante em direção a crista.</p>	<p>3:37</p> 	<p>Continuidade de remoção de material do talude de jusante.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>3:44</p>	<p>Continuidade de remoção de material do talude de jusante.</p>	 <p>3:50</p>	<p>Acontece conexão com o reservatório.</p>
 <p>3:52</p>	<p>A brecha se expande rapidamente em direção as ombreiras. Onda de cheia é liberada para o reservatório de jusante.</p>	 <p>3:57</p>	<p>Deslocamento da parte central do maciço, atingindo-se a parte montante do maciço. Fim do ensaio.</p>

**Tabela 7.16-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 2 – Barragem de jusante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:00</p>	Eminência do galgamento.	 <p>9:01</p>	Início do galgamento pela parte central do maciço.
 <p>9:11</p>	Material desprendido do maciço é carreado, porém sem ocorrer erosão no maciço.	 <p>9:19</p>	Chegada da primeira onda de cheia, com aumento da vazão, devido ruptura de montante.


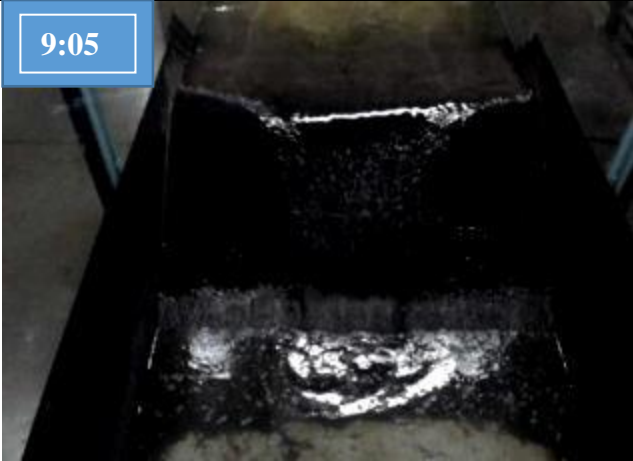


Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:24</p>	<p>Chegada da segunda onda de cheia, com material da ruptura de montante.</p>	 <p>9:30</p>	<p>Início da formação de brecha próxima à ombreira direita.</p>
 <p>9:31</p>	<p>Ruptura repentina de todo o talude de jusante a partir da crista.</p>	 <p>9:32</p>	<p>A erosão regressiva avança rapidamente para montante, em toda a extensão do talude a montante.</p>

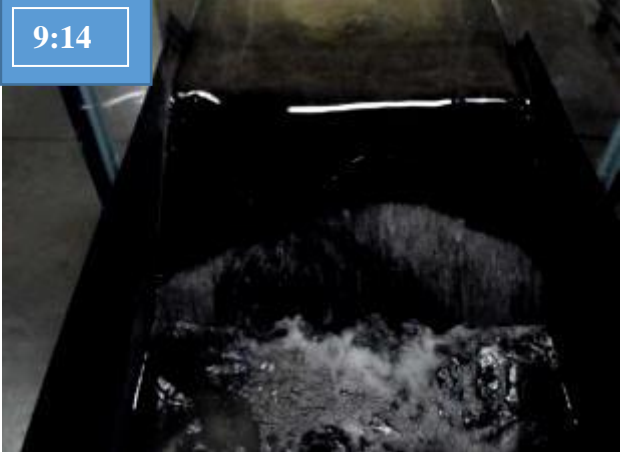



Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
9:34 	Continuidade da erosão regressiva pela extensão do talude a montante.	9:36 	O reservatório de jusante está quase vazio e a brecha se aproxima de sua forma final. Fim do ensaio.

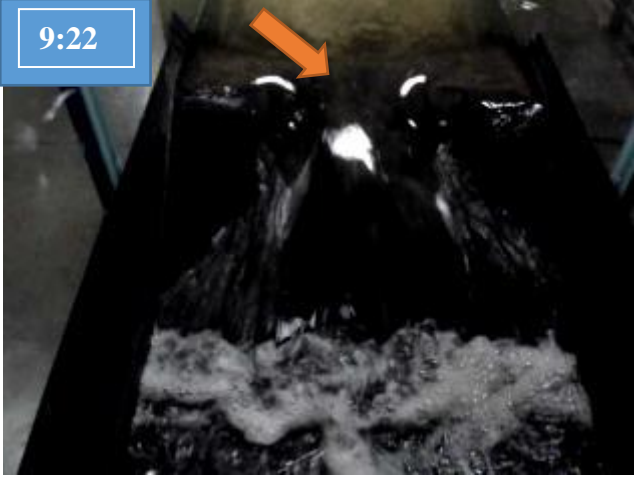
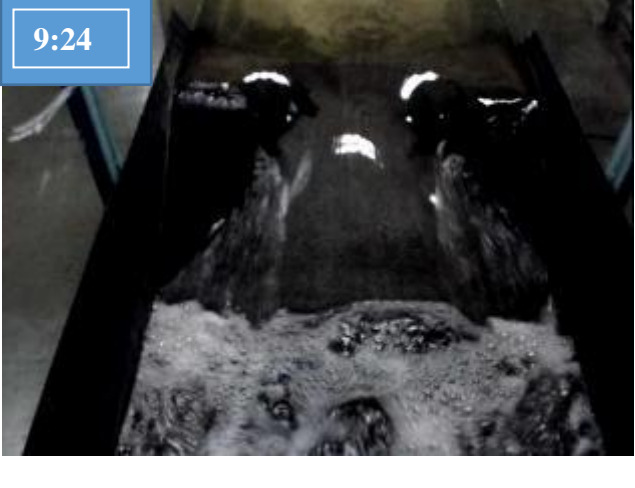


Para o Cenário II Teste 2, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.15 e Tabela 7.16, verifica-se que o TF1 foi de 49 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 7 s, e para a barragem de jusante o TF1 é adotado igual a 30 s e o TF2 foi de 6 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens é igual a 0,86.


A Tabela 7.17 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.18 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante, ambas para o Cenário II Teste 3.

**Tabela 7.17-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 3 – Barragem de montante.





Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p>9:01</p> 	<p>Início do galgamento.</p>	<p>9:05</p> 	<p>O fluxo advindo do reservatório promove o começo da remoção de material no talude de jusante, junto ao pé do mesmo.</p>
<p>9:08</p> 	<p>Início de remoção de material junto ao pé do talude de jusante devido ao galgamento.</p>	<p>9:12</p> 	<p>Remoção do material se intensifica com erosão regressiva ao longo do talude de jusante.</p>


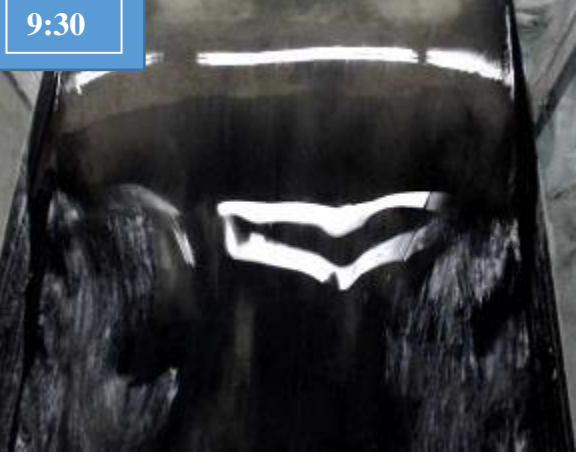

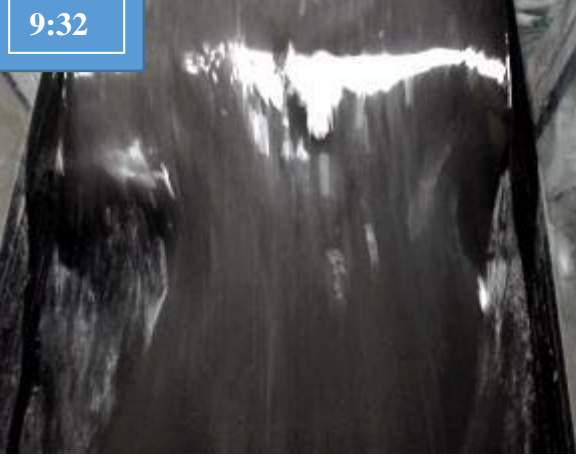
Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="197 212 264 244">9:14</p> 	<p data-bbox="813 228 1010 592">Continuidade de remoção do material com erosão regressiva ao longo do talude de jusante.</p>	<p data-bbox="1061 212 1128 244">9:17</p> 	<p data-bbox="1720 368 1917 448">Conexão com o reservatório.</p>
<p data-bbox="197 702 264 734">9:19</p> 	<p data-bbox="813 778 1010 1031">A brecha começa a se expandir pelas laterais e rapidamente.</p>	<p data-bbox="1061 702 1128 734">9:20</p> 	<p data-bbox="1697 831 1939 975">Aumento da brecha em direção às ombreiras.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:22</p>	<p>Talude de montante é removido devido ao aumento do fluxo na parte central do maciço.</p>	 <p>9:24</p>	<p>Com o fluxo concentrado na parte central do maciço começa a haver erosão nas partes inferiores dos taludes das brechas.</p>
 <p>9:26</p>	<p>A brecha se expande lateralmente pelos taludes.</p>	 <p>9:31</p>	<p>O reservatório de jusante está cheio devido a ruptura de montante.</p>



Momento analisado	Observação
<p data-bbox="165 212 309 284">9:37</p> 	<p data-bbox="846 304 1928 392">A brecha de montante atinge sua geometria final, verificando-se que não ocorre mais desprendimento de material do maciço.</p> <p data-bbox="1290 416 1480 443">Fim do ensaio.</p>

**Tabela 7.18-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário II Teste 3– Barragem de jusante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:23</p>	<p>Início do galgamento do maciço.</p>	 <p>9:26</p>	<p>Início de remoção de material no talude de jusante.</p>
 <p>9:27</p>	<p>A remoção de material acontece em todo o pé do talude de jusante. Para a barragem de jusante o fluxo ocupa toda a crista e remove material de todo o pé do talude de jusante.</p>	 <p>9:28</p>	<p>A erosão regressiva se desloca para montante pelo talude e forma um arco próximo à parte central do maciço.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<p data-bbox="159 209 309 288">9:29</p> 	<p data-bbox="808 264 1099 624">Devido ao fluxo advindo da ruptura da barragem de montante ocorre uma fissura ao longo da crista. Acontece conexão com reservatório.</p>	<p data-bbox="1122 209 1272 288">9:30</p> 	<p data-bbox="1704 296 1924 600">Toda a parte da crista é removida instantaneamente devido a grandeza do fluxo.</p>
<p data-bbox="159 772 309 852">9:31</p> 	<p data-bbox="808 887 1099 1086">A erosão regressiva ocorre com intensidade e remove o talude de montante.</p>	<p data-bbox="1122 772 1272 852">9:32</p> 	<p data-bbox="1704 775 1924 1198">Com chegada do material removido de montante a barragem de jusante é removida quase integralmente.</p>

---




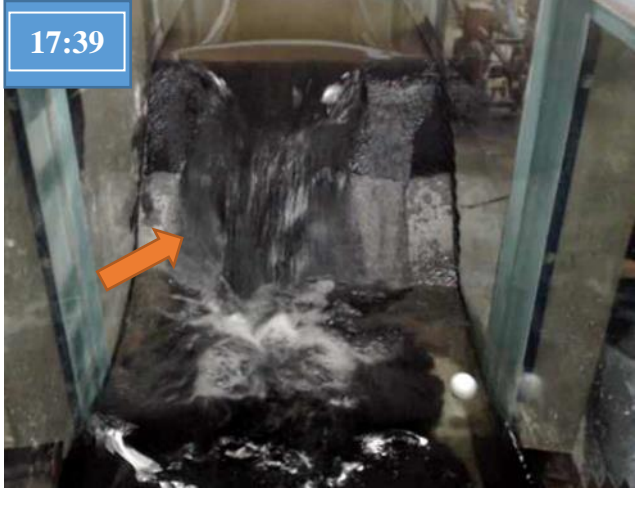
Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>9:35</p>	<p>Continuidade da passagem do material que estava no reservatório.</p>	 <p>9:37</p>	<p>A brecha ocupa praticamente toda a barragem, restando somente partes das ombreiras. Fim do ensaio.</p>


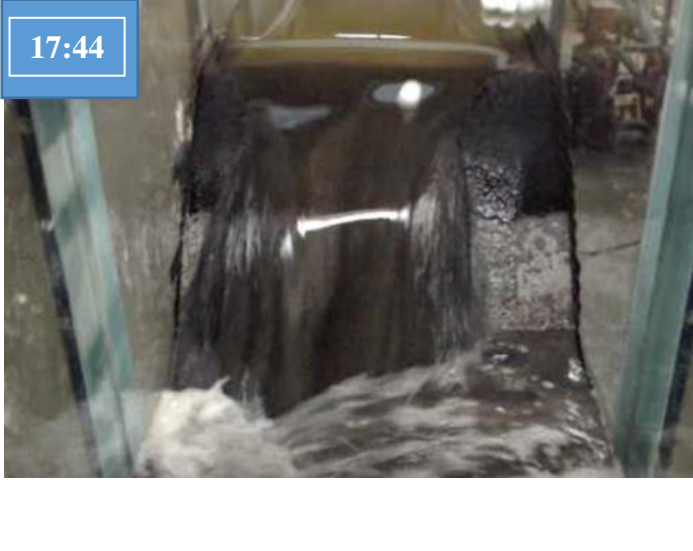
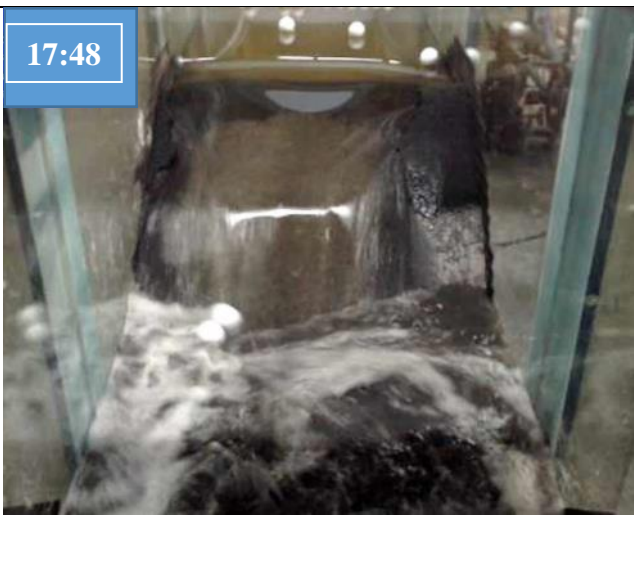

---

Para o Cenário II Teste 3, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.17 e Tabela 7.18, verifica-se que o TF1 foi de 16 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 20 s, e para a barragem de jusante o TF1 é adotado igual a 5 s e o TF2 foi de 16 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens é igual a 0,80.

A Tabela 7.19 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de montante e a Tabela 7.20 apresenta os momentos notáveis de formação da brecha para a barragem de jusante para o Cenário III Teste 1.

**Tabela 7.19-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário III Teste 1 – Barragem de montante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>17:32</p>	<p>Início do galgamento.</p>	 <p>17:37</p>	<p>Erosão junto ao pé do talude de jusante.</p>
 <p>17:38</p>	<p>Evolução da brecha rapidamente para montante em direção a crista.</p>	 <p>17:39</p>	<p>Conexão com o reservatório e a brecha começa a se alargar rapidamente.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p data-bbox="159 193 286 268">17:41</p>	<p data-bbox="790 193 1021 746">Continuidade de remoção do material com erosão lateral da brecha.</p>	 <p data-bbox="1021 193 1149 268">17:44</p>	<p data-bbox="1711 193 1939 746">Continuidade de remoção do material com erosão lateral da brecha.</p>
 <p data-bbox="159 746 286 821">17:48</p>	<p data-bbox="790 746 1021 1310">Continuidade de remoção do material com erosão lateral da brecha. Reservatório de jusante completamente cheio.</p>	 <p data-bbox="1021 746 1149 821">17:50</p>	<p data-bbox="1711 746 1939 1310">Margem esquerda da barragem de montante removida.</p>

---

Momento analisado

Observação





---

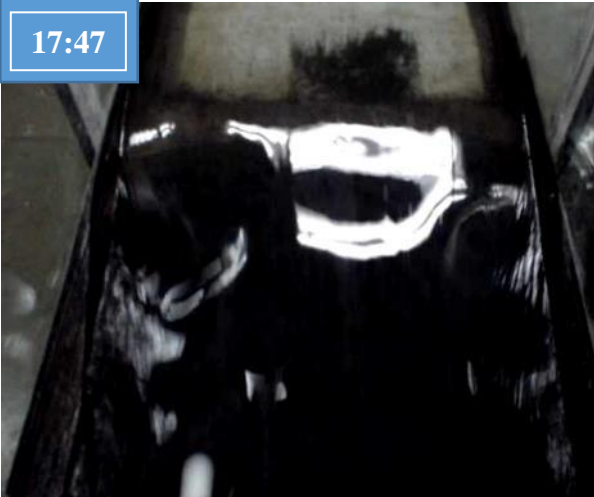
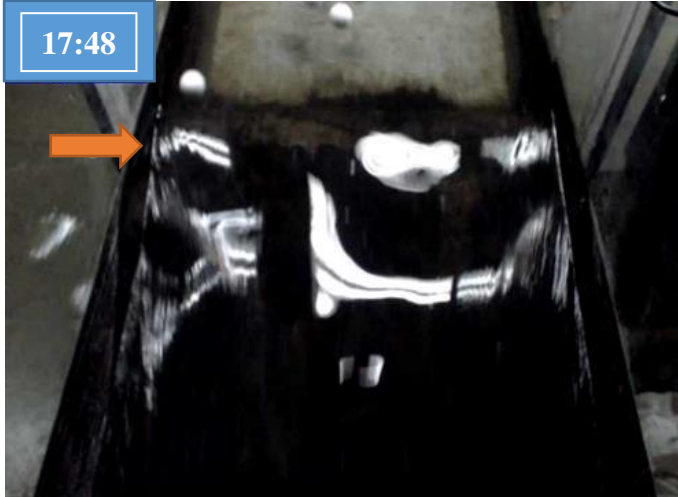
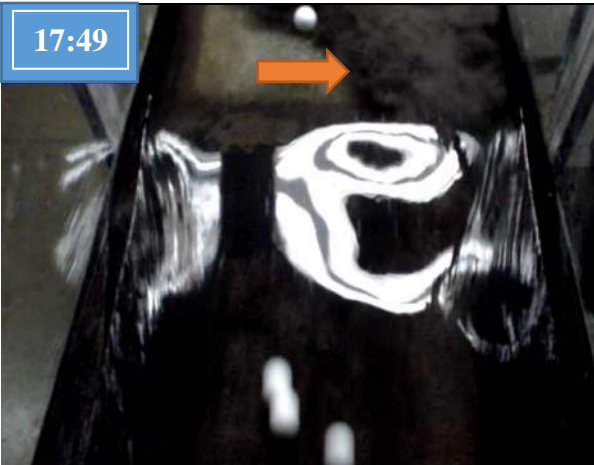
17:54



Geometria da brecha ocupa sua forma final.

**Tabela 7.20-** Resultado do tempo de formação de brecha – Cenário III Teste 1 – Barragem de jusante.

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
 <p>17:41</p>	<p>Início do galgamento do maciço.</p>	 <p>17:44</p>	<p>Início de remoção de material no talude de jusante lado esquerdo.</p>
 <p>17:45</p>	<p>A remoção de material avança rapidamente em todo o pé do talude de jusante e como o fluxo ocupa toda a crista forma-se uma trinca na crista devido ao avanço em direção a montante.</p>	 <p>17:46</p>	<p>A brecha regressiva se desloca para montante por toda a crista.</p>

Momento analisado	Observação	Momento analisado	Observação
<div data-bbox="174 204 293 268" style="background-color: #4a86e8; color: white; padding: 2px; font-weight: bold;">17:47</div> 	<p>A brecha regressiva avança rapidamente para montante.</p>	<div data-bbox="1144 204 1263 268" style="background-color: #4a86e8; color: white; padding: 2px; font-weight: bold;">17:48</div> 	<p>A brecha atinge o talude de montante.</p>
<div data-bbox="174 762 293 826" style="background-color: #4a86e8; color: white; padding: 2px; font-weight: bold;">17:49</div> 	<p>A remoção de material e formação completa da brecha foi devido somente a passagem da onda líquida.</p> <p>Quando chega a pluma do material da barragem de montante a brecha de jusante já está formada.</p>		

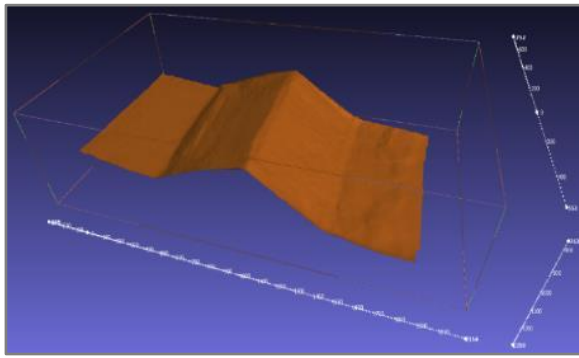
Para o Cenário III Teste 1, através da análise dos dados das filmagens da Tabela 7.19 e Tabela 7.20, verifica-se que o TF1 foi de 5 s e o TF2 para a barragem de montante foi de 16 s, e para a barragem de jusante o TF1 é adotado igual a 3 s e o TF2 foi de 5 s. A razão do tempo de formação de brecha dos modelos das barragens é igual a 0,31.

Uma diferença notável deste ensaio para os demais é que foi verificado que a brecha de ruptura da barragem de jusante foi completamente desenvolvida somente pela onda líquida, antes da chegada do material removido da barragem de montante alcançar o galgamento da barragem de jusante.

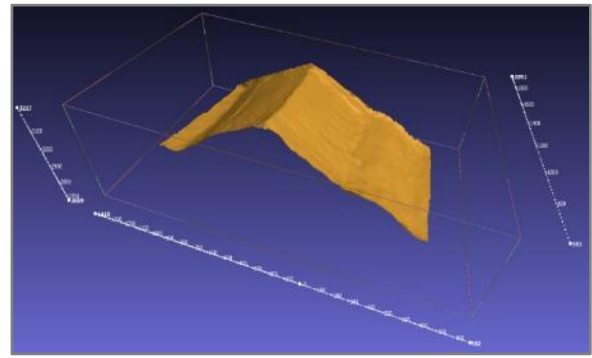
### **7.2.3 Análise da geometria da brecha**

Adiante são apresentadas as figuras que representam os resultados dos modelos escaneados com sensor 3D para todas as simulações procedidas e validadas. Estas figuras 3D são dispostas pelo *software* Meshlab em um esquema de eixos reticulados em coordenadas cartesianas (x, y e z), onde a escala milimétrica é automaticamente representada junto a estes eixos.

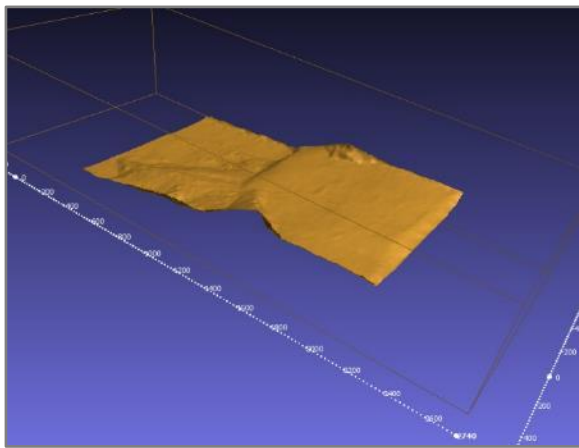
As representações 3D apresentadas na Figura 7.11 (a, b, c e d) mostram os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura. Considerando-se a seção de área mais próxima à crista do modelo reduzido da barragem pôde-se analisar as larguras das brechas, para o Cenário I P.



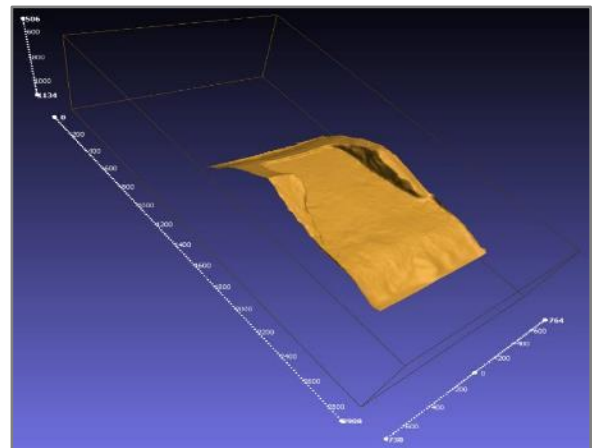
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I P - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I P - Pré-ruptura.



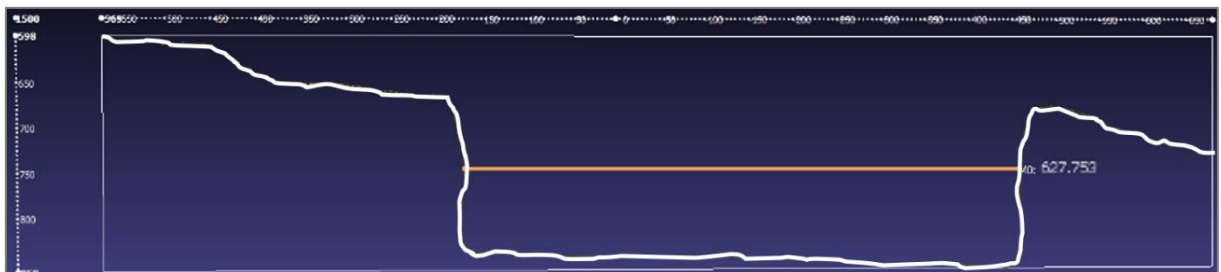
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I P - Pós-ruptura.



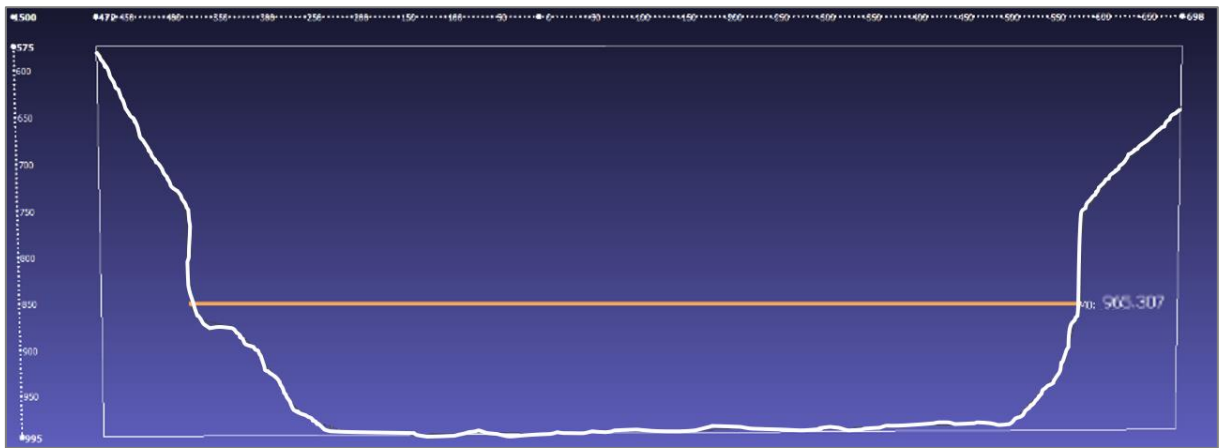
d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I P - Pós-ruptura.

**Figura 7.11:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I P.

A Figura 7.12 e a Figura 7.13 apresentam as larguras mínimas nas brechas. Observa-se que as alturas de formação das brechas são iguais as alturas das barragens e, assim, verifica-se erosão total até o lastro que representa o terreno natural.



**Figura 7.12:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I P.

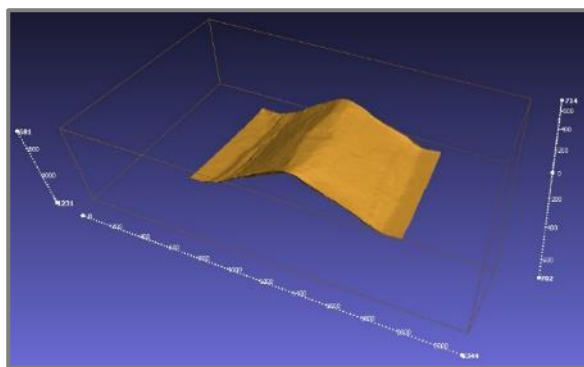


**Figura 7.13:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I P.

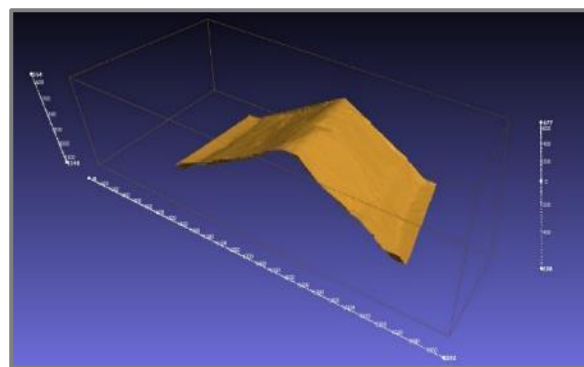
Verifica-se da Figura 7.12 e da Figura 7.13 que a largura da brecha de montante é de 627,8 mm, em sua seção mais próxima à crista, e que a largura da brecha de jusante é de 965,3 mm, considerando-se que a largura máxima do canal é de 1.000,0 mm.

A análise quantitativa da brecha do Cenário I P permite verificar que a erosão do maciço leva a taludes praticamente verticais para a barragem de montante, enquanto que a situação do regime supercrítico na passagem da onda de ruptura pelo barramento de jusante leva a taludes mais suaves.

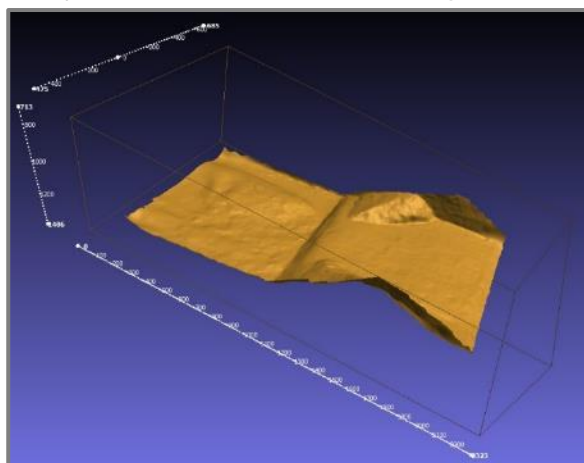
As representações 3D encontradas na Figura 7.14 (a, b, c e d) mostram os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário II P. Considerando-se a seção de área mais próxima à crista do modelo reduzido da barragem pôde-se analisar as larguras das brechas.



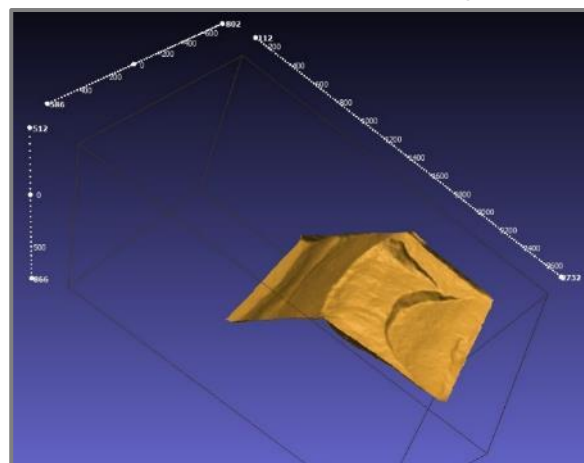
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II P- Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II P- Pré-ruptura.



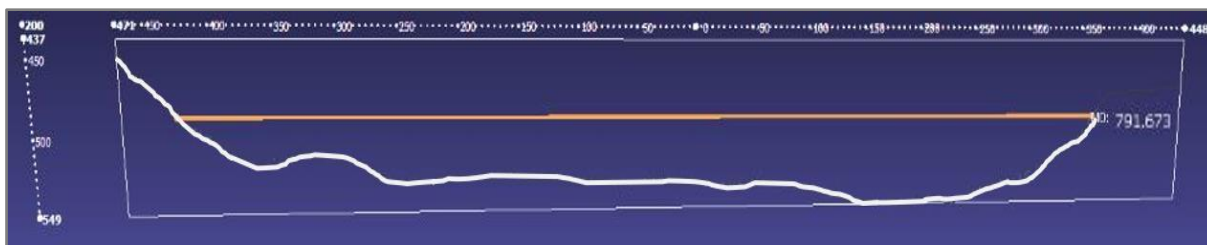
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II P- Pós-ruptura.



d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II P- Pós-ruptura.

**Figura 7.14:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II P.

A Figura 7.15 e a Figura 7.16 apresentam as larguras médias nas brechas. Cabe observar que a altura de formação da brecha de jusante foi igual à altura da barragem de jusante, porém, para a barragem de montante a altura não se desenvolveu completamente, chegando a apenas 112,0 mm.



**Figura 7.15:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II P.



**Figura 7.16:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II P.

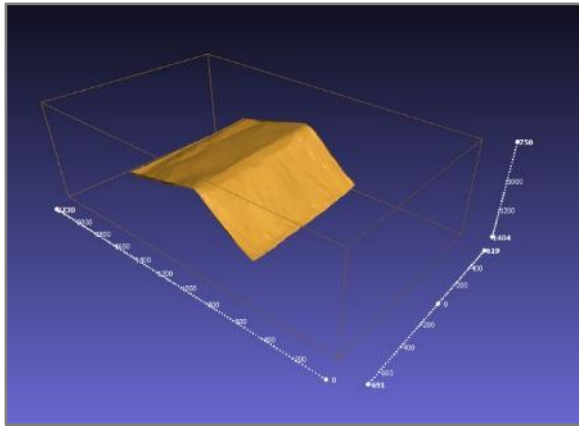
Verifica-se da Figura 7.15 que a largura da brecha de montante é de 791,7 mm, em sua seção mais ampla, e que a largura da brecha de jusante é de 869,1 mm, conforme a Figura 7.16, sendo a largura máxima do canal igual 1.000,0 mm.

A análise quantitativa da brecha do primeiro ensaio do Cenário II P permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, o que pode ser creditado ao uso do material reutilizado.

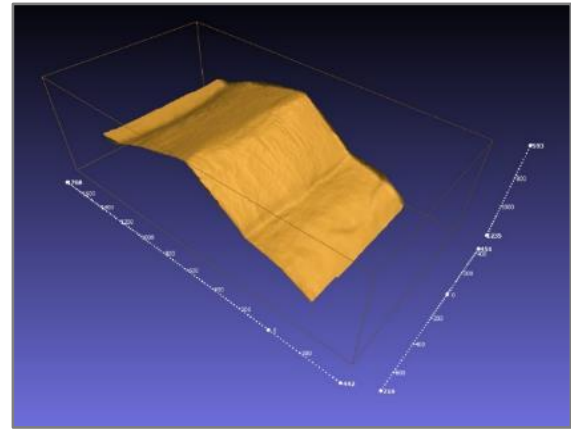
Foi verificada a formação de taludes praticamente verticais para ambos os modelos reduzidos das barragens.

A barragem de jusante teve sua crista completamente removida pela ação erosiva da passagem da onda de ruptura de montante e, assim, a seção analisada está localizada na parte do maciço a montante da crista, onde restou preservado uma parte do maciço.

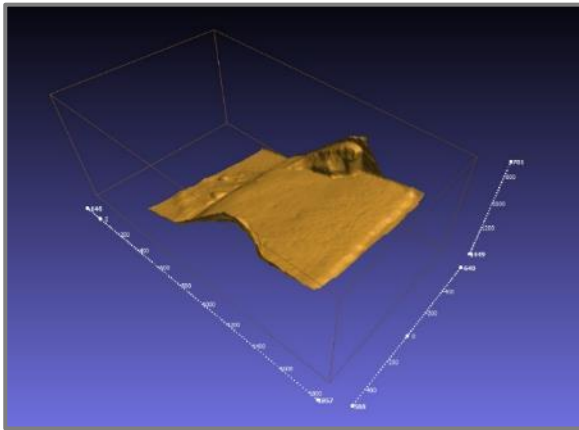
As representações 3D encontradas na Figura 7.17 (a, b, c e d) mostram os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário I Teste 1. Considerando-se a seção de área mais próxima à crista do modelo reduzido da barragem pôde-se analisar as larguras das brechas.



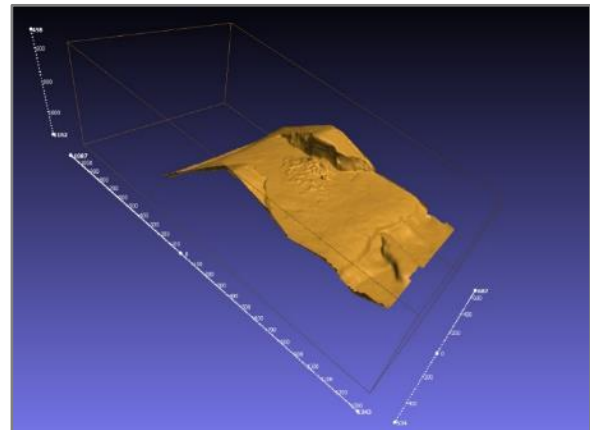
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I Teste 1 - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I Teste 1 - Pré-ruptura.



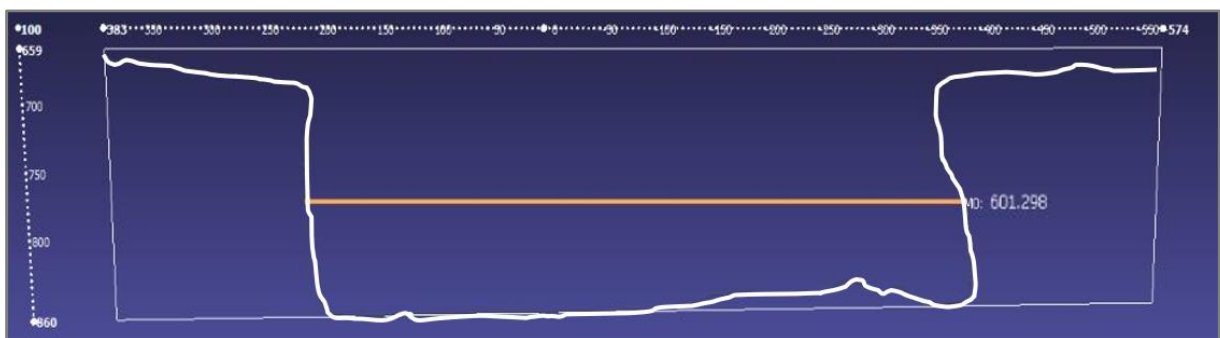
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I Teste 1 - Pós-ruptura.



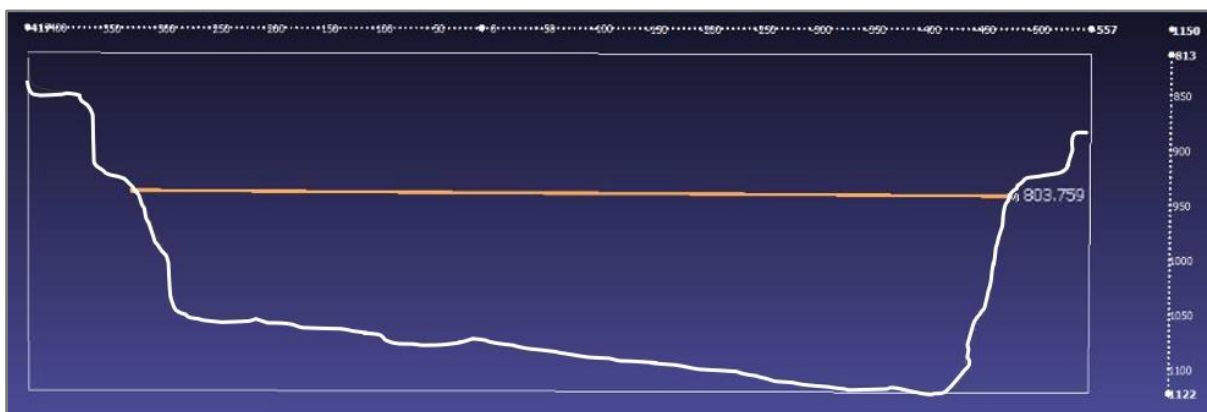
d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I Teste 1 - Pós-ruptura.

**Figura 7.17:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I Teste 1.

A Figura 7.18 e a Figura 7.19 apresentam as larguras médias nas brechas. Cabe observar que a altura de formação da brecha das barragens de jusante e de montante foi igual à altura das barragens.



**Figura 7.18:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I Teste 1.



**Figura 7.19:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I Teste 1.

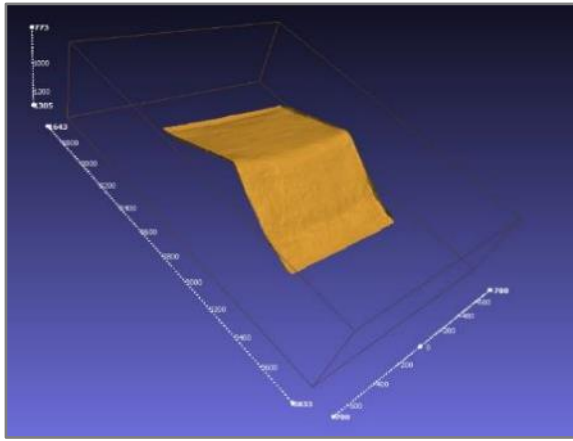
Verifica-se da Figura 7.18 e da Figura 7.19 que a largura média da brecha de montante é de 601,3 mm, em sua seção média, e que a largura da brecha de jusante é de 803,8 mm.

A análise qualitativa da brecha do Cenário I Teste 1 permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, restando os taludes laterais até a região da crista em ambos os lados. A barragem de jusante teve uma parcela da crista removida no lado esquerdo.

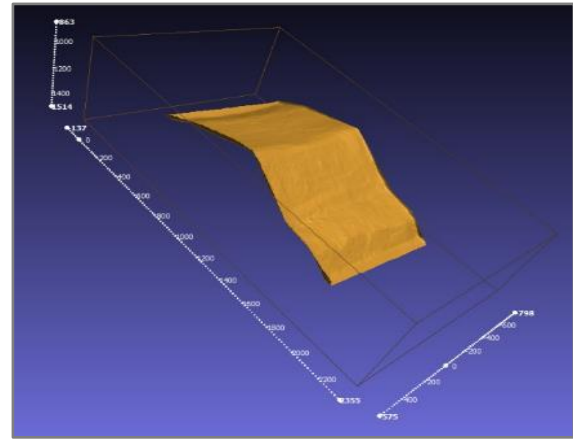
Foi verificada a formação de taludes praticamente verticais para a barragem de montante. A barragem de jusante apresenta os taludes laterais com um ângulo de inclinação mais suave.

Em ambas as barragens houve remoção por toda a altura destas, atingindo-se o lastro do terreno natural, com ressalva das partes laterais da barragem de montante terem sofrido uma redução bem menor.

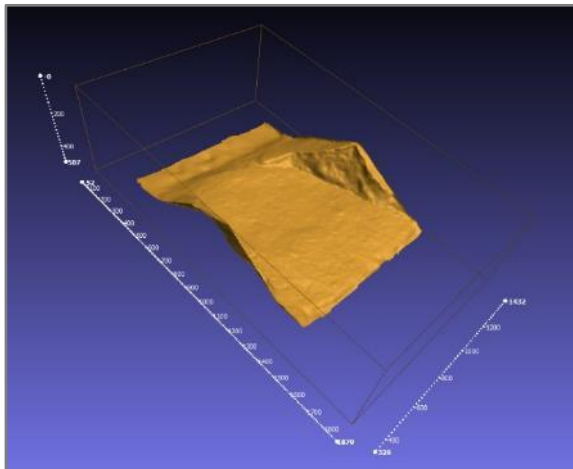
As representações 3D encontradas na Figura 7.20 (a, b, c e d) mostram os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário I Teste 2. Considerando-se a seção de área mais próxima à crista do modelo reduzido da barragem pôde-se analisar as larguras das brechas.



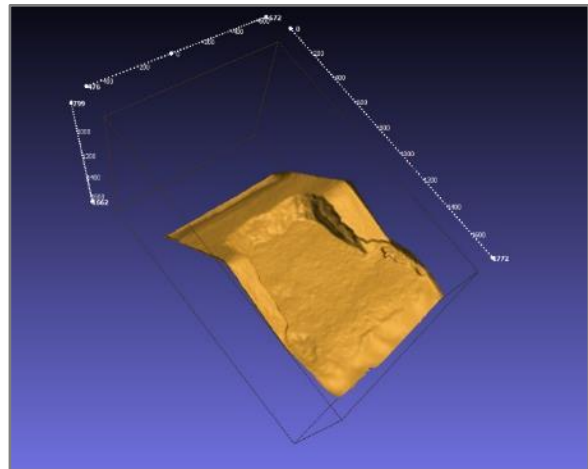
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I Teste 2 - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I Teste 2 - Pré-ruptura.



c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I Teste 2 - Pós-ruptura.

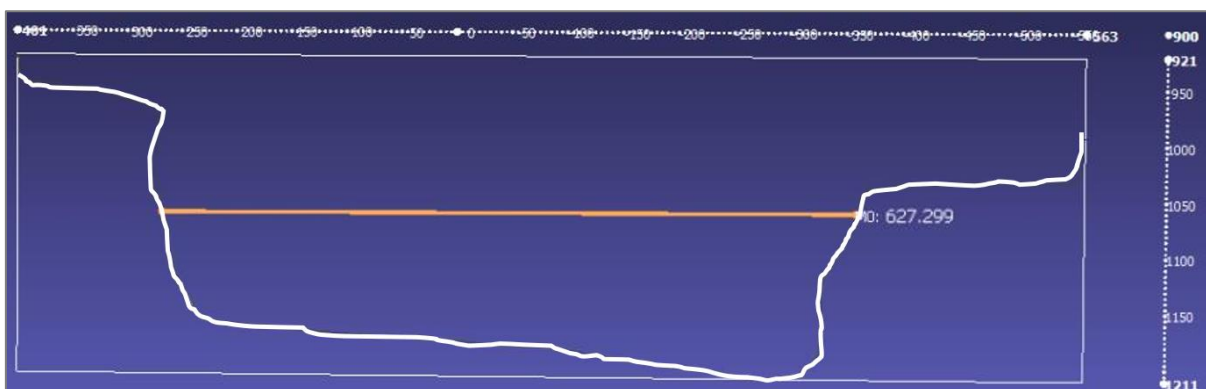


d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I Teste 2 - Pós-ruptura.

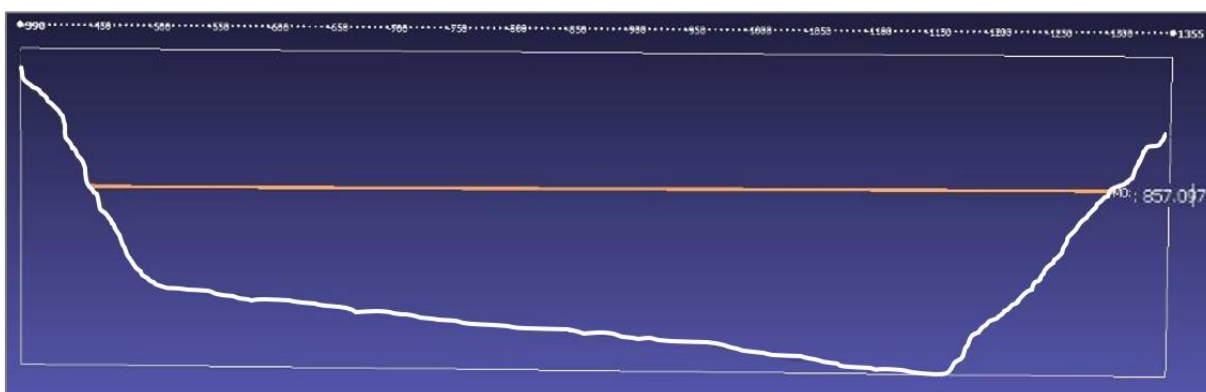
**Figura 7.20:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I Teste 2.

A Figura 7.21 e a Figura 7.22 apresentam as larguras médias nas brechas. Cabe observar que a altura de formação da brecha de jusante foi igual à altura da barragem de jusante, porém, para a barragem de montante, a altura se desenvolveu completamente na região da crista, e restou a parte montante do paramento montante.

Verifica-se da Figura 7.21 e da Figura 7.22 que a largura da brecha de montante é de 627,3 mm, em sua seção média, e que a largura da brecha de jusante é de 857,1 mm.



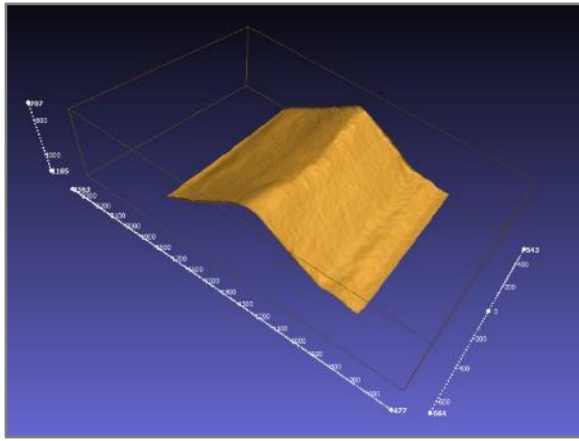
**Figura 7.21:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I Teste 2.



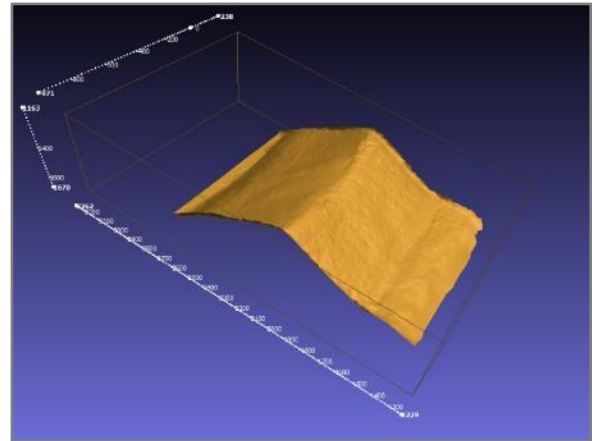
**Figura 7.22:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I Teste 2.

A análise qualitativa da brecha do Cenário I Teste 2 permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, restando a parte montante do paramento de montante. Porém, na região da crista a brecha atingiu a altura total. Para a barragem de montante foi verificada a formação de taludes praticamente verticais, mas, no caso da barragem de jusante os taludes apresentam-se com ângulo mais suave, porém, muito mais erodidos.

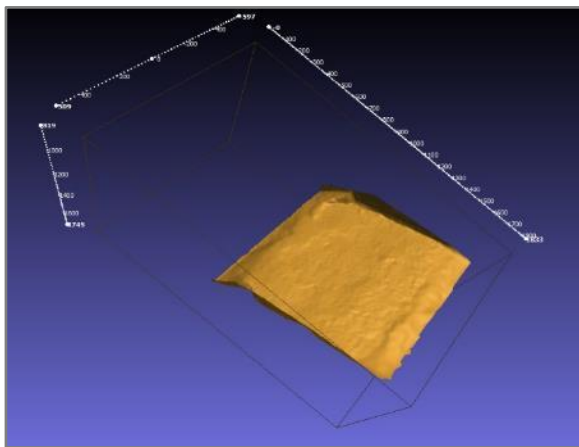
As representações 3D encontradas na Figura 7.23 (a, b, c e d) mostram os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário I Teste 3.



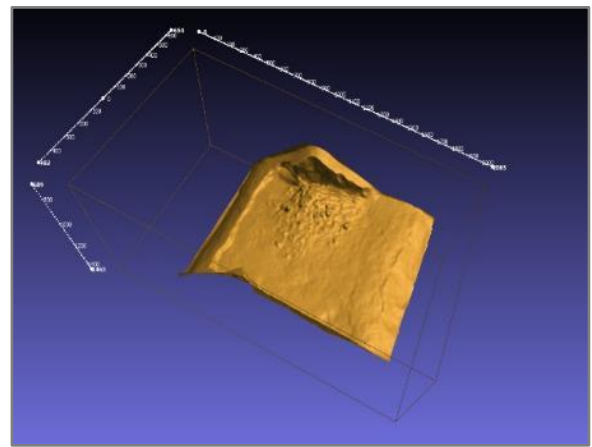
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I Teste 3 - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I Teste 3 - Pré-ruptura.



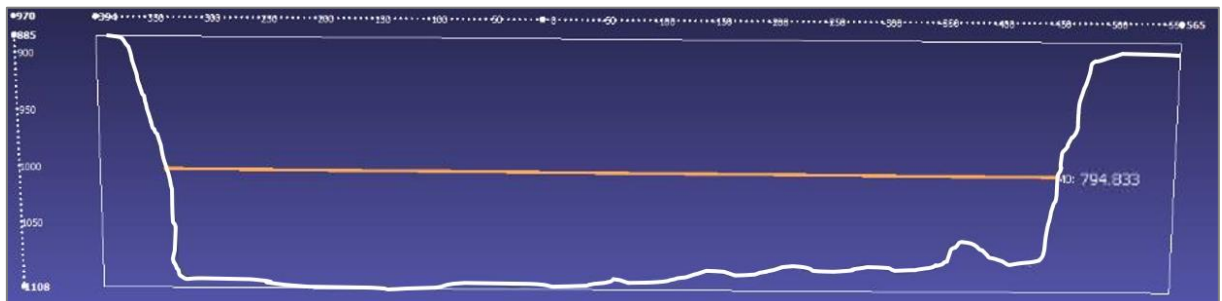
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário I Teste 3 - Pós-ruptura.



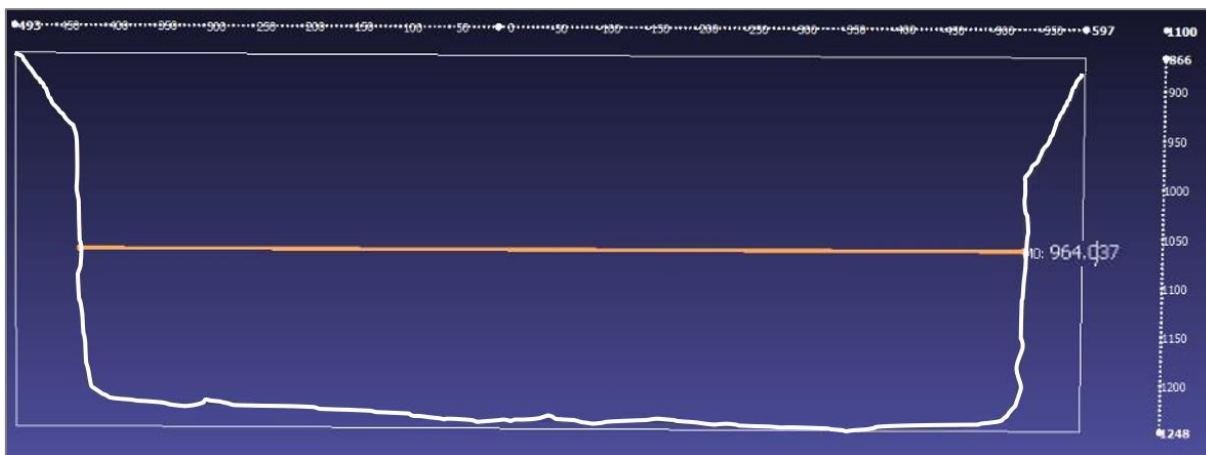
d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário I Teste 3 - Pós-ruptura.

**Figura 7.23:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário I Teste 3.

A Figura 7.24 e a Figura 7.25 apresentam as larguras médias das brechas. Cabe observar que a altura de formação da brecha de jusante e montante foram iguais às alturas das barragens.



**Figura 7.24:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário I Teste 3.

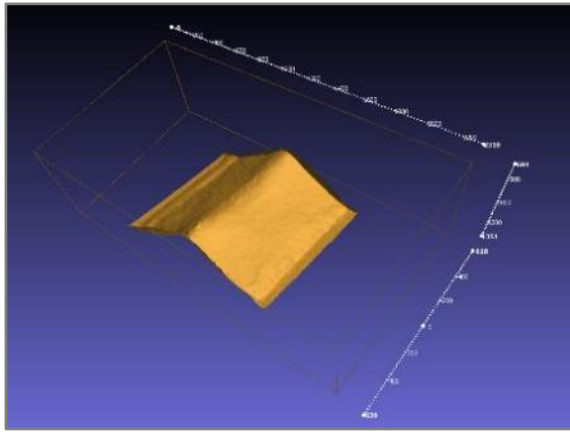


**Figura 7.25:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário I Teste3.

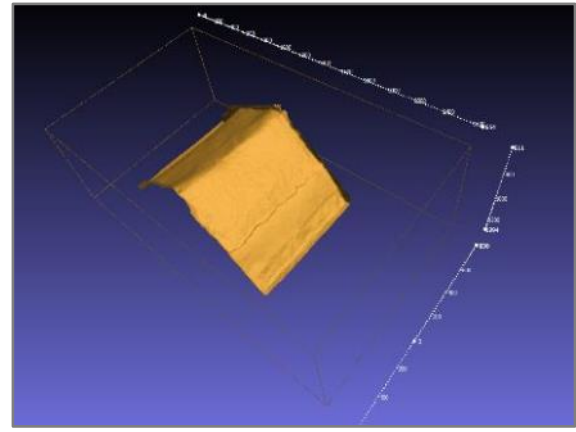
Verifica-se da Figura 7.24 e da Figura 7.25 que a largura da brecha de montante é de 794,8 mm, em sua seção média, e que a largura da brecha de jusante é de 964,0 mm. A análise qualitativa da brecha do Cenário I Teste 3 permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, ocorrendo taludes praticamente verticais.

A barragem de jusante foi praticamente removida pela ação erosiva decorrente da passagem da onda de ruptura de montante e, desta forma, a seção analisada está localizada no local onde havia a crista do maciço, ou seja, houve evolução da brecha em todo o maciço.

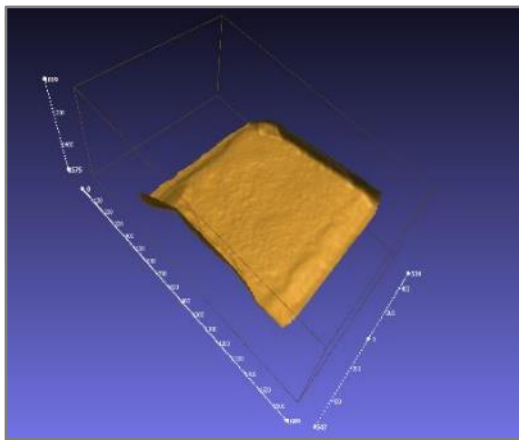
As representações 3D encontradas na Figura 7.26 (a, b, c e d) mostram os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário II Teste 1.



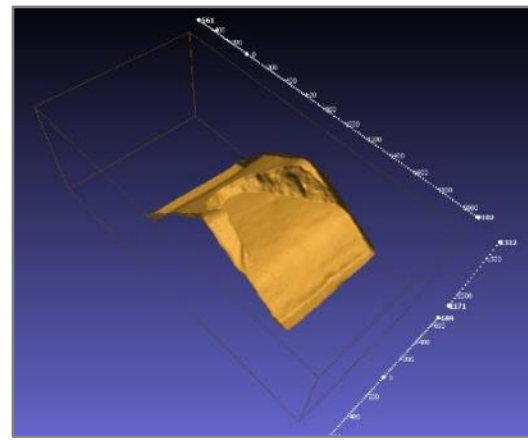
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II Teste 1 - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II Teste 1 - Pré-ruptura.



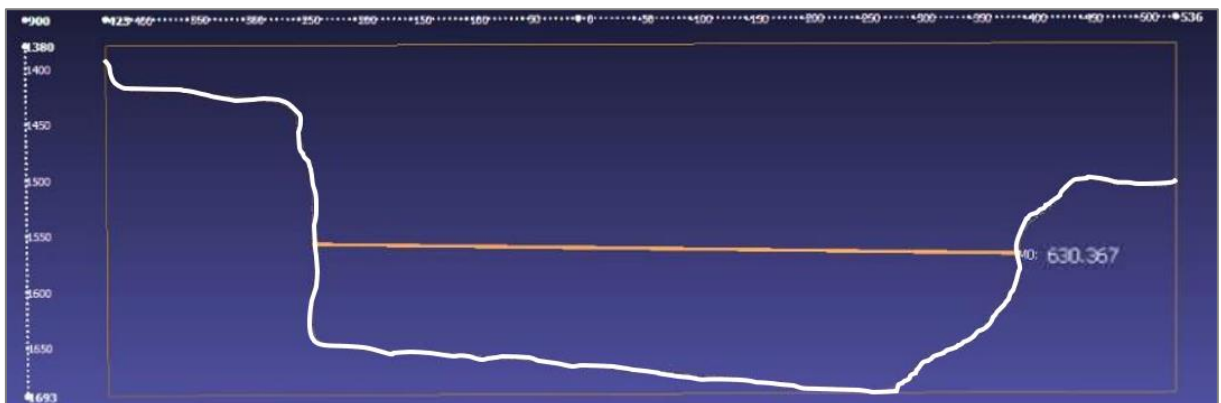
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II Teste 1 - Pós-ruptura.



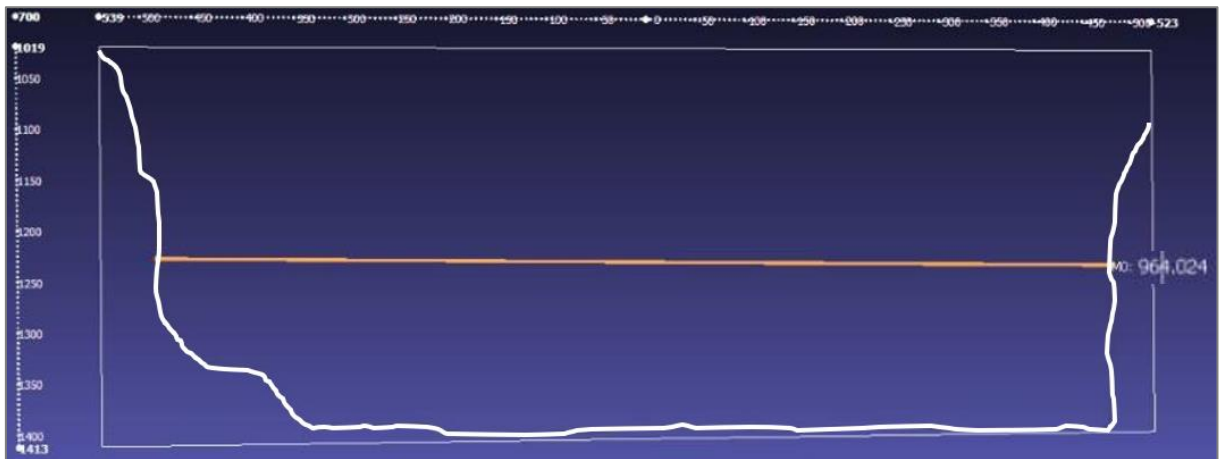
d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II Teste 1 - Pós-ruptura.

**Figura 7.26:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II Teste 1.

A Figura 7.27 e a Figura 7.28 apresentam as larguras médias das brechas. Cabe observar que a altura de formação da brecha de jusante e montante foram iguais às alturas das barragens.



**Figura 7.27:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II Teste 1.



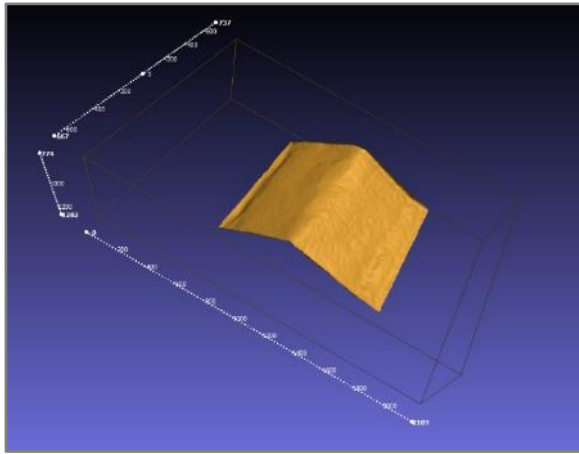
**Figura 7.28:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II Teste 1.

Verifica-se da Figura 7.27 e da Figura 7.28 que a largura da brecha de montante é de 630,4 mm, em sua seção média, e que a largura da brecha de jusante é de 964,0 mm.

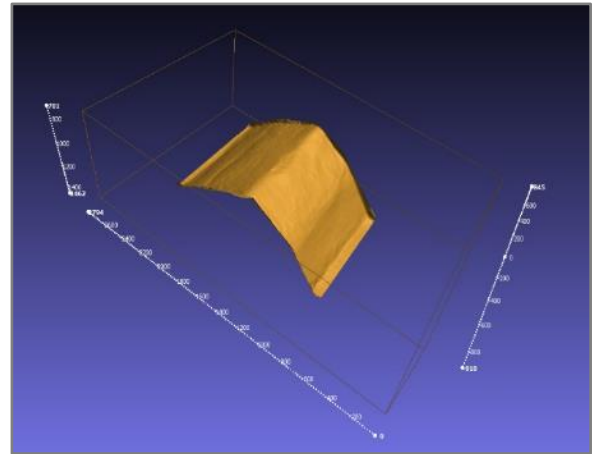
A análise qualitativa da brecha do Cenário II Teste 1 permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, ocorrendo uma erosão incompleta do paramento de montante, formando um talude vertical a esquerda e um talude com ângulo mais suave a direita.

A barragem de jusante foi praticamente removida pela ação erosiva da passagem da onda de ruptura de montante, e a seção analisada está localizada no local onde restou a maior parte do maciço. Assim, houve evolução da brecha em praticamente todo o maciço.

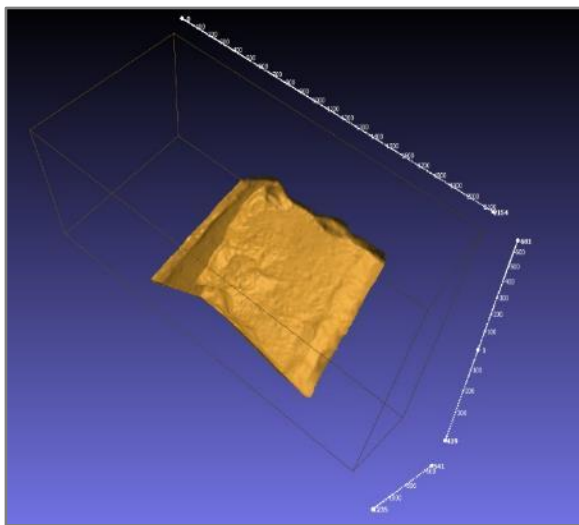
As representações 3D encontradas na Figura 7.29 (a, b, c e d) representam os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário II Teste 2. Considerando-se a seção de área mais próxima à crista do modelo reduzido da barragem pôde-se analisar as larguras das brechas.



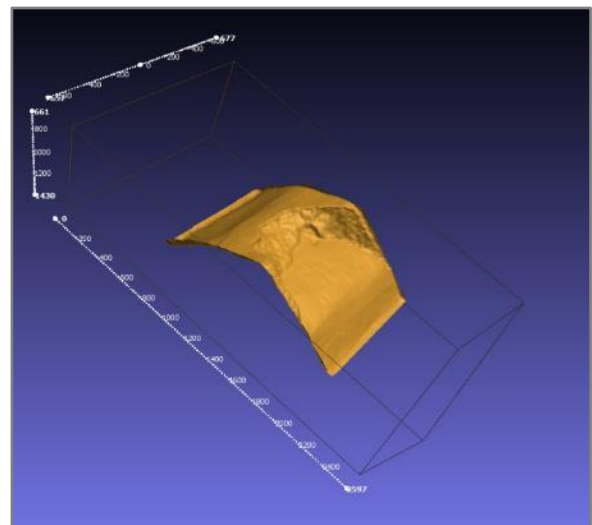
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II Teste 2 - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II Teste 2 - Pré-ruptura.



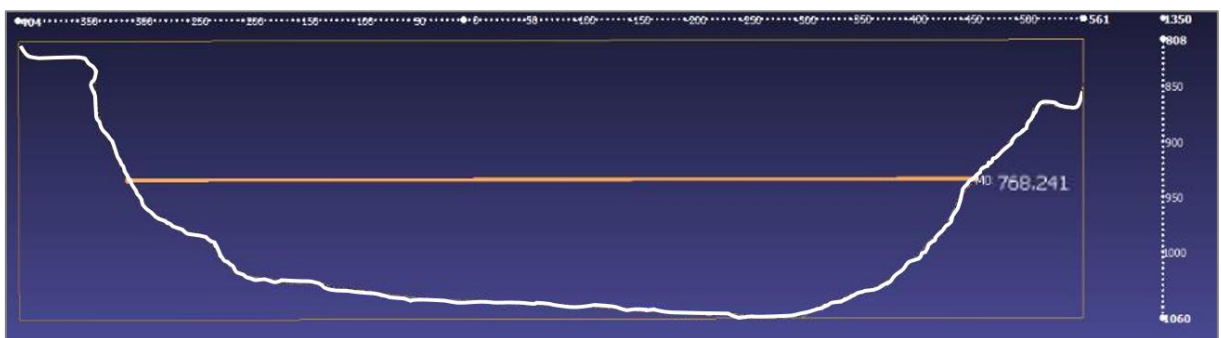
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II Teste 2 - Pós-ruptura.



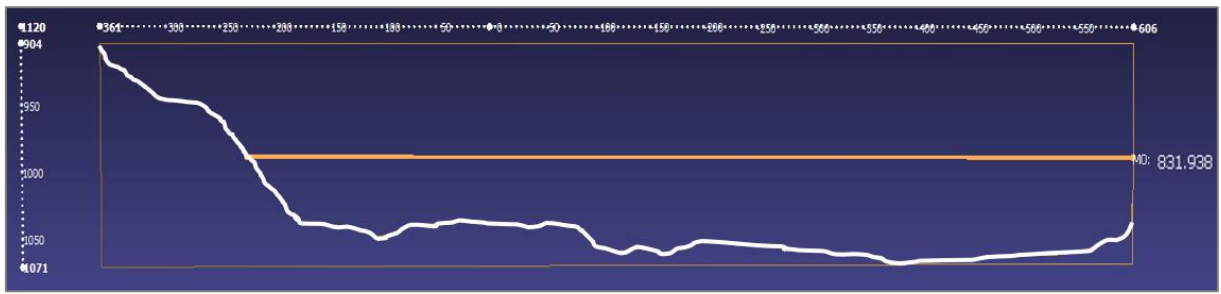
d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II Teste 2 - Pós-ruptura.

**Figura 7.29:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II Teste 2.

A Figura 7.30 e a Figura 7.31 apresentam as larguras médias das brechas.



**Figura 7.30:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II Teste 2.



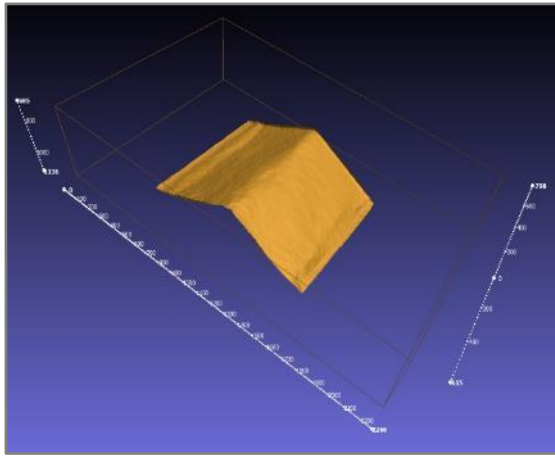
**Figura 7.31:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II Teste 2.

Verifica-se da Figura 7.30 e da Figura 7.31 que a largura da brecha de montante é de 768,2 mm, em sua seção média, e que a largura da brecha de jusante é de 832,0 mm. Cabe observar que esta largura foi tomada no paramento de montante que restou após a passagem da onda, assim, pode-se assumir que a largura da brecha pode ser adotada igual à largura do canal.

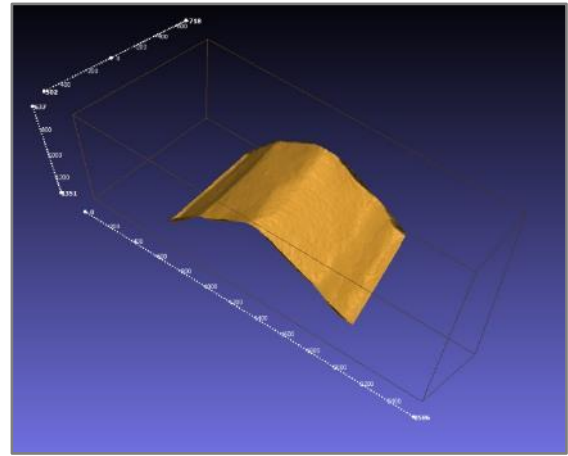
A análise qualitativa da brecha do Cenário II Teste 2 permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, ocorrendo uma erosão incompleta do paramento de montante, formando taludes com ângulo suaves em ambos os lados.

A barragem de jusante foi praticamente removida pela ação erosiva da passagem da onda de ruptura de montante, e a seção analisada está localizada no local onde restou a maior parte do maciço. Assim, houve evolução da brecha em praticamente todo o maciço.

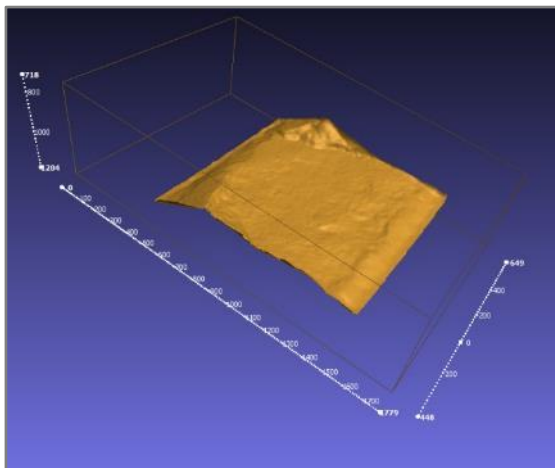
As representações 3D encontradas na Figura 7.32 (a, b, c e d) representam os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário II Teste 3.



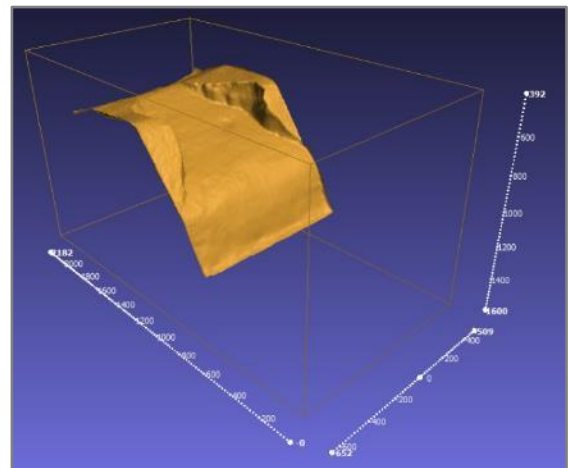
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II Teste 3 - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II Teste 3 - Pré-ruptura.



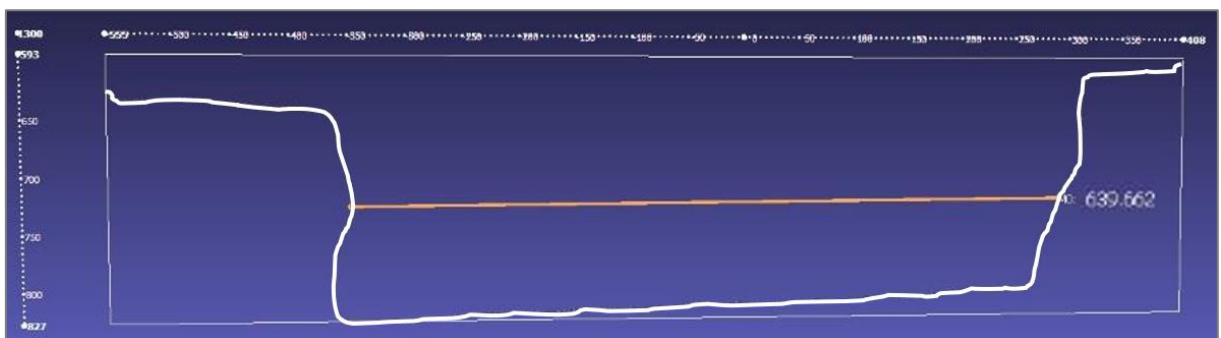
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário II Teste 3 - Pós-ruptura.



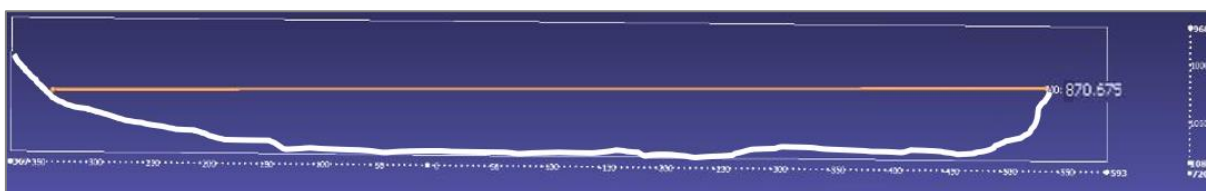
d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário II Teste 3 - Pós-ruptura.

**Figura 7.32:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário II Teste 3.

A Figura 7.33 e a Figura 7.34 apresentam as larguras médias das brechas para o Cenários II Teste 3.



**Figura 7.33:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário II Teste 3.



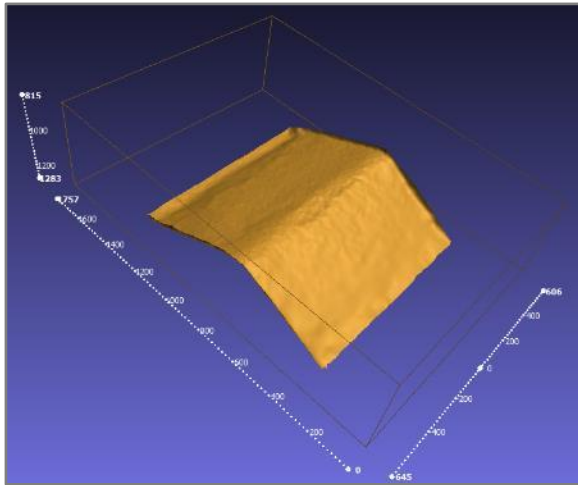
**Figura 7.34:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário II Teste 3.

Verifica-se da Figura 7.33 e da Figura 7.34 que a largura da brecha de montante é de 640,0 mm, em sua seção média, e que a largura da brecha de jusante é de 871,0 mm. Como a seção da brecha de jusante foi medida nos taludes que restaram do maciço, em local a montante da brecha, será adotada a largura total de 1.000,0 mm.

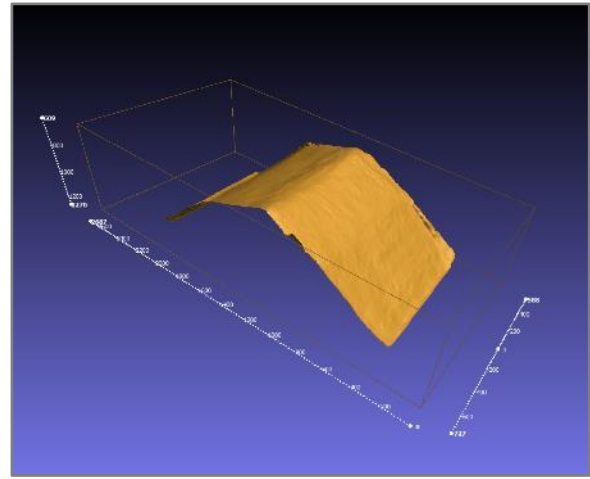
A análise qualitativa da brecha do Cenário II Teste 3 permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, com uma erosão na parte central do paramento de montante, levando a uma divisão das ombreiras direita e esquerda, com talude negativo na margem direita e um talude com ângulo mais suave a esquerda.

A barragem de jusante foi praticamente removida pela ação erosiva da passagem da onda de ruptura de montante, e a seção analisada está localizada no local onde restou a maior parte do maciço, em ambas as ombreiras. Assim, houve evolução da brecha em praticamente todo o maciço.

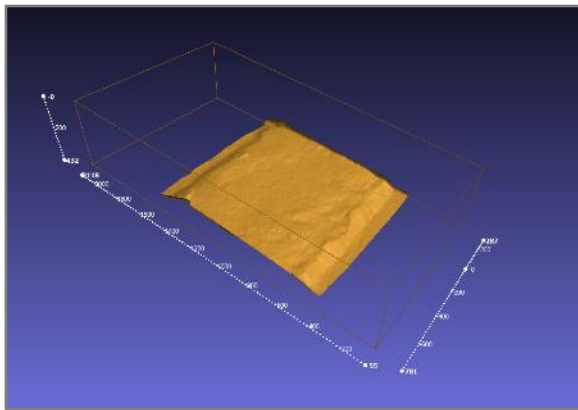
As representações 3D encontradas na Figura 7.35 (a, b, c e d) representam os modelos reduzidos das barragens de montante e de jusante, nos momentos pré e pós-ruptura, para o Cenário III Teste 1. Considerando-se a seção de área mais próxima à crista do modelo reduzido da barragem pôde-se analisar as larguras das brechas.



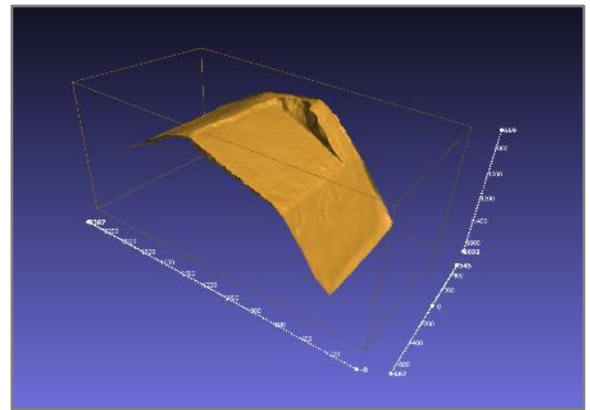
a-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário III Teste 1 - Pré-ruptura.



b-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário III Teste 1 - Pré-ruptura.



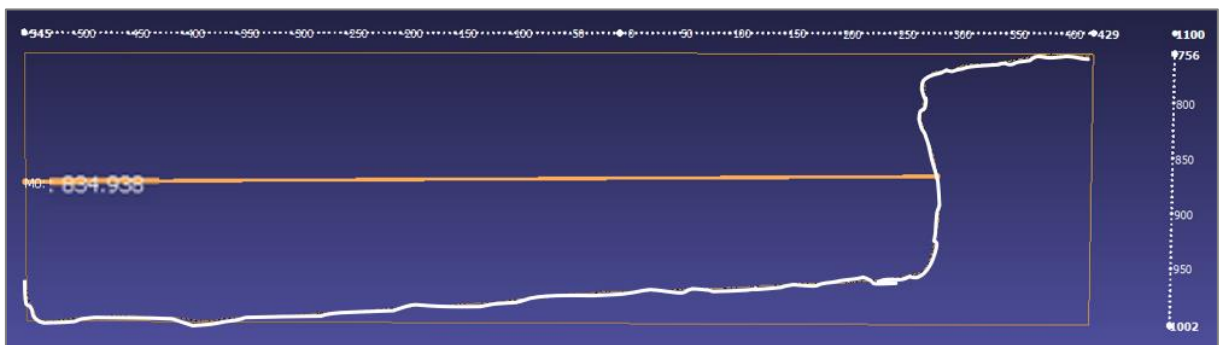
c-) Escaneamento 3D da barragem de jusante – Cenário III Teste 1 - Pós-ruptura.



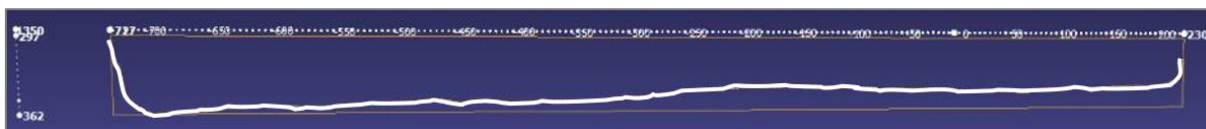
d-) Escaneamento 3D da barragem de montante – Cenário III Teste 1 - Pós-ruptura.

**Figura 7.35:** Representações dos escaneamentos dos modelos reduzidos das barragens – Cenário III Teste 1.

A Figura 7.36 e a Figura 7.37 apresentam as larguras médias das brechas.



**Figura 7.36:** Largura da brecha para a barragem de montante – Cenário III Teste 1.



**Figura 7.37:** Largura da brecha para a barragem de jusante – Cenário III Teste 1.

Verifica-se da Figura 7.36 e da Figura 7.37 que a largura da brecha de montante é de 835,0 mm, em sua seção média, e que a largura da brecha de jusante é de 1.000,0 mm. A análise qualitativa da brecha do Cenário III Teste 1 permitiu verificar que não ocorreu erosão completa para a barragem de montante, com uma erosão na parte da esquerda do paramento de montante.

A barragem de jusante foi totalmente removida pela ação erosiva da passagem da onda de ruptura de montante, e a seção analisada está localizada onde restou uma pequena parte do maciço, em ambas as ombreiras. Assim, houve evolução da brecha em praticamente todo o maciço.

Uma análise qualitativa das formas das brechas, representadas nas figuras anteriores deste tópico, permite constatar que ocorreram deslocamentos destas brechas em relação ao centro do canal e, em sua maioria, para o lado esquerdo do canal (lado direito da figura). Creditam-se estes desvios principalmente às questões de ordem prática, como; posição do operador no momento de construção dos modelos reduzidos, que pode ser a montante ou a jusante (devido às vigas instaladas no canal), alternância dos operadores no momento da construção dos modelos reduzidos, distribuição não uniforme da compactação ao longo dos maciços dos modelos reduzidos pelos operadores, desníveis na superfícies dos modelos reduzidos (imperceptíveis a olho nu) e distribuição não uniforme do cimento na MBCA.

## 8 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 8.1 *Material utilizado - MBCA*

A pesquisa de taxas de erosão do composto MBCA envolveu uma série de etapas metodológicas laboratoriais, cumpridas rigorosamente, para se evitar possíveis desvios, e os resultados apresentados podem ser assim discutidos (CAMPOS *et al.*, 2018 a e b):

- Como esperado, as maiores proporções de cimento na MBCA aumentam a coesão entre os grãos e diminuem as correspondentes taxas de erodibilidade, como exposto nos gráficos da Figura 7.3, Figura 7.4, Figura 7.5, Figura 7.6 e Figura 7.7, e na Tabela 7.1 e Tabela 7.2;
- Devido à limitação do *EFA*, a maior vazão que pôde ser simulada é de 68,0 m<sup>3</sup>/h, o que leva a uma velocidade de 2,5 m/s e correspondente tensão de cisalhamento de 12,8 Pa, que para a escala dos testes foi adequada. Porém, recomenda-se que sejam procedidas alterações no *EFA* para viabilizar ensaios de erodibilidade com taxas mais elevadas de cimento para o composto MBCA, o que permitirá comparações com outros tipos de solos, os quais, supõem-se, menos erodíveis, ou seja, necessitarão de maiores velocidades de escoamento para realização dos testes;
- Verifica-se dos gráficos da Figura 7.4 e Figura 7.5 que a correlação é muito próxima entre os ensaios tipo compactados com 1 kg e ensaios tipo adensados. Verifica-se que o ensaio compactado 1 kg leva a uma taxa de erodibilidade sutilmente menor;
- A Tabela 8.1 expõe as médias gerais, entre todas as faixas de vazão para os dois tipos de ensaio, e por tipo de ensaio e faixa de vazão, comparados os ensaios de número 1 a 44 da Tabela 7.1 e Tabela 7.2. As taxas de erodibilidade são menores para o ensaio compactado 1 kg, exceto na faixa de 40 m<sup>3</sup>/h;

**Tabela 8.1-** Médias comparativas de erodibilidade entre tipos de ensaio por faixa de vazão.

Médias por tipo de ensaio e faixa de vazão	Erodibilidade média [mm/h]
Geral Compactado 1 kg	2442
Geral Adensado	2459
Compactado 1 kg 20	3732
Adensado 20	4294
Compactado 1 kg 30	1980
Adensado 30	3875
Compactado 1 kg 40	1841
Adensado 40	1460
Compactado 1 kg 50	1092
Adensado 50	1136
Compactado 1 kg 60	1094
Adensado 60	1165

- Mantovanelli *et al.* (2017) pesquisaram taxas de erodibilidade em um solo areno-argiloso aluvionar com fração de argila de 34%, o qual apresentou taxas de erodibilidade entre 1,03 e 1,28 mm/h para 0,70 m/s, entre 1,54 e 2,50 mm/h para 1,20 m/s, entre 3,53 e 5,45 mm/h para 1,70 m/s, e entre 5,45 e 15,00 mm/h para 2,20 m/s. Estas taxas de erodibilidade são muito menores que as encontradas nesta pesquisa (Tabela 7.2), o que indica que é recomendável uma pesquisa mais ampla sobre a aplicabilidade da MBCA conforme o material a representar;
- Briaud (2008) pesquisou taxas de erodibilidade em solos para diversos tipos de eventos geotécnicos, indicando valores de erodibilidade entre 10 e 10.000 mm/h, entre várias faixas de vazões, para solos do tipo arenosos bem graduados e argilas de baixa plasticidade, que estariam nas categorias de muito alta e alta erodibilidade, ou seja, na zona de tendência a falhar por galgamento, e se assemelham às taxas obtidas e apresentadas nesta pesquisa. Cabe ressaltar que os pontos analisados por Briaud (2008) no gráfico indicado tratam de material arenoso proveniente de diques. Briaud *et al.* (2008) apresentam outros resultados na faixa de erodibilidade entre 10 e 10.000 mm/h, para diversos tipos de solos, mas notadamente para solos arenosos. Nestes casos, fica evidente a representatividade pela utilização da MBCA.

## 8.2 Parâmetros de formação de brecha em cascata

Durante o evento de ruptura do Cenário IP verificou-se que a relação entre o tempo de formação das brechas nas barragens está em uma proporção de aproximadamente 51%, indicando que a ruptura da brecha da barragem de jusante se limita a aproximadamente metade do tempo de formação da brecha da barragem de montante.

A análise da largura da brecha, atingida ao final do evento de ruptura do Cenário I P, permite verificar que a largura está em uma proporção de 154%, ou seja, a largura final da brecha da barragem de jusante é 54% maior se comparada à largura da brecha da barragem de montante.

De forma geral a altura atingida pela formação da brecha foi a mesma em ambos os barramentos no Cenário I P, cabendo observar que o material utilizado para modelar o terreno natural não chegou a ser erodido.

Por meio da análise do evento de ruptura do Cenário II P pôde-se verificar que a relação entre o tempo de formação das brechas, para as barragens de montante e jusante, está em uma proporção de aproximadamente 33%. A largura da brecha da barragem de jusante é 110% maior, em relação à de montante, cabendo observar que não ocorreu erosão total na barragem de montante, pois a mesma não atingiu o lastro que representa o terreno natural. Isso se deve a barragem de montante, neste Cenário II P, ser 10,0 cm superior em altura, e com volume de material muito maior que a barragem de jusante, e ainda ter sido modelada com material reaproveitado.

A Tabela 8.2 procura sumarizar os dados dos modelos reduzidos e os resultados encontrados, largura e alturas mensuradas, as razões entre as variáveis analisadas entre as barragens de jusante e montante para os Cenários I P e II P, contendo ainda o tempo de formação de brecha na escala dos protótipos.

A Tabela 8.3 e a Tabela 8.4 apresentam os dados dos modelos reduzidos e os resultados encontrados para os Cenários I (testes 1, 2 e 3) e II (testes 1, 2 e 3), contendo as larguras das barragens de montante e jusante, alturas das brechas, os tempos de formação de brecha (TF1 e TF2), os volumes contidos nos reservatórios de montante e jusante no momento do ensaio, o PFB para os reservatórios de montante e jusante, a distância entre os barramentos, bem como as razões entre as variáveis analisadas entre as barragens de jusante e montante, sendo estas variáveis o PFB, a largura da brecha e o TF2.

A Tabela 8.5 e a Tabela 8.6 apresentam os dados dos modelos reduzidos e os resultados encontrados para os Cenários III Teste 1, contendo os mesmos resultados e análises citados anteriormente para os Cenários I e II.

**Tabela 8.2-** Análise numérica dos Cenários I P e II P.

Cenário	$\Delta L$ (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Taxa de cimento na MBCA (%)	Vazão simulada (m <sup>3</sup> /s)	Barragem	Largura da brecha (mm)	Altura da brecha (mm)	Tempo de início de brecha modelo (TF1) (s)	Tempo de formação de brecha modelo (TF2) (s)	Tempo de formação de brecha protótipo (min.)	Razão entre as alturas de brechas	Razão entre as larguras de brechas	Razão entre os tempos de formação
I P	196,0	19,0	19,0	5,0	0,020	Montante	627,8	190,0	18	65	10,8	1,00	1,54	0,51
						Jusante	965,3	190,0	0	33	5,5			
II P	196,0	19,0	29,0	3,0*	0,020	Montante	791,7	112,0	35	36	6,0	1,70	1,10	0,33
						Jusante	869,1	190,0	0	12	2,0			

\* - Material reutilizado.

**Tabela 8.3-** Análise numérica dos Cenários I e II.

Cenário	Teste	Largura montante (mm)	Largura jusante (mm)	Altura brecha montante (cm)	Altura brecha jusante (m)	TF1 montante (s)	TF2 montante (s)	TF2 jusante (s)	Volume montante (m <sup>3</sup> )	Volume jusante (m <sup>3</sup> )
I	1	601,3	803,8			10	49	16		
	2	627,3	857,1	0,19	0,19	12	31	19	2,673	0,464
	3	794,8	1.000,0			6	26	20		
Média (1, 2 e 3)		674,5	887,0	-	-	9	35	18	-	-
II	1	630,4	1.000,0			21	16	13		
	2	768,2	1.000,0	0,19	0,19	49	7	6	2,126	1,011
	3	640,0	1.000,0			16	20	16		
Média (1, 2 e 3)		679,5	1.000,0	-	-	29	14	12	-	-
Média geral		677,0	943,5	-	-	19	25	15	-	-

**Tabela 8.4-** Continuação análise numérica dos Cenários I e II.

Cenário	Teste	PFB montante (m <sup>3</sup> .m)	PFB jusante (m <sup>3</sup> .m)	Distância entre barramentos (m)	Razão entre PFB (jusante por montante)	Razão entre larguras	Razão entre TF2
I	1					1,34	0,33
	2	0,504	0,067	2,04	0,133	1,37	0,61
	3					1,26	0,77
Média (1, 2 e 3)		-	-	-	-	1,32	0,57
II	1					1,59	0,81
	2	0,400	0,154	4,65	0,386	1,30	0,86
	3					1,56	0,80
Média (1, 2 e 3)		-	-	-	-	1,48	0,82
Média geral		-	-	-	-	1,40	0,70

**Tabela 8.5-** Análise numérica do Cenário III.

Cenário	Teste	Largura montante (mm)	Largura jusante (mm)	Altura brecha montante (cm)	Altura brecha jusante (m)	TF1 montante (s)	TF2 montante (s)	TF2 jusante (s)	Volume montante (m <sup>3</sup> )	Volume jusante (m <sup>3</sup> )
III	1	835,0	1.000,0	0,19	0,19	5	16	5	1,735	1,402

**Tabela 8.6-** Continuação análise numérica do Cenário III.

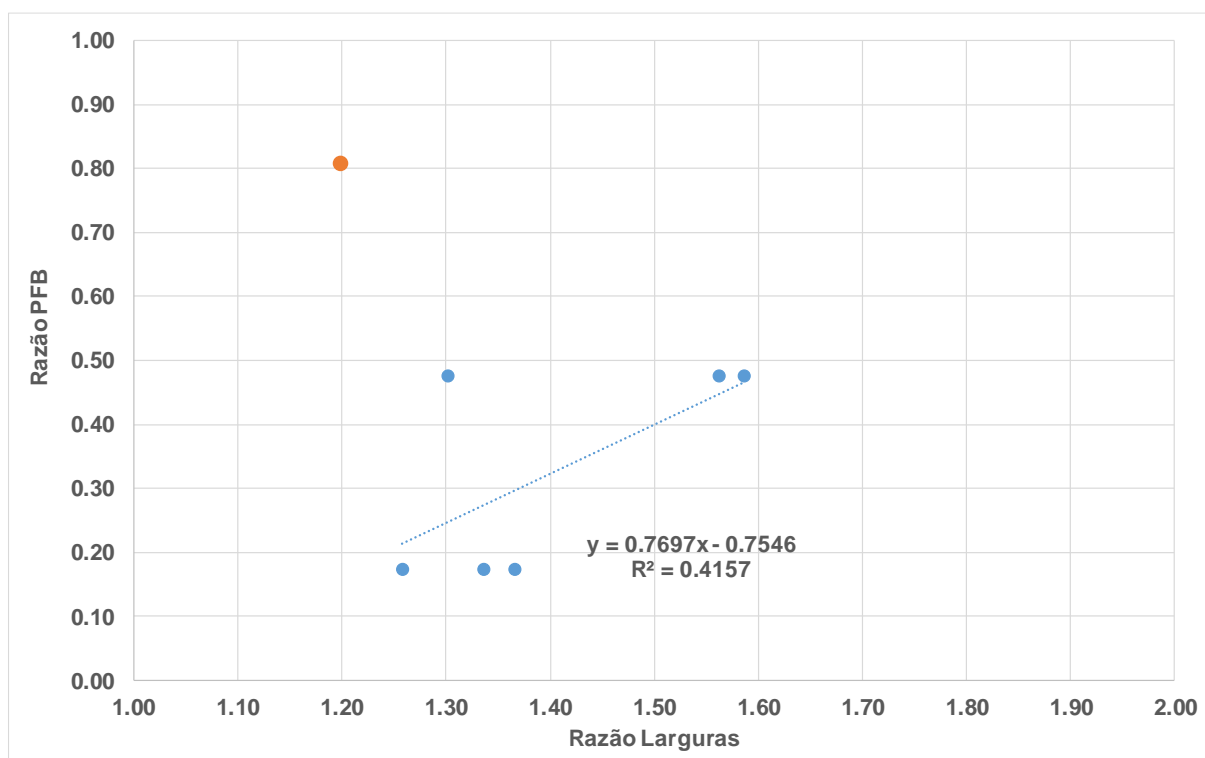
Cenário	Teste	PFB montante (m <sup>3</sup> .m)	PFB jusante (m <sup>3</sup> .m)	Distância entre barramentos (m)	Razão entre PFB (jusante por montante)	Razão entre larguras	Razão entre TF2
III	1	0,330	0,266	6,98	0,808	1,20	0,31

Consultados os dados dos ensaios da Tabela 8.3 e da Tabela 8.4 conclui-se que a razão entre as larguras das brechas (de jusante por montante) é sempre superior a unidade e apresenta média geral igual a 1,40. O que é interpretado como uma brecha maior para a barragem de jusante em torno de 40%.

A variável razão entre TF2 (de jusante por montante) conduz a valores sempre menores que a unidade, e apresenta média geral igual a 0,70, o que é interpretado como uma brecha que se forma 30% mais rápido no caso da ruptura da barragem de jusante.

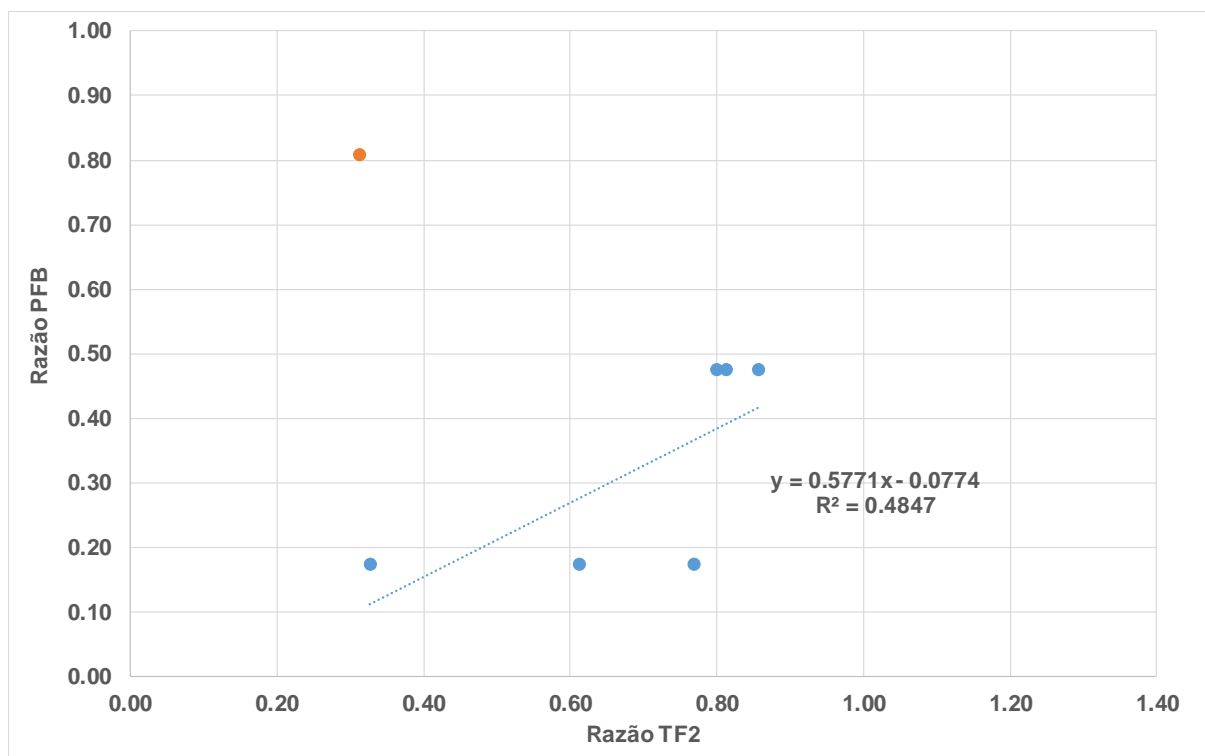
Assim, os resultados apresentados indicam que o tempo mínimo para formação de brecha pode ser menor do que os 15 minutos sugeridos por MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), para o caso específico da ruptura em cascata.

Para auxiliar a análise destes dados é apresentado a seguir o gráfico da Figura 8.1, em que se mostram as razões entre as larguras das brechas (jusante por montante) e as respectivas razões entre PFB (PFB do reservatório de jusante pelo PFB do reservatório de montante), sendo este PFB conforme aquele definido por Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) para cada cenário. A análise exclui o ponto referente ao Cenário III Teste 1.



**Figura 8.1:** Razão PFB por razão entre as larguras das brechas.

O gráfico da Figura 8.2 apresenta as variáveis razão entre TF2 (jusante por montante) pela razão entre PFB (jusante por montante). A reta de regressão apresentada excluiu os resultados do Cenário III Teste 1, que se mostrou um *outlier* e conta somente com um teste para este cenário.



**Figura 8.2:** Razão PFB por razão entre TF2.

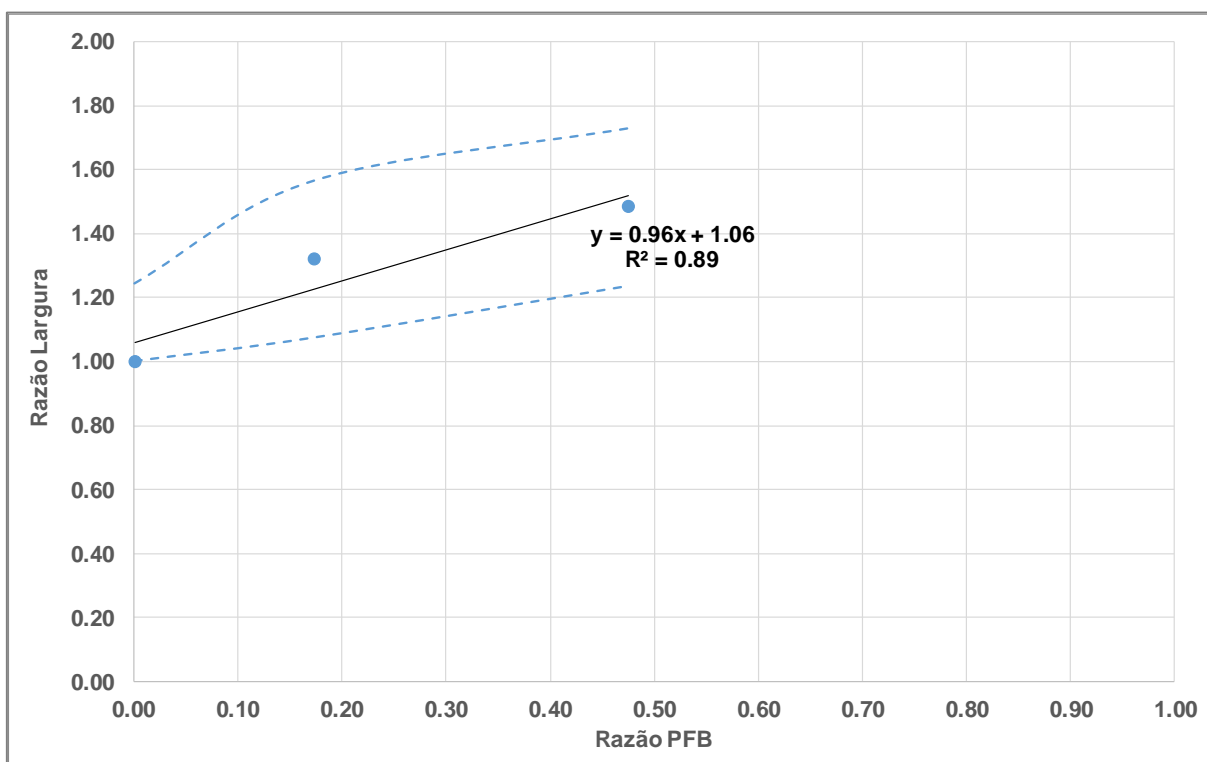
Em ambos os gráficos, da Figura 8.1 e da Figura 8.2, observa-se a mesma tendência, com auxílio da regressão linear, de que as razões entre as larguras aumentam e que a razão entre o TF2 também aumenta. Pode-se explicar que a largura das brechas aumenta para o Cenário II devido aos reservatórios serem mais elevados, devido à altura dos lastros serem superiores. Verifica-se que o tempo de formação de brecha tende a diminuir, devido ao mesmo motivo.

Considerando o ponto referente ao Cenário III (ponto laranja no gráfico) verifica-se que este comportamento, para análise da razão entre as larguras e razão entre o TF2 comparados a razão dos PFB, não é mais válido. Pode-se explicar que as razões entre TF2 por razões dos PFB e razões entre larguras por razões entre PFB não mais aumentam, pois, o reservatório da barragem de jusante aumenta consideravelmente e sua capacidade de amortecer o hidrograma de montante também.

Apesar de não se identificar uma linearidade completa entre as razões (PFB, TF2 e largura) e a variação de distância entre barramentos, em todos os cenários foi verificada brechas maiores e mais rápidas a jusante.

Considerando-se a mudança de eixos para as variáveis razão PFB por média das razões entre as larguras (jusante/montante) para os Cenário I e II, desconsiderando-se o ponto referente ao Cenário III e considerando o ponto teórico onde a razão entre as larguras se aproxima da unidade quando não existe um reservatório a montante chega-se a linha de tendência linear com correlação igual a 0,89 da Figura 8.3.

Nesta figura apresentam-se ainda as envoltórias inferior e superior, obtidas pela operação do desvio padrão da razão PFB, respeitado o limite inferior do mínimo teórico da razão da largura ser igual a unidade.



**Figura 8.3:** Razão PFB por médias das razões entre larguras.

Os valores de geometria obtidos dos taludes laterais, a partir das imagens escaneadas dos modelos ensaiados, das barragens de montante e de jusante se encontram listados na Tabela 8.7. Nesta tabela são dispostas as médias para cada cenário considerados os três testes, separados

entre margens esquerda e direita, e uma média geral para as barragens de montante e de jusante, o que permite concluir que a relação h/v de jusante em relação a montante é de aproximadamente metade, considerados os valores de médias gerais de 0,33 e 0,16.

**Tabela 8.7-** Resultados das geometrias dos taludes laterais das brechas de montante e de jusante para os Cenários I e II (testes 1, 2 e 3).

Cenário	Teste	Barragem de montante	
		Margem direita (h/v)	Margem esquerda (h/v)
I	1	-0,02	-0,07
	2	0,02	0,12
	3	0,02	0,12
	Média	0,00	0,05
Cenário	Teste	(h/v)	(h/v)
II	1	0,08	0,15
	2	1,76	1,45
	3	-0,05	0,43
	Média	0,60	0,68
Média Geral		0,30	0,36
Média geral para montante			0,33
Cenário	Teste	Barragem de jusante	
		Margem direita (h/v)	Margem esquerda (h/v)
I	1	0,44	0,41
	2	0,00	1,06
	3	0,00	0,00
	Média	0,15	0,49
Cenário	Teste	(h/v)	(h/v)
II	1	0,00	0,00
	2	0,00	0,00
	3	0,00	0,00
	Média	0,00	0,00
Média Geral		0,07	0,24
Média geral para jusante			0,16

Com o exposto, sugere-se a correção das fórmulas proposta por Froehlich (2008), conforme as equações seguintes:

$$\bar{B} = 1,40 \cdot 0,27 k_o V_W^{0,32} H^{0,04} \quad (8.1)$$

$$t_f = 0,70 \cdot 63,2 \sqrt{\frac{V_w}{gH^2}} \quad (8.2)$$

A análise das geometrias dos taludes laterais (h/v) indicou que os valores desta inclinação para a brecha da barragem de montante é de aproximadamente 0,33 e para a brecha da barragem de jusante é de aproximadamente 0,16, o que significa um aumento da inclinação de 48%, comparadas as barragens de jusante por montante. Assim, sugere-se que a taxa de inclinação dos taludes laterais (z) sejam ajustados conforme a relação a seguir:

$$z = \begin{cases} 1,0 & \text{para falhas por galgamento} \\ 0,5 & \text{para falhas por galgamento em cascata} \end{cases} \quad (8.3)$$

Obviamente outras fórmulas de previsão de formação da geometria das brechas (*e.g.* MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), Von Thun e Gillette (1990)) podem ser ajustadas para outras barragens a serem estudadas. Para o caso específico desta pesquisa procedeu-se ao ajuste da fórmula mais adequada às condições das barragens avaliadas.

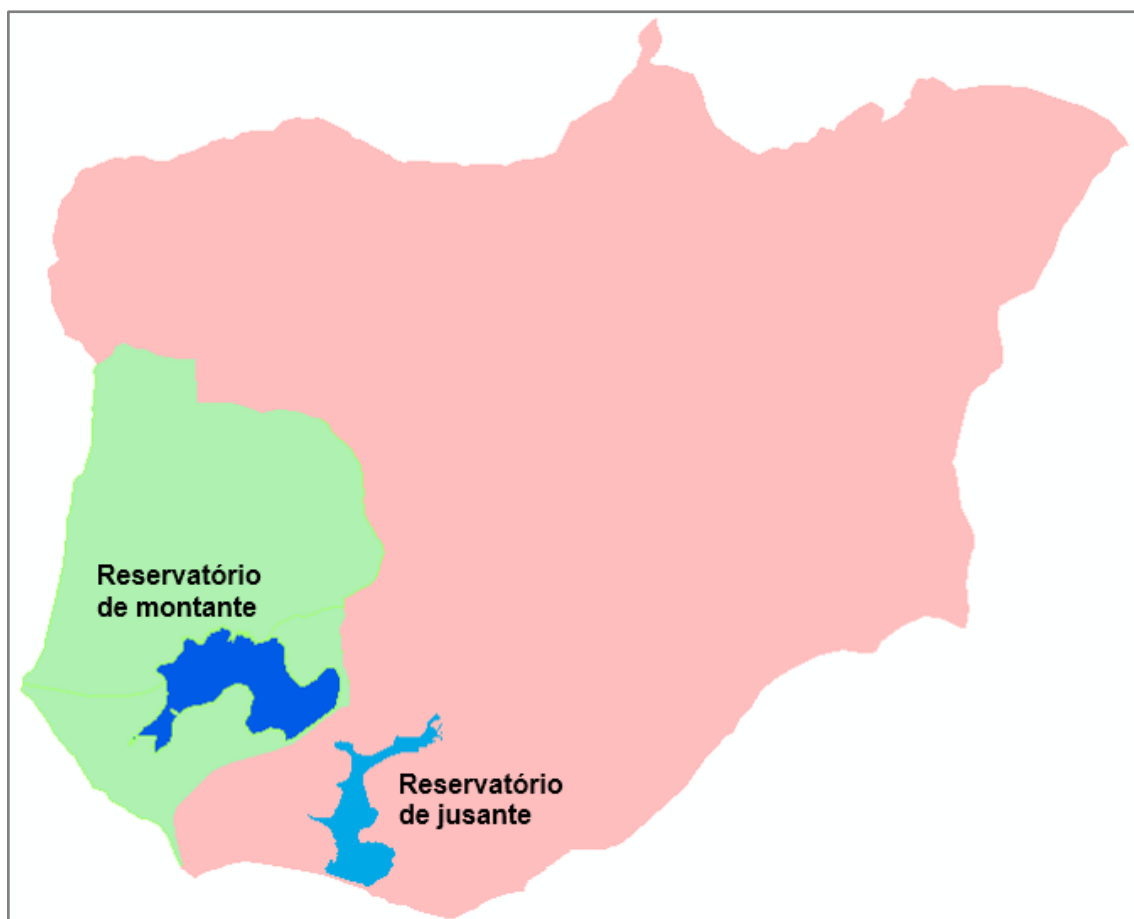
As fórmulas e parâmetros sugeridos tem uso restrito à condição em cascata e, como constatado, existem limitações inerentes aos modelos utilizados na elaboração da pesquisa.

### **8.3 Aplicação dos parâmetros de formação de brecha em cascata**

Para exemplificar e comparar a metodologia aqui apresentada com a metodologia usual de previsão de brechas procedeu-se as simulações do modelo hidrológico das barragens em cascata apresentadas na Figura 6.1 do exemplo de aplicação, a partir dos dados listados na Tabela 6.1, considerando a ruptura das barragens com e sem interferência entre essas estruturas, ou seja, considerando o efeito em cascata e como estruturas isoladas.

A Figura 8.4 apresenta as áreas de drenagem de cada uma das barragens de montante e jusante, bem como a localização dos reservatórios das mesmas, o que permite compreender a dinâmica de fluxos entre as barragens.

A Tabela 8.8 lista os principais parâmetros que foram ajustados para a simulação de ruptura da barragem em cascata, principalmente a largura média da brecha e o tempo de formação de brecha. Antes das simulações das barragens, foi determinada a duração crítica da precipitação igual a 180 minutos.



**Figura 8.4:** Áreas de drenagem e reservatórios das barragens de montante e jusante.

**Tabela 8.8-** Dados de brecha adaptados para a barragem de jusante.

Variável	Barragem de jusante
Tempo de formação de brecha <sup>1</sup> (min.)	6,3
Tempo de formação de brecha * (min.)	10,5
Largura superior da brecha <sup>1</sup> (m)	58,1
Largura média da brecha <sup>1</sup> (m)	34,6
Largura inferior da brecha <sup>1</sup> (m)	11,1
Altura da Brecha <sup>1</sup> (m)	23,5
<i>ko</i> Froehlich <sup>2</sup>	1,3
Declividade dos taludes laterais <sup>3</sup> (V/H):	0,5

<sup>1</sup> Calculado de acordo com a metodologia em cascata (Adaptação da fórmula de Froehlich, 2008).

<sup>2</sup> Adotado de acordo com Froehlich (2008).

<sup>3</sup> Adotado de acordo com a metodologia em cascata.

\* Baseado no tempo mínimo de formação de brechas proposto por Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984).

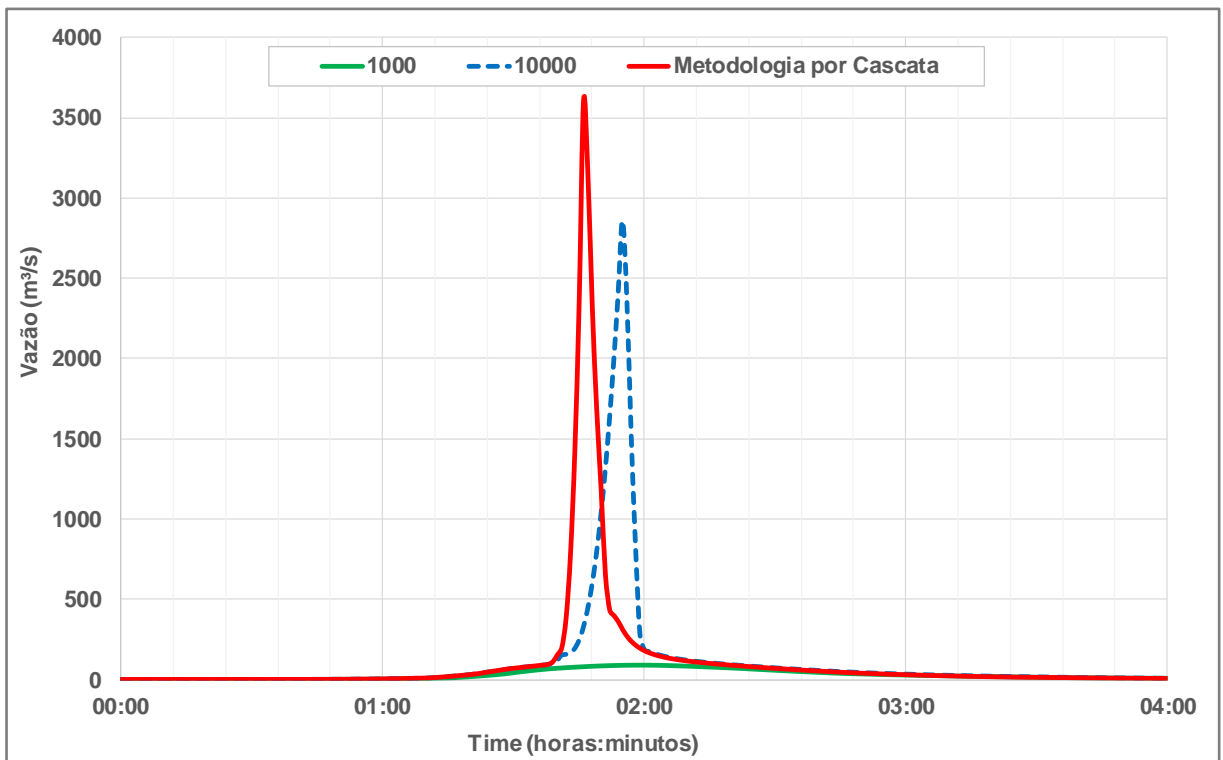
Para tornar a comparação mais ampla foram ajustados dois tempos de formação de brecha:

- O tempo de formação de brecha conforme a adaptação da fórmula de Froehlich (2008) para a metodologia em cascata;
- O tempo de formação de brecha mínimo igual a 15 minutos conforme sugerido por Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) para a metodologia em cascata.

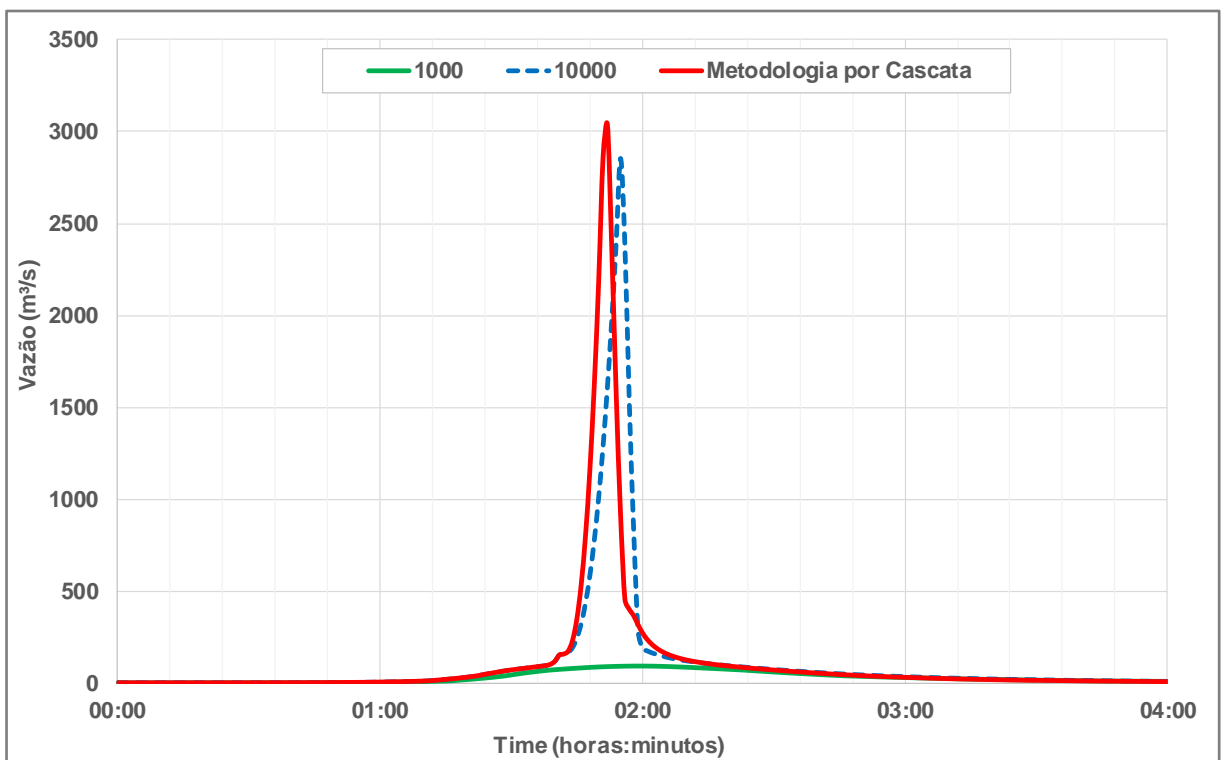
Os gráficos da Figura 8.5 e da Figura 8.6 apresentam os resultados desta comparação, como proposto, onde pode-se identificar as linhas verdes, evidenciando o trânsito de uma precipitação de 1.000 anos de período de retorno nas barragens em cascata sem ocorrência de ruptura.

As linhas azuis tracejadas, Figura 8.5 e Figura 8.6, são os hidrogramas de ruptura da barragem de jusante utilizando a metodologia usual de estruturas isoladas, e as linhas vermelhas contínuas são os hidrogramas de ruptura da barragem de jusante, como proposto pela metodologia de ruptura em cascata. Pode ser observado um pico de vazão 26,5 % mais alto e ocorrência 9 minutos mais cedo, comparando-se as metodologias para o tempo mínimo de formação de brecha de acordo com a adaptação de Froehlich (2008) (Figura 8.5). Na Figura 8.6 a análise utilizou a adaptação do tempo mínimo de formação proposto por Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984) levando a uma vazão de pico 6,3 % mais alta e ocorrendo 2 minutos mais cedo.

Apesar de verificar que a utilização da metodologia em cascata leva a maiores e antecipados picos de vazões, cabe reforçar que estas variações analisadas podem sofrer grande influência dos parâmetros hidrológicos (áreas das bacias, *lag-time*, parâmetros de infiltração, volumes dos reservatórios e curvas de descarga) e do arranjo entre os barramentos, comparados outros pares de diferentes barragens em relação ao par de barragens aqui estudado.



**Figura 8.5:** Comparação de hidrogramas de metodologias com adaptação segundo Froehlich (2008).



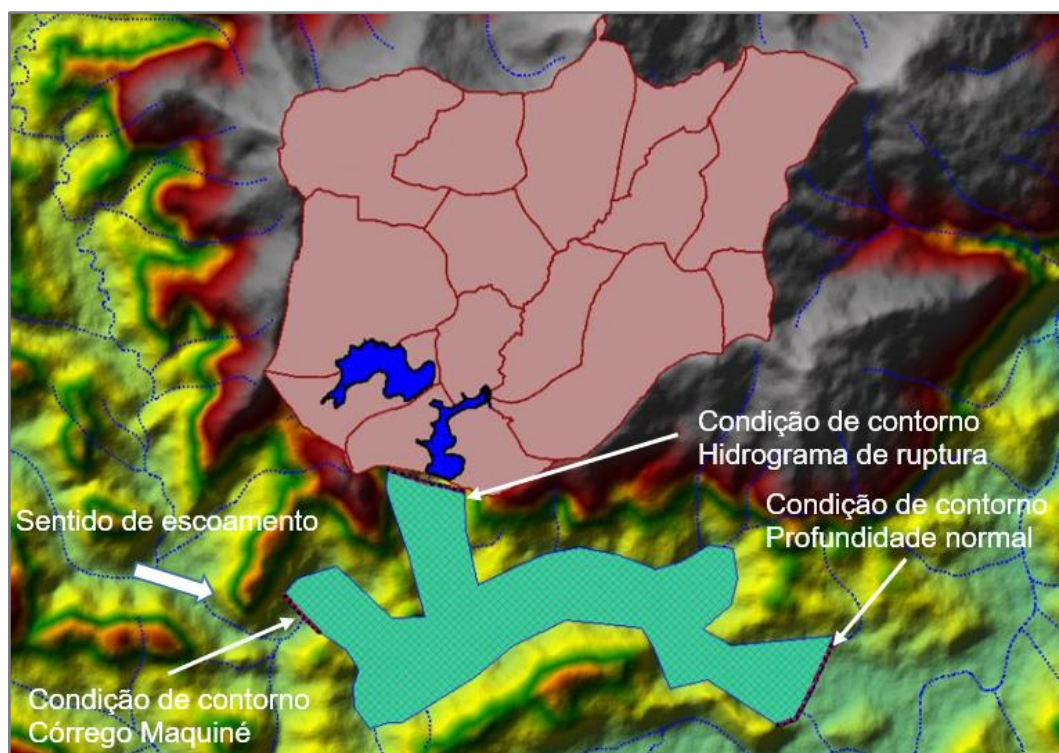
**Figura 8.6:** Hidrogramas para comparação de metodologias com adaptação segundo Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984).

#### 8.4 Avaliação das variáveis hidráulicas em escala dos protótipos

A partir dos hidrogramas apresentados anteriormente foi possível proceder a modelagem hidráulica bidimensional do trecho a jusante dos barramentos em análise em um modelo hidráulico utilizando o HEC-RAS 5.0.7 para se obter os valores de velocidade, tensão de cisalhamento, profundidade e risco hidrodinâmico, característicos para a ruptura em cascata e pela metodologia usual, conforme os resultados do gráfico da Figura 8.5.

O modelo hidráulico em HEC-RAS 5.0.7 foi desenvolvido em uma base de terreno ALOS PALSAR de resolução 12,5 m, com coeficiente de Manning médio de 0,135 para a planície de inundação e calha. A Figura 8.7 apresenta área de drenagem das barragens, a área modelada bidimensional a jusante das barragens, para permitir a análise comparativa entre as metodologias, as condições de contorno da área bidimensional; vazão de 100 anos de período de retorno do córrego Maquiné a montante e de profundidade normal a jusante.

Estas condições de contorno estão definidas na Tabela 8.9. Para a determinação da vazão do córrego Maquiné foi procedida uma regionalização de vazões a partir dos dados da Tabela 8.10.



**Figura 8.7:** Modelo HEC-RAS bidimensional da área vulnerável a jusante das barragens.

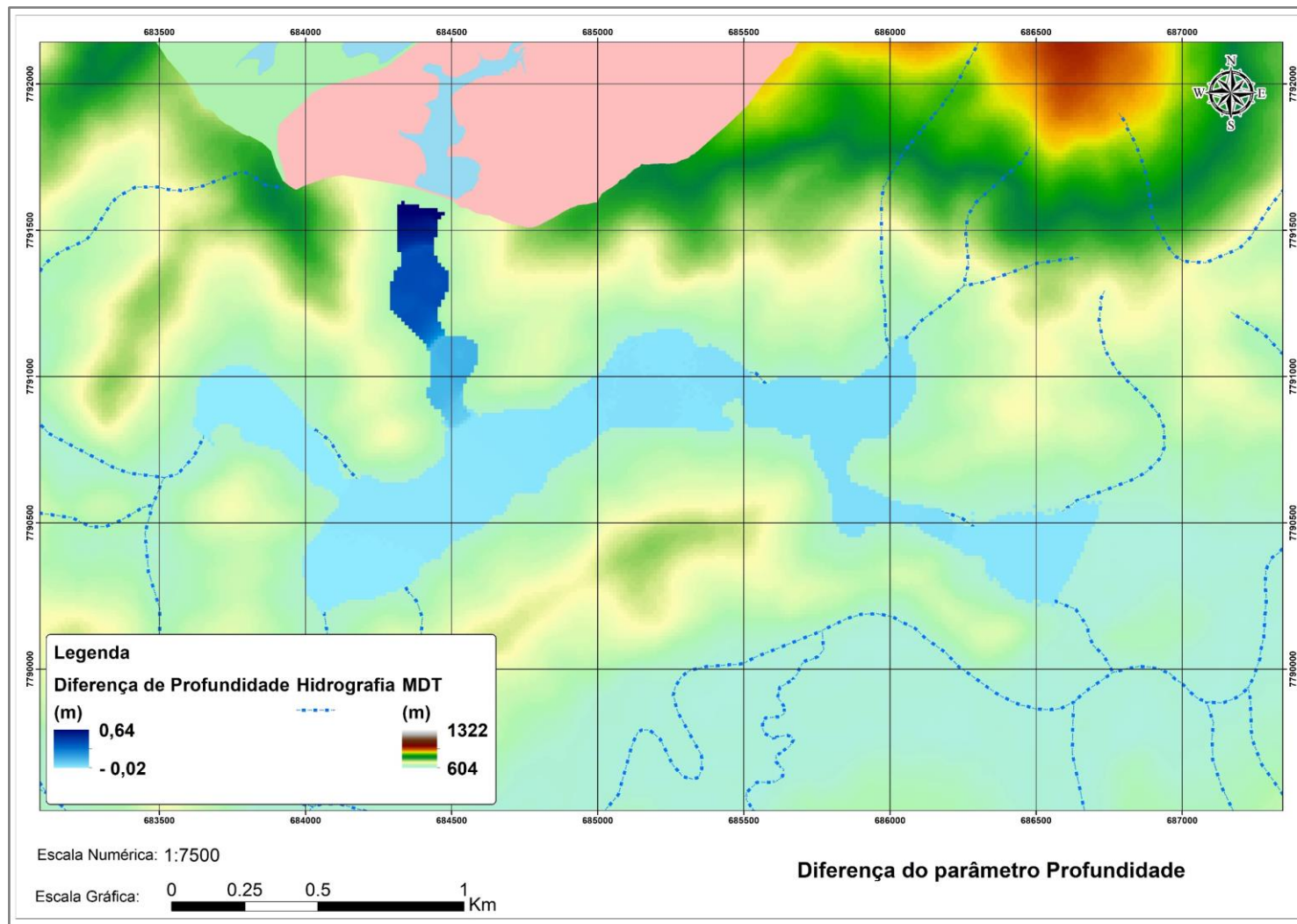
**Tabela 8.9-** Condições de contorno do modelo HEC-RAS bidimensional.

Montante	Jusante
Vazão de 100 anos de período de retorno do córrego Maquiné	Declividade média do córrego Maquiné
149 m <sup>3</sup> /s	0,0025 m/m

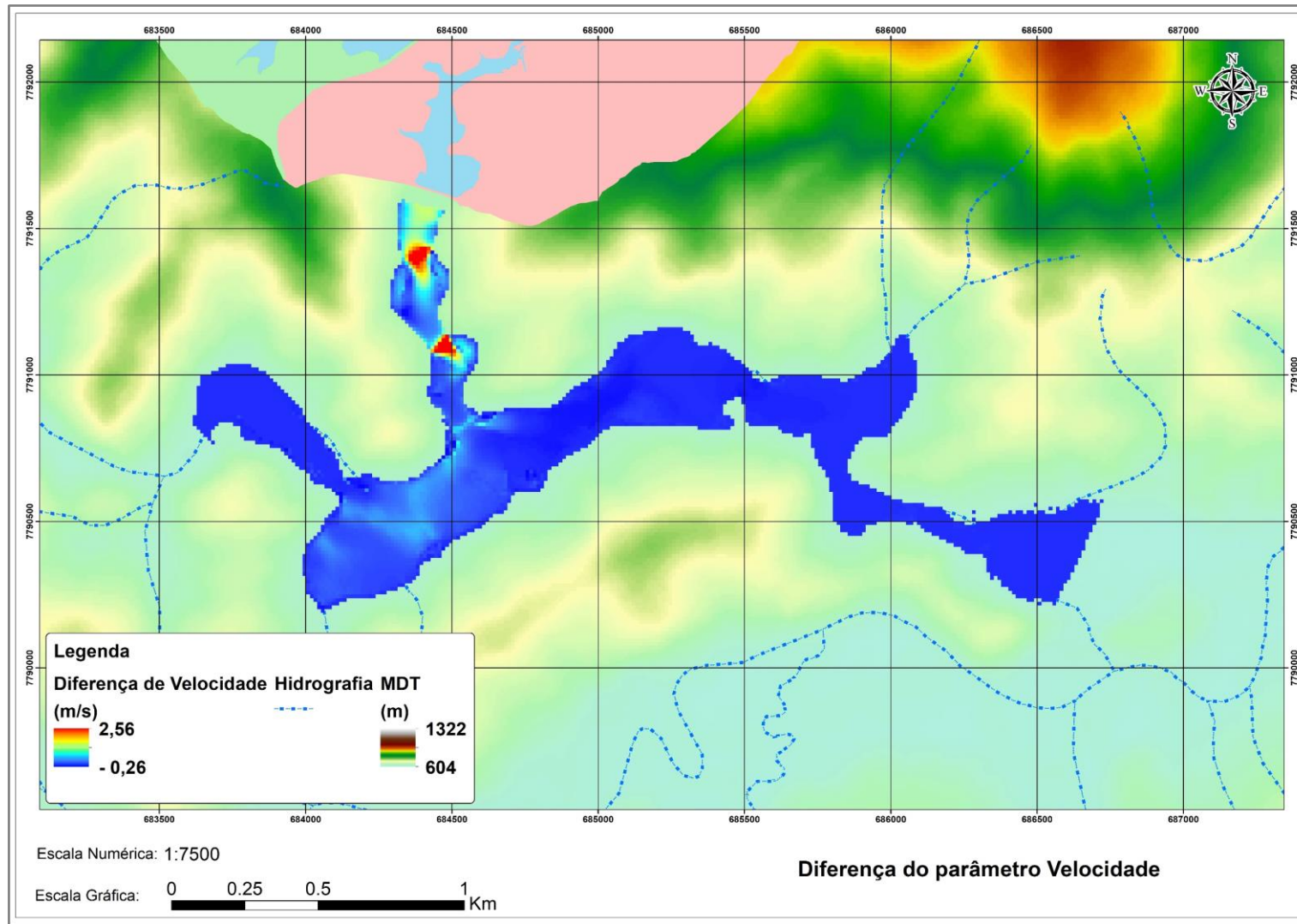
**Tabela 8.10-** Dados das estações fluviométricas utilizadas na regionalização.

Nome	Cachoeira dos Óculos Montante	Nova Era IV	Mário de Carvalho	Rio Piracicaba
Código	56539000	56659998	56696000	56610000
Área (Km <sup>2</sup> )	15900	3060	5270	1160
Operadora	CPRM	CPRM	CPRM	CPRM
Período de dados registrados	1975 - 2004	1990 - 2005	1987 - 2005	1926 - 2006
Rio	Rio Doce	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba	Rio Piracicaba
Município	Córrego Novo	Nova Era	Timóteo	Rio Piracicaba

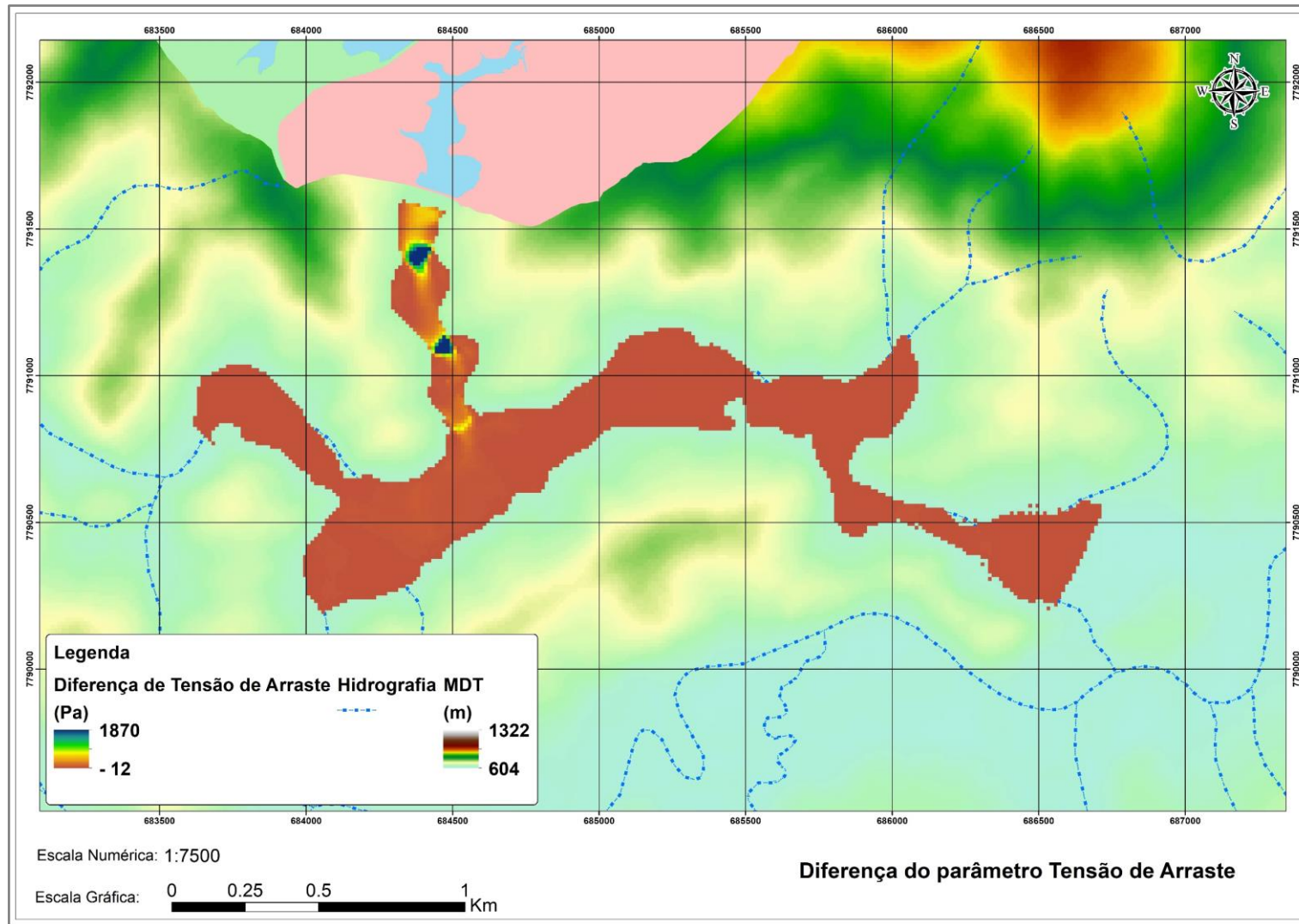
As condições de contorno dos hidrogramas de ruptura estão baseadas nos dados apresentados no gráfico da Figura 8.5. A Figura 8.8 a Figura 8.11 apresentam as diferenças entre as variáveis relacionadas aos máximos das cheias geradas entre as metodologias por cascata e usual, para as variáveis analisadas, profundidade, velocidade, tensão de arraste e risco hidrodinâmico. A diferença de áreas inundadas é desprezível.



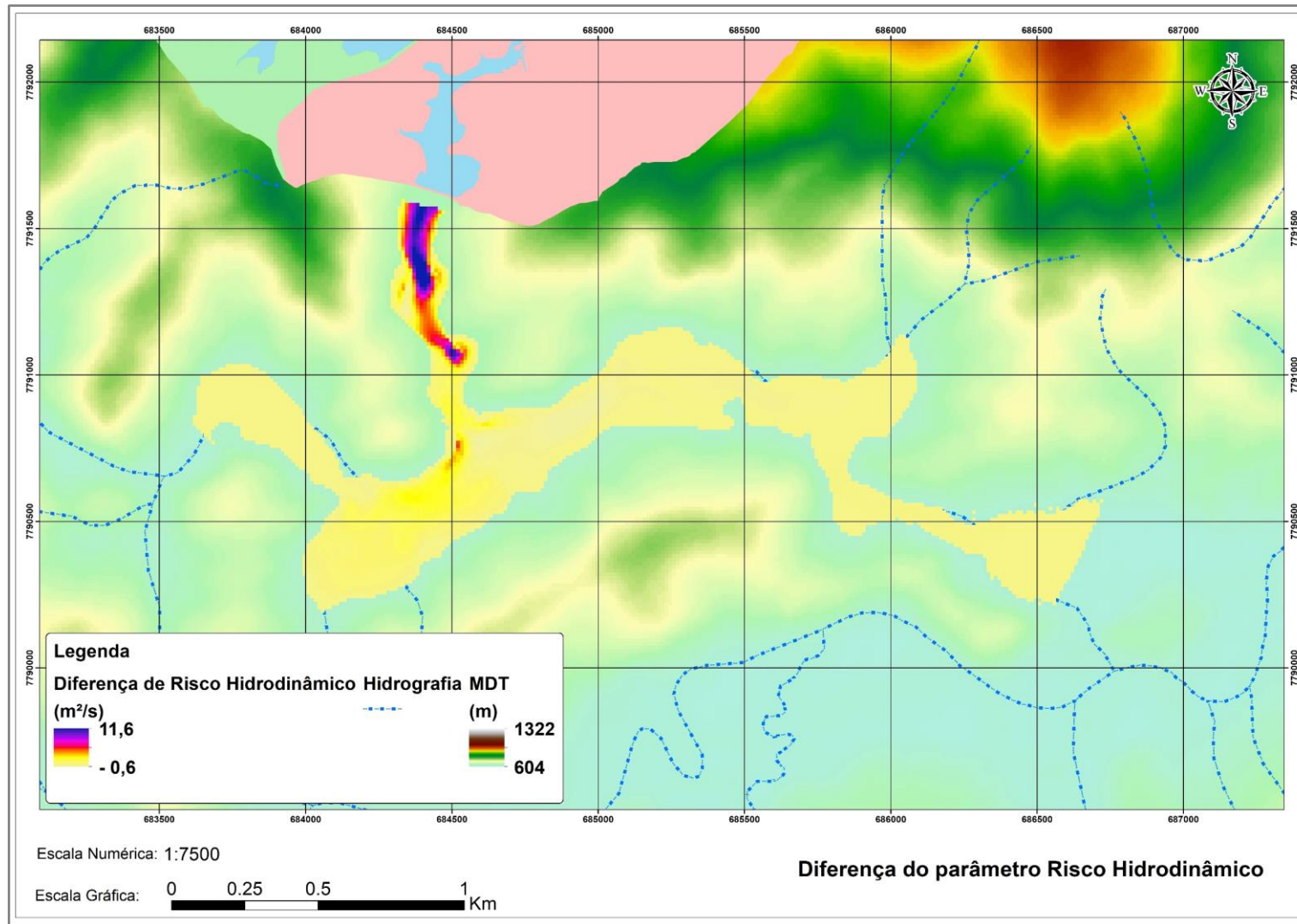
**Figura 8.8:** Diferença de profundidade.



**Figura 8.9:** Diferença de velocidade.



**Figura 8.10:** Diferença de tensão de arraste.



**Figura 8.11:** Diferença de risco hidrodinâmico.

## 9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para fechamento desta pesquisa são a seguir discutidos os principais pontos relevantes, as principais limitações desta pesquisa e, devido a isto, expostas sugestões para pesquisas vindouras.

A demonstração da aplicação de correções das brechas a jusante para considerar os efeitos em cascata se mostrou muito significativo, em termos de vazão de pico e tempo de chegada de onda, e com conseqüente impacto nas variáveis hidráulicas avaliadas e, assim, sugere-se sua avaliação diante de barragens em cascata durante estudos de *dam break*.

No tocante ao uso do material MBCA este pode ser empregado para representar barragens em processos de ruptura de forma satisfatória, no modo de falha por galgamento, pois este material possui representatividade dos processos que ocorrem, em similaridade erosiva, a uma ruptura, como verificado.

A principal vantagem da MBCA é a possibilidade de sua coleta antes desta entrar no sistema da bomba, pois esta não é coloidal ou solúvel, o que permite maior reuso da água do sistema de bombeamento e menor impacto sobre as bombas. Sugere-se que seja estendida a investigação da caracterização e uso do material MBCA para aplicação em outros modos de falha, principalmente para o modo de falha por *piping*. Reforça-se a ressalva que o material da MBCA não deve ser reaproveitado para além de um único teste. Como foi verificado, as taxas de cimento se tornam dificilmente determináveis, o que pode levar a dispendiosos e inconclusivos testes.

Evidentemente, existem limitações da representatividade da MBCA em relação às características geotécnicas dos solos e, assim, sugerem-se pesquisas para aprimoramento deste material de ensaio, principalmente no quesito compactação.

Os modelos reduzidos, dos quais os parâmetros para correções das brechas a jusante foram extraídos, apresentaram resultados com dispersões acentuadas, inerentes a este tipo de modelagem, porém, sem invalidar a proposição de correção das fórmulas de brechas a jusante. Este fato reforça a necessidade de mais pesquisas em modelos reduzidos para complementações e para garantir uma maior amplitude de aplicações destes resultados.

Deve ser mais explorado e aperfeiçoado o material MBCA, para que este possa representar melhor as características geológicas e geotécnicas dos solos.

Outro ponto importante é uma extensão da pesquisa para o aparato *EFA*, para ensaios com vazões superiores a 68,0 m<sup>3</sup>/h, e execução de ensaios em solos mais resistentes a erosão.

Quanto ao tempo de formação de brecha de jusante conclui-se que estes são menores que os usualmente encontrados na literatura, para o caso de rupturas em cascata, e que a largura da brecha, e demais dados da geometria desta, devem ser ajustados para as barragens localizadas a jusante, para que estes representem os fenômenos de forma mais adequada e realista.

Constatou-se que o tempo mínimo de formação de brecha de 15 minutos, conforme proposto por Von Thun e Gillette (1990) e MacDonald e Langridge-Monopolis (1984), não é necessariamente uma definição assertiva para o caso de rupturas em cascata e, como descrito ao longo da pesquisa, este parâmetro deve ser ajustado.

Foi apresentada uma proposta de correção das equações de previsão de formação de brecha para ruptura em cascata, que nesta pesquisa foi aplicada às fórmulas de Froehlich (2008), como exemplo de aplicação. Cabe mencionar que esta proposta de correção das equações de brecha para ruptura em cascata possui limitações, que são inerentes aos modelos reduzidos utilizados nesta pesquisa, como evidenciado pela baixa correlação entre os parâmetros avaliados entre as barragens de montante e de jusante dos modelos reduzidos.

A metodologia de ruptura em cascata pode ser empregada a mais de dois barramentos, ou em barramentos em série, considerando-se a análise entre cada par de barramentos subsequente, analisadas as condições de ruptura de uma barragem de jusante após cada hidrograma gerado por uma ruptura a montante.

Pôde-se verificar pelo exemplo de aplicação, onde comparou-se as metodologias em cascata e usual, que o pico de vazão é significativamente alterado, ocorrendo antecipadamente e mais elevado, com alterações significativas das variáveis analisadas de profundidade, velocidade, tensão de arraste e risco hidrodinâmico, principalmente no trecho a jusante da barragem de jusante.

Uma das principais conclusões é que os resultados das comparações das metodologias (pico de vazão e tempo de chegada), comparando barragens isoladas à ruptura de barragens em cascata,

podem variar significativamente entre um e outro par de barragens em análise, pois as variáveis hidrológicas (áreas de drenagem, permeabilidade do solo e outros fatores geomorfológicos) e os arranjos entre barramentos diferem significativamente e, assim, os resultados dos hidrogramas de ruptura em cascata podem variar muito.

Ainda, deve ser mencionado que esta variação pode ocorrer de acordo com a metodologia de estruturas isoladas escolhida. Por exemplo, estes efeitos poderiam ser diferentes caso se adotasse a metodologia proposta por Von Thun e Gillette (1990) em lugar de Froehlich (2008).

Recomenda-se que sejam produzidas pesquisas com modelos reduzidos de barragens em cascata, para avaliação das variáveis componentes dos arranjos entre os barramentos, com intuito de verificação da influência destas no processo de formação de brecha de jusante, sendo estas as seguintes:

- Variação das alturas das barragens;
- Variação do modo de falha (*piping*);
- Variação da vazão de ruptura;
- Variação da taxa de cimento na MBCA.

Recomenda-se que sejam desenvolvidas pesquisas em modelos reduzidos de barragens em cascata, com utilização da MBCA, com intuito de avaliar a profundidade que se pode atingir além do maciço. Nesta pesquisa o lastro possuía uma taxa muito maior de cimento na MBCA, 15% de cimento, como dito anteriormente, em relação aos modelos reduzidos que possuíam 4,5%, o que é uma limitação da pesquisa, a qual deve ser complementada em pesquisas futuras, onde os lastros dos maciços possuam uma taxa de cimento variável ao longo de sua altura.

Para outras futuras pesquisas sugere-se que sejam procedidos ensaios com modelos reduzidos construídos em solo, preferencialmente argilosos, com intuito de verificar a validade dos ajustes de ruptura em cascata aqui delimitados.

Sugere-se que sejam produzidas pesquisas similares a esta em um canal mais largo, com dimensões aproximadas aos modelos aqui produzidos, pois, para as barragens de jusante ocorreram as remoções completas dos maciços durante os testes, de forma que fica evidente a

possibilidade das brechas serem ainda mais amplas (largas) que aquelas determinadas nesta pesquisa, o que se deve a limitação da largura do canal utilizado.

Esta pesquisa, da forma como foi desenvolvida, apresenta limitações inerentes à sua metodologia, sendo a principal destas a definição de uma razão adequada entre a largura da brecha de jusante devido às condições de ruptura a montante. Assim, as fórmulas de ajuste de brecha em cascata podem ser mais detalhadas e aprimoradas. Para isso, sugere-se que sejam continuadas as tarefas de modelagem neste sentido, com modelos reduzidos em cascata, para melhor verificação da influência da distância entre os barramentos e influência dos volumes dos reservatórios.

Apesar desta pesquisa se basear em um caso específico de barragens de mineração, o material utilizado nos reservatórios dos modelos reduzidos era composto por água, de forma que não foi possível modelar o escoamento hiperconcentrado, que pode ocorrer durante a ruptura deste tipo de barragem. Assim, sugere-se, para o caso de barragens de mineração, que sejam conduzidas pesquisas que considerem os volumes e os pesos específicos dos rejeitos armazenados nos reservatórios, como tentativa de representação do escoamento hiperconcentrado.

Verificou-se que a aplicação do conceito de *Distância de Segurança* ( $L^*$ ) pode ser facilmente procedida, por meio de uso de softwares que perfaçam os trânsitos de cheias nos reservatórios. Contudo, as avaliações das parcelas de energia envolvidas na erosão dos maciços ( $h_{ee}$ ) e perda de energia pela interação entre as partículas sólidas e líquidas e por eventuais mudanças de regimes ( $h_{et}$ ) são, ainda, uma tarefa a ser cumprida em próximas pesquisas. A determinação destas parcelas pode levar a métodos mais precisos de determinação da  $L^*$  entre barramentos.

O sistema de escaneamento utilizado atendeu satisfatoriamente ao objetivo de registro das formas dos barramentos nas condições pré e pós ruptura. Contudo, durante a pesquisa verificou-se que existe a possibilidade do registro dinâmico e subaquático das condições de formação das brechas de ruptura de barragens. Os processos de formação de brechas são extremamente complexos e os registros destes podem permitir compreendê-los melhor e embasar o aprimoramento das equações que descrevem suas formações.

Os estudos de equações de brechas e os estudos de *dam break* são ainda pouco desenvolvidos e existem várias possibilidades de aprimoramento destes, o que deve ser fomentado para o desenvolvimento desta ciência.

Por último, o atendimento à segurança das barragens visa ao bem estar social, ecológico e econômico, de uma forma mais ampla, a todos os participantes da sociedade, e não devem ser poupados esforços neste sentido, com vistas aos efeitos adversos decorrentes das rupturas de barragens contemporâneas a esta pesquisa.

## 10 REFERÊNCIAS

ALTINAKAR, M. S. Z., MCGRATH, M., TURGAY, D., THOMAS, W., SCROGGINS, C., GAUNTT, T., HARVEY, H., KELLY, J. *Two-Dimensional Dam-Breach Flood Modeling and Inundation Mapping with Cascading Failures. Conference: World Environmental and Water Resources Congress*. Pg. 368 – 381. 2017.

ANA. Relatório de segurança de barragens 2015. Brasília. ANA. ISBN: 978-85-8210-035-6. 2016.

ANDRADE, S.B. Desenvolvimento de metodologia para construção de modelo reduzido para estudo de brechas formadas pela ruptura por galgamento de barragens em solo compactado homogêneas. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2017.

ANM - Agência Nacional de Mineração. Classificação das Barragens de Mineração Brasileiras - Data Base Janeiro/2019: Extração SIGBM para classificação - atualizada em 23.01.2019.

BAPTISTA, M.B., COELHO, M.M.L.P. Fundamentos de Engenharia Hidráulica. 3ª Ed. Belo Horizonte. Editora UFMG. 2010.

BRASIL. 12.334 de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB.

BRIAUD, J. L., TING, F. C. K., CHEN, H. C., CAO, Y., HAN, S. W., KWAK, K. W. *Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2001.

BRIAUD, J. L. *Case Histories in Soil and Rock Erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Pg. 1425 – 1447. 2008.

BRIAUD, J. L., CHEN, H. C., GOVINDASAMY, A.V, STORESUND R. *Erosion Tests on Samples from the New Orleans Levees. Geo-Denver 2007*. Denver, Colorado, United States. 2007.

BRIAUD, J. L., CHEN, H. C., GOVINDASAMY, A.V., STORESUND R. *Levee Erosion by Overtopping in New Orleans during the Katrina Hurricane. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. May 2008.

BENITO, G., GRODEK, T., ENZEL, Y. *The geomorphic and hydrologic impacts of the catastrophic failure of flood-control-dams the 1996 - Biescas flood. Z. Geomorph.* Pg. 417 – 437. N. F. Dezembro 1998.

BOUCHEHED, H., MIHOUBI, M.K., DERDOUS, O., DJEMILI, L. 2017. *Evaluation of potential dam break flood risks of the cascade dams Mexa and Bougous, El Taref, Algeria. Journal of Water and Land Development.* No. 33. pg. 39–45. DOI: 10.1515/jwld-2017-0017. 2017.

CAMPOS, R. G. D., SALIBA, A. P. M., CAMARGOS, R.S., BISCARO, V.H.B., PASSOS, D.T. Determinação de Taxas de Erosão Para Mistura de Borracha e Cimento para Aplicação em Modelos Reduzidos. XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina. Setembro de 2018 (a).

CAMPOS, R. G. D., SALIBA, A. P. M., BAPTISTA, M. B., BISCARO, V.H.B., CAMARGOS, R.S., PASSOS, D.T. Modelagem física para determinação de parâmetros de brechas em rupturas de barragens em cascata. XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina. Setembro de 2018(b).

CAO, Z., HUANG, W., PENDER, G., LIU, X. *Even more destructive: cascade dam break floods. Flood Risk Management* 7. Pg. 357–373. 2014.

CARVALHO, E. Segurança de Barragens - Aspectos Hidrológicos e Hidráulicos. CBDB. 2007.

CHANG, D.S., ZHANG, L.M. *Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth. Nat. Hazards Earth. Syst. Sci.* 10 - 4, 933–946. 2010.

COLORADO DAM SAFETY BRANCH. DIVISION OF WATER - STATE OF COLORADO. *Dam Safety Branch. Guidelines for Dam Breach Analysis. February 10, 2010.*

DEWALS B., ERPICUM S., DETREMBLEUR S., ARCHAMBEAU, P., PIROTON, M. *Failure of dams arranged in series or in complex. Unit of Hydrology, Applied Hydrodynamics and Hydraulic Constructions, Belgium Department ArGEnCo, University of Liege. Liège, Belgium. Published online: 27 August 2010.*

FILHO, D. S. Dimensionamento de Usinas Hidrelétricas Através de Técnicas de Otimização Evolutiva. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. Dezembro de 2003,

FISH, E. *The Forgotten Legacy of the Banqiao Dam Collapse*. February 8, 2013.

FREAD, D. L. *Breach: An erosion model for earthen dam failures*. Hydrologic research laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Weather Service. U.S. Department of Commerce. Silver Spring. June. 1987.

FROEHLICH D.C. *Embankment-Dam Breach Parameters*. In: *Proceedings of 1987 ASCE national conference on hydraulic engineering*, Williamsburg. Pg. 570–575. 1987.

FROEHLICH D.C. *Embankment dam breach parameters revisited*. In: *Proceedings of the 1995 ASCE conference on water resources engineering*. San Antonio. Pg. 887–891. 1995.

FROEHLICH, D.C. *Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncertainties*, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, Nº 12. Pg. 1708-1720. May 2008.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. Inventário de Barragem do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte. Pg. 47. Abril de 2017.

GILES, R. *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. 2ª Ed. McGraw-Hill. 1992.

GONZALEZ, J. H., RODRÍGUEZ, G. P., MARTÍNEZ, J. S., GONZÁLEZ, D. A., ARIAS, P., GESTO, M., DÍAZ, L. V. *Metrological comparison between Kinect I and Kinect II sensors*. *Measurement* 70, 21–26. 2015.

HANSON, G. J., COOK, K. R., HUNT, S. L. *Physical Modeling of Overtopping Erosion and Breach Formation of Cohesive Embankments*. Vol. 48 – 5. Pg 1783–1794. *American Society of Agricultural Engineers*. ISSN: 0001–2351. 2005.

HARRELL, S. *Intensification, Resilience, and Disaster in Chinese History*. *University of Washington. Conference on Disasters*. Kunming, August 21 - 23, 2013.

HAGEN, V. K., *Re-evaluation of Design Floods and Dam Safety*. *Transactions, International Commission on Large Dams*. Vol. 1, pg. 475 - 491. May 1982.

HELLER, V. *Scale effects in physical hydraulic engineering models. Journal of Hydraulic Research*. Vol. 49, Nº 3. Pg. 293 - 306. 2011.

HONGMIN, G., LANG, Y., YUNXIA, R., ZHU, G. *Flood Routing in Cascade Reservoir Caused by Instantaneous Dam Break Events. 2010 International Conference on e-Product e-Service and e-Entertainment*. 2010.

ICOLD - INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Dam break flood analysis: review and recommendations. Bulletin 111*. Paris. Pg 301. 1998.

INDERBITZEN A. L. *An erosion test for soils. Materials Research & Standards, West Conshohocken*. V.1, Nº.1, pg. 553-554, 1961.

ISHIHARA, K. *Undrained Deformation and Liquefaction of Sand under Cyclic Stress. Soil and Foundation*. 1977.

JULIEN, P.Y. *River Mechanics*. Cambridge University Press. 2002.

LUO, J., XU, W., ZHONG, T., CHEN, H. *Numerical simulation of cascaded dam-break flow in downstream reservoir. Institution of Civil Engineers. Accepted: 22/08/2017*.

LUO, Y., CHEN, L., XU, M., HUANG, J. *Breaking mode of cohesive homogeneous earth-rock-fill dam by overtopping flow. Nat Hazards 74:527 – 540. DOI 10.1007/s11069-014-1202-8. 15 May 2014*.

MACCHIONE, F. *Model for Predicting Floods due to Earthen Dam Breaching. I: Formulation and Evaluation. Journal of Hydraulic Engineering*. Pg. 1688-1696. December 2008.

MACDONALD T. C., LANGRIDGE-MONOPOLIS J. *Breaching Characteristics of Dam Failure. Journal Hydraulic Engineering*. 110 - 5: Pg 567 - 586. 1984.

MACHADO, N. C. *Retroanálise da propagação decorrente da ruptura da barragem do fundão com diferentes modelos numéricos e hipóteses de simulação. Belo Horizonte. Dissertação*. Pg. 159. UFMG. 2017.

MANTOVANELLI, G. B., PIRES, P.J.M., SALIBA, A.P.M., MARTINEZ, C.B. *Uma abordagem experimental para obtenção da taxa de erosão de solos através de um aparato do tipo pistão. Geotecnia*. 139. 29 - 47. 2017.

MARCHE, C., GAGNON, J., QUACH, T. T., KAHAWITA, R., BEAUCHEMIN, P. *Simulation of Dam Failures in Multidike Reservoirs Arranged in Cascade*. Pg. 950-961. *Journal of Hydraulic Engineering*. November 1997.

MARINELLO, F., PEZZUOLO, A., GASPARINI, F., ARVIDSSON, J., SARTORI, L. *Application of the Kinect sensor for dynamic soil surface characterization*. *Precision Agric.* 16: 601 - 612. *Published online: 12 May 2015*.

MCCOOK, D. K. *A Comprehensive Discussion of Piping and Internal Erosion Failure Mechanisms*. *Dam Safety 2004, 21th Annual Conference of the Association of State Dam Safety Officials*. 2004.

MEMOS, C.D., STAMOU, A.I., POLITIS, M.G., *Flooding due to Sequential Dam Breaking*. *School of Civil Engineering. National Technical University of Athens. Proceedings of the 2006 IASME/WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, Chalkida, Greece, May 11-13*, pg. 119-127. 2006.

MORGENSTERN, N. R., VICK, S. G., VIOTTI, C. B., WATTS, B. D. *Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*. 2016. Pg. 88. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Acesso em: 07 setembro 2016.

NOVAK, P., GUINOT, V., JEFFREY A., REEVE, D.E. *Hydraulic Modelling – An Introduction: Principles, methods and applications*. Edition published in the *Taylor & Francis e-Library, 2010*.

PENG, M., ZHANG, L.M., CHANG, D.S., SHI, Z.M. *Engineering risk mitigation measures for the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake*. *Eng. Geol.* 180, Pg. 68 - 84. 2014.

PENG, M., ZHANG, L.M. *Analysis of human risks due to dam break floods — part 2: Application to Tangjiashan Landslide Dam failure*. *Nat. Hazards* 64 (2), Pg.1899 - 1923. 2012.

PENG, M., ZHANG, L.M. *Dynamic decision making for dam-break emergency Management - part 2: application to Tangjiashan Landslide Dam failure*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, Pg. 439 - 454. 2013.

PEREIRA P.N., SANTOS R.P., FERREIRA W.F.V., GUIMARÃES R. D. S., MARTINS J.R.S., JUNIOR F. M. F., SANTOS R. C. P. *Modelação da propagação de cheias ocasionadas*

por rompimento de barragens na cadeia de geração do rio Paranapanema. XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Salvador, 12 A 15 de outubro de 2003.

PICKERT, G., WEITBRECHT, V., BIEBERSTEIN, A. *Breaching of overtopped river embankments controlled by apparent cohesion. Journal of Hydraulic Research*. Vol. 49. Nº 2. Pg. 143 - 156. 2011.

PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina dos Textos. São Paulo. 2006.

POWLEDGE, G.R., RALSTON, D.C., MILLER, P., CHEN, Y.H., CLOPPER, P.E., TEMPLE, D.M. *Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. II: Hydraulic and Design Considerations. Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 115, nº 8, August 1989, pg. 1056 - 1075. Pugh. 1989.

PRESS, W.H., TEUKOLSKY, S.A., VETTERLING, W.T., FLANNERY B.P. *Numerical recipes in C: The art of scientific computing. 2nd Ed. Cambridge University Press*. 1992.

RIBEIRO, V. Q. F. Proposta de metodologia para avaliação do efeito de rupturas de estruturas de contenção de rejeitos. Belo Horizonte. Dissertação. Pg. 267. UFMG. 2015.

ROBERTSON, P. K., de MELO, L., WILLIAMS, D., WILSON, G. W. Relatório do Painel de Especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da barragem I do córrego do Feijão. Pg. 77. 12 de dezembro de 2019.

SALIBA, A. P. M. Uma nova abordagem para análise de ruptura por galgamento de barragens homogêneas de solo compactado. 2008. 179 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SCHAEFER, M., BARKER, B. *Dam Break Inundation Analysis and Downstream Hazard Classification. Dam Safety Guidelines - Technical Note 1, MGS. Engineering Consultants Inc. Washington, USA, Publication Number 92-55 E, October, pg. 24. 2007.*

SEMAD. Nota de Esclarecimento 12 - Desastre Barragem B1. IEF Mapeia Área de Vegetação Impactada Pelos Rejeitos. Sex, 01 de fevereiro de 2019 12:32. Disponível em <http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/1/3756-nota-de-esclarecimento-12-desastre-barragem-b1>.

SHI, Z.M., GUAN, S.G., PENG, M., ZHANG, L.M., ZHU, Y., CAI, Q.P. *Cascading breaching of the Tangjiashan landslide dam and two smaller downstream landslide dams*. Available online 27 May 2015.

SINGH, V.P., SCARLATOS, P.D. *Analysis of gradual earth-dam failure*. *Journal of Hydraulics Engineering*. ASCE 114 - 1, 21 - 42. 1988.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS – SNISB. Perguntas Frequentes. Disponível em <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/perguntas-frequentes>>. Acesso em 21 set. 2019.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. *HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual. Version 5.0.5*. Pg. 547. 2016.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. *Hydrologic Modeling System – HEC-HMS. Release Notes. August 2002*.

U.S. SOIL CONSERVATION SERVICE. *Simplified Dam-Breach Routing Procedure. Technical Release No. 66 (Third Edition)*. 134 pg. 1985.

VIANNA, M. R. *Mecânica dos Fluidos para Engenheiros*. 3ª Edição. Belo Horizonte. Imprimatur. Pg. 582. 1997.

WISEU, M. T., ALMEIDA, A. B., FRANCO, A. B. *Integration of Computational and Experimental Models for Dam Break Flood Risk Analysis*. ISSN: 2041-9031, ISSN: 2041-904X. *J. of Safety and Security Eng.* Vol. 4, Nº 1. 1 - 18. 2014.

VISSER, P. J. *A Model for Breach Erosion in Sand-Dikes*. Pg. 3829 - 3842. *Coastal Engineering*, 2000.

VON THUN J.L., GILLETTE D.R. *Guidance on breach parameters*. Unpublished internal document, US Bureau of Reclamation, Denver, 17 pg. 1990.

WAHL T.L. *Prediction of embankment dam breach parameters: A literature review and needs assessment*. DSO-98-004. *Dam safety research report*. *Dam Safety*. 1998.

WAHL T.L. *Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters*. *Journal of Hydraulic Engineering*. 130 - 5: 389 - 397. May 2004.

WANG, Z., BOWLES, D. S. *Three-dimensional non-cohesive earthen dam breach model. Part 2: Validation and applications. Advances in Water Resources* 29. Pg. 1490 - 1503. 2006.

XU, Y., ZHANG, L.M. *Breaching parameters of earth and rockfill dams. J. Geotech. Geoenviron.* 135 - 12, pg. 1957 - 1970. 2009.

XU, Y., ZHANG, L.M. JIA, J. S. *Analysis of earth dam failures - A database approach. First International Symposium on Geotechnical Safety & Risk Shanghai. Tongji University. China. Oct. 18 - 19, 2007.*

YANG, X., WEI-LIN, X., SHU-JING, L, HUA-YONG, C., NAI-WEN, L. *Experimental Study of Dam-Break Flow in Cascade Reservoirs with Steep Bottom Slope. Journal of Hydrodynamics.* 23 (4): 491 - 497 - DOI: 10.1016/S1001-6058 (10) 60140-0. 2011.

ZHANG, KAHAWITA, SHEN e LI. *A PC-based numerical package for the simulation of two-dimensional free surface flows. Proc. 2nd Canadian Conference in Computing in Civil Engineering. Ottawa, Ontario, Canada. 1992.*

ZHANG, Y., XU, W. *Retarding effects of an intermediate intact dam on the dam-break flow in cascade Reservoirs. Journal of Hydraulic Research.* 55 - 3. 438 - 444. 2017.

ZHI-PAN, N., WEI-LIN, X., NAI-WEN, L., YANG, X. *Experimental Investigation of The Failure of Cascade Landslide Dams. Journal of Hydrodynamics.* 24 - 3, 430 - 441 DOI: 10.1016/S1001-6058 (11) 60264-3. 2012.

ZHOU, Z., WANG, X., CHEN, W., DENG, S., LIU, M. *Numerical simulation of dam-break flooding of cascade reservoirs. Accepted: 10 March 2017. Tianjin University and Springer-Verlag GmbH Germany. 2017.*

## **APÊNDICES**

**Apêndice I – Resultados dos ensaios com a MBCA procedidos no  
CPH/UFMG**

Ensaio N°	CP	Peso borracha (g)	Altura (m)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Cimento (g)	Cimento massa (%)	Cimento volume (%)	H (cm)	h' (cm)	H eft. (cm)	H eft. (mm)	Tempo de erosão (s)	Tempo de erosão (hr.)	Taxa de erosão (mm/s)	Taxa de erosão (mm/hr.)	Tipo
1	CP1	123	0,142	178,4	5,0	4,1%	5,0%	16,6	2,4	14,2	142	75	0,0208	1,89333	6816	
2	CP2	129	0,154	193,5	10,0	7,8%	9,5%	16,6	1,2	15,4	154	347	0,0964	0,44380	1598	
3	CP4	129	0,154	193,5	20,0	15,5%	19,1%	16,6	1,2	15,4	154	255	0,0708	0,60392	2174	12 <sup>a</sup> Série
4	CP5	125	0,151	189,8	25,0	20,0%	24,6%	16,6	1,5	15,1	151	580	0,1611	0,26034	937	Compactado
5	CP6	124	0,131	164,6	30,0	24,2%	29,8%	16,6	3,5	13,1	131	292	0,0811	0,44863	1615	1 kg
6	CP7	125	0,148	186,0	35,0	28,0%	34,5%	16,5	1,7	14,8	148	604	0,1678	0,24503	882	
7	CP8	128	0,147	184,7	40,0	31,3%	38,5%	16,5	1,8	14,7	147	742	0,2061	0,19811	713	
8	CP9	129	0,156	196,0	5,0	3,9%	4,8%	16,6	1,0	15,6	156	160	0,0444	0,97500	3510	
9	CP10	130	0,152	191,0	10,0	7,7%	9,5%	16,5	1,3	15,2	152	320	0,0889	0,47500	1710	
10	CP11	128	0,157	197,3	15,0	11,7%	14,4%	16,6	0,9	15,7	157	275	0,0764	0,57091	2055	12 <sup>a</sup> Série
11	CP12	128	0,157	197,3	20,0	15,6%	19,2%	16,5	0,8	15,7	157	181	0,0503	0,86740	3123	Adensado
12	CP14	128	0,156	196,0	30,0	23,4%	28,8%	16,5	0,9	15,6	156	940	0,2611	0,16596	597	
13	CP15	129	0,159	199,8	35,0	27,1%	33,4%	16,6	0,7	15,9	159	598	0,1661	0,26589	957	
14	CP16	129	0,157	197,3	40,0	31,0%	38,2%	16,6	0,9	15,7	157	334	0,0928	0,47006	1692	
15	CP1	130	0,151	189,8	4,0	3,1%	3,8%	16,6	1,5	15,1	151	126	0,0350	1,19841	4314	
16	CP2	130	0,154	193,5	9,0	6,9%	8,5%	16,6	1,2	15,4	154	315	0,0875	0,48889	1760	
17	CP3	130	0,159	199,8	14,0	10,8%	13,3%	16,6	0,7	15,9	159	148	0,0411	1,07432	3868	13 <sup>a</sup> Série
18	CP4	130	0,151	189,8	19,0	14,6%	18,0%	16,6	1,5	15,1	151	236	0,0656	0,63983	2303	Compactado
19	CP5	130	0,152	191,0	24,0	18,5%	22,7%	16,6	1,4	15,2	152	332	0,0922	0,45783	1648	1 kg
20	CP6	130	0,153	192,3	29,0	22,3%	27,5%	16,6	1,3	15,3	153	210	0,0583	0,72857	2623	
21	CP7	130	0,157	197,3	34,0	26,2%	32,2%	16,5	0,8	15,7	157	378	0,1050	0,41534	1495	
22	CP8	130	0,155	194,8	39,0	30,0%	36,9%	16,5	1,0	15,5	155	479	0,1331	0,32359	1165	
23	CP9	130	0,159	199,8	4,0	3,1%	3,8%	16,6	0,7	15,9	159	70	0,0194	2,27143	8177	
24	CP10	130	0,156	196,0	9,0	6,9%	8,5%	16,5	0,9	15,6	156	140	0,0389	1,11429	4011	13 <sup>a</sup> Série
25	CP11	130	0,154	193,5	14,0	10,8%	13,3%	16,6	1,2	15,4	154	152	0,0422	1,01316	3647	Adensado
26	CP12	130	0,16	201,1	19,0	14,6%	18,0%	16,5	0,5	16	160	447	0,1242	0,35794	1289	
27	CP13	130	0,155	194,8	24,0	18,5%	22,7%	16,5	1,0	15,5	155	470	0,1306	0,32979	1187	

Ensaio N°	CP	Peso borracha (g)	Altura (m)	Volume (cm³)	Cimento (g)	Cimento massa (%)	Cimento volume (%)	H (cm)	h' (cm)	H eft. (cm)	H eft. (mm)	Tempo de erosão (s)	Tempo de erosão (hr.)	Taxa de erosão (mm/s)	Taxa de erosão (mm/hr.)	Tipo
28	CP14	130	0,156	196,0	29,0	22,3%	27,5%	16,5	0,9	15,6	156	565	0,1569	0,27611	994	
29	CP15	130	0,156	196,0	34,0	26,2%	32,2%	16,6	1,0	15,6	156	470	0,1306	0,33191	1195	
30	CP16	130	0,105	131,9	39,0	30,0%	36,9%	16,6	6,1	10,5	105	565	0,1569	0,18584	669	
31	CP1	128	0,154	193,5	3,0	2,3%	2,9%	16,6	1,2	15,4	154	77	0,0214	2,00000	7200	
32	CP2	130	0,155	194,8	8,0	6,2%	7,6%	16,6	1,1	15,5	155	230	0,0639	0,67391	2426	
33	CP3	130	0,156	196,0	13,0	10,0%	12,3%	16,6	1,0	15,6	156	170	0,0472	0,91765	3304	14ª Série
34	CP3	130	0,159	199,8	18,0	13,8%	17,0%	16,6	0,7	15,9	159	200	0,0556	0,79500	2862	Compactado
35	CP6	129	0,155	194,8	28,0	21,7%	26,7%	16,6	1,1	15,5	155	245	0,0681	0,63265	2278	1 kg
36	CP7	129	0,156	196,0	33,0	25,6%	31,5%	16,5	0,9	15,6	156	530	0,1472	0,29434	1060	
37	CP8	128	0,154	193,5	38,0	29,7%	36,5%	16,5	1,1	15,4	154	805	0,2236	0,19130	689	
38	CP9	129	0,155	194,8	3,0	2,3%	2,9%	16,6	1,1	15,5	155	90	0,0250	1,72222	6200	
39	CP10	129	0,154	193,5	8,0	6,2%	7,6%	16,5	1,1	15,4	154	257	0,0714	0,59922	2157	
40	CP11	130	0,157	197,3	13,0	10,0%	12,3%	16,6	0,9	15,7	157	165	0,0458	0,95152	3425	14ª Série
41	CP12	128	0,155	194,8	18,0	14,1%	17,3%	16,5	1,0	15,5	155	227	0,0631	0,68282	2458	Adensado
42	CP14	130	0,158	198,5	28,0	21,5%	26,5%	16,5	0,7	15,8	158	228	0,0633	0,69298	2495	
43	CP15	128	0,154	193,5	33,0	25,8%	31,7%	16,6	1,2	15,4	154	439	0,1219	0,35080	1263	
44	CP16	130	0,152	191,0	38,0	29,2%	36,0%	16,6	1,4	15,2	152	429	0,1192	0,35431	1276	
45	CP8	130	0,152	191,0	28,0	21,5%	26,5%	16,5	1,3	15,2	152	200	0,0556	0,76000	2736	Série Extra
46	CP1	130	0,157	197,3	42,0	32,3%	39,8%	16,6	0,9	15,7	157	586	0,1628	0,26792	965	
47	CP2	130	0,134	168,4	43,0	33,1%	40,7%	16,6	3,2	13,4	134	2460	0,6833	0,05447	196	15ª Série
48	CP3	130	0,154	193,5	44,0	33,8%	41,7%	16,6	1,2	15,4	154	2267	0,6297	0,06793	245	Compactado
49	CP4	130	0,156	196,0	45,0	34,6%	42,6%	16,6	1,0	15,6	156	-	-	-	-	1 kg
50	CP6	127	0,154	193,5	41,0	32,3%	39,7%	16,6	1,2	15,4	154	-	-	-	-	
51	CP7	125	0,145	182,2	42,0	33,6%	41,4%	16,5	2,0	14,5	145	-	-	-	-	16ª Série
52	CP8	131	0,149	187,2	43,0	32,8%	40,4%	16,5	1,6	14,9	149	-	-	-	-	Compactado
53	CP9	130	0,153	192,3	44,0	33,8%	41,7%	16,6	1,3	15,3	153	-	-	-	-	1 kg
54	CP2	130	0,156	196,0	33,0	25,4%	31,2%	16,6	1,0	15,6	156	170	0,0472	0,91765	3304	

Ensaio N°	CP	Peso borracha (g)	Altura (m)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Cimento (g)	Cimento massa (%)	Cimento volume (%)	H (cm)	h' (cm)	H eft. (cm)	H eft. (mm)	Tempo de erosão (s)	Tempo de erosão (hr.)	Taxa de erosão (mm/s)	Taxa de erosão (mm/hr.)	Tipo
55	CP5	130	0,156	196,0	36,0	27,7%	34,1%	16,6	1,0	15,6	156	248	0,0689	0,62903	2265	17 <sup>a</sup> Série
56	CP6	130	0,158	198,5	37,0	28,5%	35,0%	16,6	0,8	15,8	158	470	0,1306	0,33617	1210	Compactado

Ensaio N°	CP	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	TE/τ (mm/hr .Pa)	Reynolds	τ Calculada Moody (Pa)	Escala(Pa) τ	Taxa de erosão escala (mm/hr.)	Minutos	Segundos	Tempo (s)
1	CP1	20,0	0,0056	0,73	23,0	8329,9	61502	1,3	0,8	6026,4	1	15	75
2	CP2	18,8	0,0052	0,69	25,0	2104,6	57812	1,2	0,8	1412,6	5	47	347
3	CP4	25,4	0,0071	0,93	27,0	1672,4	78107	2,1	1,3	1922,3	4	15	255
4	CP5	30,3	0,0084	1,11	30,0	525,3	93175	2,9	1,8	828,7	9	40	580
5	CP6	67,2	0,0187	2,46	35,0	211,9	206646	12,5	7,6	1428,0	4	52	292
6	CP7	67,2	0,0187	2,46	36,0	115,7	206646	12,5	7,6	779,9	10	4	604
7	CP8	67,2	0,0187	2,46	39,0	93,6	206646	12,5	7,6	630,6	12	22	742
8	CP9	20,2	0,0056	0,74	28,0	4205,1	62117	1,4	0,8	3103,4	2	40	160
9	CP10	20,4	0,0057	0,75	30,0	2008,7	62732	1,4	0,9	1511,9	5	20	320
10	CP11	25,1	0,0070	0,92	32,0	1619,0	77185	2,1	1,3	1817,2	4	35	275
11	CP12	28,0	0,0078	1,03	33,0	1997,0	86103	2,6	1,6	2760,9	3	1	181
12	CP14	35,1	0,0098	1,29	35,0	256,3	107936	3,8	2,3	528,2	15	40	940
13	CP15	50,0	0,0139	1,83	36,0	202,3	153755	7,7	4,7	846,3	9	58	598
14	CP16	64,8	0,0180	2,37	37,0	213,0	199266	13,0	7,9	1496,2	5	34	334
15	CP1	20,8	0,0058	0,76	24,0	4874,8	63962	1,4	0,9	3814,5	2	6	126
16	CP2	20,8	0,0058	0,76	26,0	1988,7	63962	1,4	0,9	1556,1	5	15	315
17	CP3	23,0	0,0064	0,84	26,0	3628,4	70727	1,7	1,1	3419,5	2	28	148
18	CP4	23,0	0,0064	0,84	27,0	2161,0	70727	1,7	1,1	2036,6	3	56	236

Ensaio N°	CP	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	TE/ $\tau$ (mm/hr .Pa)	Reynolds	$\tau$ Calculada Moody (Pa)	Escala $\tau$ (Pa)	Taxa de erosão escala (mm/hr.)	Minutos	Segundos	Tempo (s)
19	CP5	26,2	0,0073	0,96	28,0	1203,9	80568	2,2	1,4	1457,3	5	32	332
20	CP6	40,3	0,0112	1,48	29,0	853,5	123926	5,0	3,1	2319,0	3	30	210
21	CP7	48,0	0,0133	1,76	30,0	343,0	147605	7,1	4,4	1322,0	6	18	378
22	CP8	67,0	0,0186	2,45	32,0	153,8	206031	12,4	7,6	1030,0	7	59	479
23	CP9	26,1	0,0073	0,96	37,0	6018,5	80260	2,2	1,4	7229,9	1	10	70
24	CP10	26,1	0,0073	0,96	37,0	2952,5	80260	2,2	1,4	3546,7	2	20	140
25	CP11	34,4	0,0096	1,26	37,0	1628,9	105783	3,7	2,2	3224,8	2	32	152
26	CP12	35,2	0,0098	1,29	36,0	549,6	108243	3,8	2,3	1139,3	7	27	447
27	CP13	45,0	0,0125	1,65	34,0	309,8	138379	6,3	3,8	1049,7	5	6	306
28	CP14	67,2	0,0187	2,46	34,0	130,4	206646	12,5	7,6	878,8	2	17	137
29	CP15	67,2	0,0187	2,46	34,0	156,8	206646	12,5	7,6	1056,5	7	50	470
30	CP16	67,2	0,0187	2,46	32,0	87,8	206646	12,5	7,6	591,5	9	25	565
31	CP1	19,4	0,0054	0,71	23,0	8906,6	59657	1,3	0,8	6365,9	1	17	77
32	CP2	19,1	0,0053	0,70	24,0	3096,2	58734	1,3	0,8	2145,0	3	50	230
33	CP3	24,5	0,0068	0,90	26,0	2731,4	75340	2,0	1,2	2920,8	2	50	170
34	CP3	28,3	0,0079	1,04	25,0	1791,7	87025	2,6	1,6	2530,5	3	20	200
35	CP6	28,9	0,0080	1,06	27,0	1367,2	88870	2,7	1,7	2013,7	4	5	245
36	CP7	39,0	0,0108	1,43	29,0	368,2	119929	4,7	2,9	936,9	8	50	530
37	CP8	47,0	0,0131	1,72	33,0	164,8	144530	6,8	4,2	608,9	13	25	805
38	CP9	17,6	0,0049	0,64	26,0	9318,6	54122	1,1	0,7	5481,8	1	30	90
39	CP10	18,3	0,0051	0,67	26,0	2999,0	56274	1,2	0,7	1907,3	4	17	257
40	CP11	25,9	0,0072	0,95	27,0	2534,3	79645	2,2	1,4	3028,6	2	45	165
41	CP12	25,9	0,0072	0,95	28,0	1818,6	79645	2,2	1,4	2173,4	3	47	227
42	CP14	40,8	0,0113	1,49	29,0	792,0	125464	5,2	3,1	2205,7	3	48	228
43	CP15	46,7	0,0130	1,71	30,0	306,0	143607	6,8	4,1	1116,6	7	19	439
44	CP16	67,4	0,0187	2,47	30,0	166,4	207261	12,5	7,7	1127,8	7	9	429
45	CP8	46,1	0,0128	1,69	27,0	680,4	141762	6,6	4,0	2419,1	3	20	200

Ensaio N°	CP	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/s)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)	TE/τ (mm/hr .Pa)	Reynolds	τ Calculada Moody (Pa)	Escala(Pa) τ	Taxa de erosão escala (mm/hr.)	Minutos	Segundos	Tempo (s)
46	CP1	50,3	0,0140	1,84	24,0	201,5	154677	7,8	4,8	852,8	9	46	586
47	CP2	68,0	0,0189	2,49	33,0	25,1	209107	12,8	7,8	173,4	41	0	2460
48	CP3	67,4	0,0187	2,47	36,0	31,9	207261	12,5	7,7	216,2	37	47	2267
49	CP4	67,4	0,0187		37,0	#N/D	0	#N/D	#N/D		NE	NE	NE
50	CP6	67,4	0,0187		29,0	#N/D	0	#N/D	#N/D		NE	NE	NE
51	CP7	67,4	0,0187		30,0	#N/D	0	#N/D	#N/D		NE	NE	NE
52	CP8	67,4	0,0187		33,0	#N/D	0	#N/D	#N/D		NE	NE	NE
53	CP9	67,4	0,0187		33,0	#N/D	0	#N/D	#N/D		NE	NE	NE
54	CP2	48,0	0,0133	1,76	22,0	757,8	147605	7,1	4,4	2920,8	2	50	170
55	CP5	46,1	0,0128	1,69	24,0	563,1	141762	6,6	4,0	2002,2	4	8	248
56	CP6	50,0	0,0139	1,83	24,0	255,8	153755	7,7	4,7	1070,0	7	50	470