

## MODELAGEM DE BRECHA DE BARRAGENS DE TERRA: APLICAÇÃO DO MODELO BREACH NO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DO CIPÓ

Fernando Fonsêca de Freitas

Florianópolis, 2018

Fernando Fonsêca de Freitas

**MODELAGEM DE BRECHA DE BARRAGENS DE TERRA:  
APLICAÇÃO DO MODELO BREACH NO ROMPIMENTO  
HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DO CIPÓ**

Trabalho de Conclusão de Curso  
submetido ao Programa de Graduação  
da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Engenheiro em Engenharia Sanitária e  
Ambiental  
Orientadora: Profa. Dra. Alexandra  
Rodrigues Finotti  
Coorientador: Guilherme Piaie de  
Oliveira Palma

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Freitas, Fernando

Modelagem de Brecha de Barragens de Terra :  
Aplicação do Modelo BREACH no Rompimento Hipotético  
da Barragem do Cipó / Fernando Freitas ;  
orientadora, Alexandra Rodrigues Finotti,  
coorientador, Guilherme Piaie de Oliveira Palma,  
2018.

93 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro  
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2.  
Acidentes em barragens. 3. Modelo empírico. 4.  
BREACH. 5. Barragens de Terra. I. Rodrigues  
Finotti, Alexandra. II. Piaie de Oliveira Palma,  
Guilherme. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental. IV. Título.

Fernando Fonsêca de Freitas

**MODELAGEM DE BRECHA DE BARRAGENS DE TERRA:  
APLICAÇÃO DO MODELO BREACH NO ROMPIMENTO  
HIPOTÉTICO DA BARRAGEM DO CIPÓ**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para  
obtenção do Título de “Engenheiro Sanitarista Ambiental” e aprovada  
em sua forma final pelo Programa de Graduação em Engenharia  
Ambiental e Sanitária

Florianópolis, 30 de novembro de 2018.



Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**



Prof.ª Alexandra Rodrigues Finotti, Dr.ª  
Orientadora  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.ª Nadia Bernardi Bonumá, Dr.ª  
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dirceu Silveira Reis Junior, Dr.  
Universidade de Brasília



Este trabalho é dedicado à minha mãe e irmã. E a todes que possuem suas liberdades e vidas cerceadas por serem quem são.



## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é resultado de uma trajetória que se iniciou a passos incertos lá em 2012. Sete anos e três universidades depois, aproxima-se o momento não de uma derradeira conclusão, mas de uma oportunidade de expansão de horizontes e busca de novos caminhos sob fôlego e brilho renovados. Como toda boa viagem, essa foi preenchida de personagens que fizeram de circunstâncias, memórias; de dificuldades, superação; de vitórias, festas.

Os agradecimentos se iniciam na família, minha mãe e irmã: fontes de apoio inabalável e incondicional, suporte em todas as esferas possíveis, encorajamento racional de todo e qualquer sonho, plano mirabolante e ideia descabida.

Agradeço ainda à Universidade de Brasília como solo fértil para o florescimento de ideias, senso crítico, cidadania, experiência, sonhos e amizades inúmeras, com destaque à: Carol, Murilo, Bruna, Iara, Aninha, Luna, Letícia e Daniel (cujas revisões foram de auxílio inestimável para a conclusão desse trabalho); adicionalmente, às professoras Ariúska e Christina Brandão. À Edinburgh Napier University por se posicionar como divisor de águas pessoalmente e profissionalmente, aos tantos amigos feitos no intercâmbio, com destaque à Jessica Cintra; À Concreta Consultoria e Serviços, empresa júnior da UnB, dos amigos e profissionais que fizeram do tempo e projetos realizados oportunidades de crescimento imensuráveis, com destaque à Vanessa Félix; Por fim, mas não menos importante, à UFSC, por representar um passo planejado inesperado, uma mudança de direção no fim da caminhada, e de bônus: à ilha de Florianópolis e as amigas, Luíza, Bruna e Ivana, com as quais compartilhei preocupações e alegrias de todas as sortes.

À ENGEVIX Engenharia e Projetos, meu agradecimento se estende a todo o corpo de profissionais que fizeram de um estágio uma experiência mercadológica plena e de aprendizado exponencial por mais de um ano, com destaque ao Anaximandro, ao Vinícius e ao Guilherme, também meu coorientador, cujas conversas pautaram a idealização desse trabalho e apoio e presença ao longo do processo favoreceram sua finalização; a professora Alexandra Finotti, pelas revisões precisas e detalhadas, por toda a disponibilidade e auxílios prestados.





Era só mais um peixe  
Era só mais um rio  
Água deu lugar pra lama  
Tá tudo vazio.

[...]

É lama, é barro, é doce, é mancha, é sangue, é feto  
É sede, é mato, é fome, é mãe, é tudo quieto

[...]

Pra descer todo santo ajuda  
Assumir de quem é a culpa  
Água é vida mas mata  
Toda mata devasta.

(Mulamba - Lama, 2018)



## RESUMO

Grandes barragens possuem riscos inerentes sob a ótica da possibilidade de rompimento e impacto associado aos meios físicos, biológicos e antrópicos componentes do vale de jusante. Dessa forma, a avaliação da extensão desses danos potenciais, ou seja, os estudos de rompimento de barragens e de modelos de simulação dessas ocorrências se posicionam como ferramenta de gestão cujo desenvolvimento é fundamental. O presente trabalho objetiva comparar a utilização do modelo físico BREACH para simulação de brecha e hidrograma de ruptura em barragens de terra com simulação computacional realizada por meio do HEC-RAS, no qual a brecha é determinada em função do tipo de barragem por regressão ou com base em casos históricos sem avaliar as condições do local. O objeto de estudo é a barragem do Ribeirão Cipó, Poços de Caldas, Minas Gerais. Compara-se a diferença desses dois resultados àquelas encontradas entre o próprio BREACH e Equações empíricas em trabalhos prévios realizados em barragem hipotética. Apura-se a adequação do modelo físico como ferramenta de gestão de situações de segurança em barragens. São utilizados padrões geotécnicos do maciço do barramento: ângulo de atrito, granulometria média e peso específico. É considerada a cobertura de grama do talude de jusante e falha apenas por galgamento. Verificou-se que o BREACH resultou em vazão de pico de 4.385,20 m<sup>3</sup>/s, comparado com 1.386 m<sup>3</sup>/s do HEC-RAS. As configurações das brechas mostraram diferenças no que tange a largura, sendo essa, para o BREACH e para o HEC-RAS respectivamente: 40,82 m e 78,00 m; com inclinações das laterais de 60,5° e 45°; tempos de ruptura de 216,00 e 30,00 min. Em função da diferença apresentada pelos dois métodos, postula-se que o modelo BREACH se posiciona como ferramenta de gestão complementar válida para casos específicos: nos quais as barragens são bem documentadas e não há a possibilidade de realização de simulações mais complexas.

**Palavras-chave:** Acidentes em barragens. Modelo físico. BREACH. Barragens de terra.



## ABSTRACT

Great size dams have associated risks under the optics of the possibility of failure and associated impact to the physical, biological and human environment part of the downstream areas. Thus, the evaluation of the range of those impacts through dam break studies are fundamental tools, which studies must and developments must receive importance. This work aims to compare the use of the physical model BREACH in order to simulate the breach geometry and breach peak hydrograph with a previous made simulation using HEC-RAS. In the previous simulation, the breach was defined based on the dam type by statistically defined parameters deduced from data from previous dam breach occurrences. The study object is the Cipó dam, at Poços de Caldas, Minas Gerais. It is also briefly discussed the usage of BREACH as a management tool in the context of dam safety. Geotechnical parameters of the dam are used: friction angle, average unit weight and average grain size. It is considered failure through overtopping only. It was verified that the BREACH has given a peak outflow of 4.385,20 m<sup>3</sup>/s compared to the 1.386 m<sup>3</sup>/s on the HEC-RAS simulation. The breach configuration has shown differences on the width: on BREACH and HEC-RAS, we had respectively, 40,82 m and 78 m; with lateral slopes of 60,5° and 45°; dam failure time of 216,00 and 30,00 min. Given the difference in the results shown between the methodologies, the BREACH model is a complementary management tool valid to specific cases: well documented Earth dams where there is no possibility of development of more complex simulations.

**Keywords:** Earthen dam. Dam failure. BREACH. Physical model.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Barragem de Kebar próxima a Qum .....	28
Figura 2 Barragem de Tenton antes do rompimento. ....	32
Figura 3 Barragem de Tenton durante o rompimento .....	32
Figura 4 Barragem de Orós antes do rompimento.....	33
Figura 5 Barragem de Orós durante o rompimento.....	33
Figura 6 Análise de sensibilidade na definição dos parâmetros da brecha	34
Figura 7 Recomendação para dimensões de brecha .....	35
Figura 8 Brechas de rompimentos utilizadas no <i>Prediction of Embankment Dam Breach</i> .....	36
Figura 9 Perfil lateral de barragem com sequência conceitual de falha por galgamento .....	41
Figura 10 Vista frontal da brecha e sequência de formação.....	44
Figura 11 Vista frontal de barragem com brecha .....	45
Figura 12 Localização da Barragem do Cipó. Fonte: Google Earth.....	53
Figura 13 Visão em Planta da Barragem.....	53
Figura 14 Seção de maior altura.....	54
Figura 15 Parâmetro de Montante.....	54
Figura 16 Parâmetro de Jusante.....	54
Figura 17 Crista do barramento.....	55
Figura 18 Vertedor Perfil Creager.....	55
Figura 19 Curva CotaxÁreaxVolume.....	57
Figura 20 Quadro resumo ensaios de caracterização e compactação ....	58
Figura 21 Faixa de Distribuição Granulométrica .....	59
Figura 22 Curva de descarga .....	61
Figura 23 Relação Vazão x TR .....	62
Figura 24 Comparativo entre VMPs para a cobertura de grama .....	67
Figura 25 Hidrograma de ruptura BREACH.....	68
Figura 26 Resultado gráfico análise de sensibilidade parâmetro $c'$ .....	71
Figura 27 Resultado gráfico análise de sensibilidade parâmetro $b'$ .....	72





## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Falhas em barragens de 1975 a 2011 .....	30
Tabela 2 Modos e exemplos de falhas.....	31
Tabela 3 Recomendações acerca de brechas de ruptura em barragens	35
Tabela 4 - Síntese dos modelos de simulação de rompimento de barragens revisados.....	39
Tabela 5 Dados Geométricos .....	56
Tabela 6 Cota xÁrea xVolume .....	57
Tabela 7 Curva de descarga do vertedor .....	58
Tabela 8 Níveis de referência e parâmetros do reservatório .....	58
Tabela 9 Parâmetros Geológico-geotécnicos .....	59
Tabela 10 Vazões de amortecimento de cheias .....	60
Tabela 11 Detalhes do momento do galgamento .....	62
Tabela 12 Velocidade máxima permitida para coberturas em grama.....	63
Tabela 13 Parâmetros correspondentes aos estágios de rompimento....	64
Tabela 14 Parâmetros da análise de sensibilidade.....	66
Tabela 15 Características da brecha calculadas pelo BREACH e HEC- RAS .....	70
Tabela 16 Resultados análise de sensibilidade parâmetro $c'$ .....	71
Tabela 17 Resultados análise de sensibilidade parâmetro $b'$ .....	72
Tabela 18 Comparação BREACH e HEC-RAS .....	73



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas  
SNISB – Sistema Nacional de Informação em Segurança de Barragens  
USBR – *United States Bureau of Reclamation*  
UHE – Usina Hidrelétrica  
PAE – Plano de Ação Emergencial  
PCH – Pequena Central Hidrelétrica  
PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens  
PSB – Plano de Segurança de Barragens  
BREACH – *physically based mathematical model*  
DME – Departamento Municipal de Energia  
DME D – Departamento Municipal de Energia - Distribuição  
DNOCS – Departamento Nacional de Obras contra a Seca  
USACE – Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos (*United States of America Corps of Engineers*)  
SIG – Sistemas de Informação Geográfica  
VMP – Valor máximo permitido



## LISTA DE SÍMBOLOS

Organizada conforme ordem de aparecimento e referenciada a primeira vez que aparecem.

$B_{bre}$  Largura média da brecha na Tabela 3 ANA (2016).

$B_{barr}$  Largura média da barragem na Tabela 3 ANA (2016).

1V:ZH Referência as inclinações de taludes de uma barragem, V para vertical e H para horizontal na Tabela 3.

$t_{rot}$  tempo de ruptura em horas na Tabela 3 ANA (2016).

Qb Vazão pelo canal da brecha. Equação (1).

$B_0$  Largura instantânea do canal da brecha. Equação (1).

H Cota do reservatório em dado passo de cálculo. Equação (1).

Hc Cota do fundo da brecha. Equação (1).

q Vazão distribuída pelo tamanho da crista. Equação (2)

n' Coeficiente de Manning para canais revestidos em grama. Equação (3)

y Lâmina da água na entrada do canal da brecha. Equação (3)

v Velocidade atingida pelo escoamento contra a cobertura de grama. Equação (5).

A Seção transversal do canal de pipping. Equação (6).

L Comprimento do canal durante a simulação por pipping. Equação (6).

D Lâmina da água no canal de pipping. Equação (6).

f Fator de fricção de Darcy. Equação (6).

Hp Elevação da linha central do canal de pipping. Equação (6)

NR Número de Reynolds. Equação (7)

Hpu Elevação superior do canal de pipping. Equação (10).

$B_r$  Parâmetro variável em relação ao tipo de falha. Equação (11).

Hd Elevação da crista da barragem. Equação (12)

H'k Profundidade crítica do escoamento pela seção transversal da brecha. Equação (13)

$\phi$  Ângulo de atrito do material do maciço. Equação (13).

$\theta$  Ângulo que a parede externa da seção transversal da brecha faz com a horizontal no presente passo de cálculo. Equação (13).

$\gamma$  Peso específico do material do maciço. Equação (13)

k indicativo do estágio de rompimento da brecha. Equação (13).

Hk Lâmina da água instantânea no canal da brecha. Equação (14).

$B_{0m}$  Largura máxima do fundo da brecha. Equação (16).

$\alpha$  Ângulo que a parede interna da brecha faz com a horizontal. Equação (19).

$Q_i$  Vazão afluente. Equação (23).

$Q_{sp}$  Vazão efluente pelo vertedor. Equação (23).  
 $Q_0$  Vazão de galgamento sobre a barragem. Equação (23).  
 $\Delta H$  Diferença na elevação da superfície da água no intervalo  $\Delta t$ . Equação (24).  
 $\Delta t$  Passo de cálculo. Equação (24).  
 $H$  Elevação do reservatório em tempo  $t$ . Equação (25).  
 $H'$  Elevação do reservatório durante o passo de cálculo. Equação (25).  
 $S$  Declividade do talude de jusante. Equação (27).  
 $n$  Coeficiente de Manning. Equação (27).  
 $A$  área da seção transversal do canal da brecha. Equação (27).  
 $P$  O perímetro molhado do canal da brecha. Equação (27).  
 $D_{50}$  Granulometria média do material do maciço. Equação (28).  
 $y_n$  Altura da linha d'água no canal da brecha quando essa é retangular. Equação (29).  
 $y_n^{k+1}$  Altura da linha d'água no canal da brecha quando essa é trapezoidal. Equação (30).  
 $y_n^k$  Altura da lâmina d'água no canal da brecha quando essa é trapezoidal no passo de cálculo anterior. Equação (30).  
 $\frac{f(y_n^k)}{f'(y_n^k)}$  Razão entre a solução e a primeira derivada da equação (31). Equação (30).  
 $B$  Largura superior da seção transversal do canal da brecha quando essa se torna trapezoidal. Equação (33).  
 $Q_s$  Vazão de sedimento pela brecha. Equação (40).  
 $\Omega$  Componente do equacionamento da vazão de sedimento pela brecha variante para solos coesos e não coesos Equação (40).  
 $\tau_c$  Tensão de cisalhamento do material do maciço. Equação (41).  
 $PI$  Índice de plasticidade do material do maciço. Equação (42).  
 $b'$  Fator empírico dependente do tipo de solo. Equação (42).  
 $c'$  Fator empírico dependente do tipo de solo. Equação (42).  
 $a'$  Fator empírico dependente do tipo de solo. Equação (43).  
 $R^*$  Componente do cálculo da vazão de sedimento. Equação (50).  
 $Wcr$  Largura da crista do barramento. Tabela 5.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>27</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	27
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>27</b>
3.1	BREVE HISTÓRICO SOBRE FALHAS EM BARRAGENS 27	
3.2	MODELOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DE FALHAS EM BARRAGENS .....	36
3.3	MODELO BREACH .....	39
<b>3.3.1</b>	<b>Largura da Brecha .....</b>	<b>43</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Determinação do nível do reservatório .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Hidráulica do Canal da Brecha .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Transporte de Sedimento .....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>52</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	52
4.2	LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS .....	55
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO BREACH .....	60
<b>4.3.1</b>	<b>Estimativa da vazão de galgamento .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Proteção em grama do talude de jusante .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Vazão da brecha e mecanismos de controle de seu crescimento .....</b>	<b>64</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Hidráulica do Canal da Brecha .....</b>	<b>64</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Vazão de Sedimento .....</b>	<b>65</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Análise de Sensibilidade dos Parâmetros <math>b'</math> e <math>c'</math> .....</b>	<b>65</b>
<b>4.3.7</b>	<b>Hidrograma de rompimento e geometria da brecha .....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>67</b>
5.1	PROTEÇÃO EM GRAMA DO TALUDE DE JUSANTE... 67	
5.2	VAZÃO DE ROMPIMENTO .....	68
5.3	CARACTERÍSTICAS DA BRECHA .....	69



5.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS $c'$ e	
b'	71	
5.5	BREACH COMO FERRAMENTA DE GESTÃO .....	73
6	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO A – Lista de Projetos e Documentos Fornecidos</b>	
	<b>pela DMED .....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa avaliar a adequação do modelo físico BREACH, descrito por Fread (1988) para brechas em barragens de terra em comparação à previsão estatística desenvolvida no software do American Corps of Engineers, o HEC-RAS. A barragem objeto de estudo será a do Ribeirão Cipó em Poços de Caldas – MG.

Constituindo estruturas de grande porte e complexidade, as barragens demandam cuidados do ponto de vista de engenharia em todas as fases de seu ciclo de vida: do estudo de viabilidade, construção, operação e manutenção até o descomissionamento do reservatório. Grandes barragens, possuem riscos inerentes sob a ótica da possibilidade de rompimento e impacto associado aos meios físicos, biológicos e antrópicos componentes do vale de jusante. Dessa forma, os estudos desses danos potenciais, ou seja, os estudos de rompimento de barragens, bem como modelos de simulação dessa ocorrência se posicionam como ferramenta de gestão cujo desenvolvimento é fundamental.

Em decorrência de acidentes graves com barragens recentemente, as legislações acerca de segurança de barragens foram reforçadas e instrumentos de fiscalização relacionados à segurança foram introduzidos. O marco legal na segurança de barragens no Brasil é a Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. A Lei 12.334/2010 criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), cabendo à Agência Nacional de Águas (ANA) implantar e gerir o sistema, e promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores e coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens. A entidade outorgante das barragens fica responsável por fiscalizar a segurança das barragens, bem como por manter o cadastro atualizado dessas barragens com identificação dos empreendedores, para fins de incorporação ao SNISB.

Um dos instrumentos da PNSB é o Plano de Segurança da Barragem (PSB) de implementação obrigatória pelo empreendedor, cujo objetivo é auxiliá-lo na gestão da segurança. Nesse contexto, evidencia-se a importância de ferramentas que venham a viabilizar a avaliação de riscos associados a acidentes em barragens.

Os modelos empíricos possibilitam o entendimento, resposta e simulação de um fenômeno por meio de hipóteses sobre seus

componentes, de modo a desenvolver trabalhos sem as consequências matemáticas de certos parâmetros. Em síntese, a modelagem empírica se pauta em dados experimentais, possivelmente em análises dos dados ou suposições inteligentes na forma de conjunto de equações ou explicações intuitivas, passíveis de utilização de forma matemática e com dados convenientes (SODRÉ, 2007).

Dessa forma, a utilização de um modelo físico favorece a simplicidade da simulação e do estudo do fenômeno a partir do momento que se vale de dados físicos que, no caso de barragens, muitas vezes estão disponíveis a nível de projeto ou monitoramento do empreendimento. Em um contexto de garantia de segurança, a utilização desses modelos aumenta o leque de possibilidades de verificação de possíveis consequências resultantes de acidentes, uma vez que viabilizam de forma simples uma estimativa dos impactos ou seus causadores.

A nível de Plano de Segurança de Barragem, o padrão se situa na realização de simulações computacionais para previsão da vazão de ruptura, com a brecha determinada em função do tipo de barragem, por regressão ou com base em casos históricos sem avaliar as condições locais da barragem, e abrangência da mancha de inundação resultante. Embora, a depender da qualidade dos dados de entrada, esses modelos tenham resultados factíveis, constituem estudos longos e simulações onerosas que levam semanas para serem realizadas. Nesse contexto, uma simulação mais rápida e relativamente confiável pode subsidiar uma tomada de decisão mais expedita, além de fornecer informação adicional para os estudos relativos a rompimento de barragens, planos de segurança e medidas corretivas. Portanto, o modelo BREACH, descrito por Fread (1988) se apresenta como uma possibilidade de avaliar e reiterar a eficácia de modelos estatísticos e empíricos aplicados a estudos de rompimento de barragens. Aliado a ferramentas como o HEC-RAS, por exemplo, o BREACH possui a capacidade de representar ferramenta auxiliar.

No presente trabalho, valeu-se do modelo físico descrito por Fread (1988), chamado de BREACH, em detrimento de simulação executada pelo HEC-RAS como forma de avaliar sua adequabilidade como ferramenta de comparação, gestão e tomada de decisão no contexto de segurança de barragens. A análise será restrita a barragens de terra e será simulada ruptura por galgamento.

A simulação no HEC-RAS considera apenas a geometria do barramento, não fazendo distinção quanto ao material, de forma a ser possível simular barragens de terra, concreto ou alvenaria. A brecha no caso de estudos de rompimento é definida pelo operado por meio de suas características geométricas: altura, largura, inclinação das laterais. No

caso do estudo utilizado como comparativo, foram usados parâmetros definidos pela Agência Nacional de Águas, os quais serão expostos mais adiante. Esses parâmetros são definidos com base em regressões, trabalhos estatísticos e/ou empíricos ao redor de dados de rompimentos reais, tratam-se, portanto de generalizações não levando em conta o contexto específico da barragem estudada para além de seu material construtivo.

Os parâmetros geotécnicos e geométricos necessários às simulações, no contexto da Barragem do Cipó, foram coletados dos documentos de projeto cedidos pela DME Distribuição.

## **2 OBJETIVOS**

Pretende-se avaliar a formação de brechas e o hidrograma de ruptura em barragens de terra por meio do modelo empírico proposto por FREAD (1989). A adequação dos resultados obtidos será feita por comparação com simulação previamente realizada no software HEC-RAS e disponível no Plano de Ação Emergencial (ENGEVIX, 2017) da barragem, cedido pela DMED. O objeto de estudo será a barragem do Cipó, em Poços de Caldas, Minas Gerais.

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar os resultados do modelo BREACH de FREAD (1989) em simular brechas e hidrograma de ruptura para barragens de terra com estudo de caso na barragem do Cipó em Minas Gerais.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Comparação de resultados do modelo BREACH com simulação computacional previamente realizada em HEC-RAS.
- Avaliar a possibilidade de utilização do BREACH como ferramenta de gestão e tomada de decisão para situações de emergência.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE FALHAS EM BARRAGENS**

De acordo com Jansen (1983), as primeiras barragens das quais se tem vestígio se situam no Egito e datam de entre 2600 A.C. a 2900 A.C.. Em geral, os empreendimentos desse tipo eram construídos de pedra e

pouco protegidos contra enchentes. Até 1850 existiam poucos critérios racionais para o projeto de barragens.

Singh (1996) pontua que os romanos construíram barragens de alvenaria dentre as quais ainda há exemplares em uso. Uma das barragens de arco mais antigas no mundo se situa no rio Kebar e data aproximadamente de 1300 D.C. e está à aproximadamente 24 km ao sul da cidade de Qum no Irã. Ela possui por volta de 26 metros de altura e 55 m de comprimento e é feita em arco encaixada nos cânions do vale. O referido barramento está exposto em foto na Figura 1.

Figura 1 Barragem de Kebar próxima a Qum



Fonte: Panoramio (2015).

Segundo Jansen (1983), a ascensão das máquinas construtivas foi determinante para o aumento da construção de barramentos e de suas alturas, o que resultou em empreendimentos com maciços de alturas sem precedentes, tais quais: Oroville (Estados Unidos, 1969, 230 metros), Mica (Canadá, 1973, 242 metros) e Nurek (Rússia, 1980, 300 metros), todas barragens de terra.

Em suma, até o ano de 1800 quase todas as barragens eram de aterro. Contudo, no século XIX, barramentos de concreto ganharam popularidade em função de avanços na tecnologia do concreto, o que resultou em um maior número desse tipo de empreendimento quando comparado aos de terra e enrocamento na virada do século. Todavia, mais de 80% das grandes barragens construídas recentemente são de aterro (SINGH, 2013).

Singh (2013) caracteriza como inquestionáveis os benefícios das barragens para a humanidade. Postula ainda que o papel desse tipo de

construção evoluiu da acumulação de água para fins de irrigação, vital na produção agrícola, para transportes hidroviários e processos industriais até no início do século XX, em que ganha ímpeto a utilização de barragens para fins de geração de energia elétrica.

Barragens são classificadas de formas diferentes, a depender de seu tamanho, material construtivo, forma, propósito e dano potencial associado. As três primeiras formas de classificação são as mais comuns (SINGH, 2013).

No que concerne ao tipo de material construtivo, os empreendimentos podem ser de terra homogênea ou zoneada, enrocamento, alvenaria e concreto. É importante enfatizar que algumas são construídas com combinações desses materiais, outras chegam a conter matéria-prima alternativa como madeira, asfalto e membranas sintéticas.

A adequabilidade de uma barragem em particular a determinado contexto tende a ser primariamente relacionada às características geológicas e topográficas (SINGH, 2013). Cada tipo possui vantagens e desvantagens dentro de determinado contexto.

Segundo o mesmo autor, barragens de terra são capazes de suportar esforços substanciais, porém possuem resistência a cheias relativamente baixas e tendem a desenvolver recalques que favorecem fluxo interno. Por outro lado, estruturas de concreto podem aguentar galgamentos desde que suas fundações resistam ao choque inicial. Barragens em arco aguentam grandes cargas, porém sua integridade é função da força de seus pilares. Barragens de gravidade são duráveis e potencialmente capazes de sobreviver a intempéries e deficiências operacionais, entretanto, sua durabilidade é passível de diminuição em função da suscetibilidade dos materiais de sua fundação ao deslizamento (SINGH, 2013).

As brechas em barragens são resultado de falhas. Esse tipo de empreendimento está suscetível a decadência o que, com o tempo, pode torná-los perigosos. As falhas são inevitáveis. Embora o progresso tecnológico no setor seja contínuo, barragens continuam a falhar (SINGH, 2013).

Singh (2013) elenca a variedade de razões capazes de fazer com que uma barragem falhe, possibilidade especialmente verdadeira para construções mais antigas, as quais tendem a não terem sido projetadas ou construídas sob critérios e diretrizes atuais. No caso das barragens de terra, o projeto e sua análise são governados principalmente pelas propriedades de engenharia de seus materiais componentes, a geologia e topografia do local, seu clima, regime hidrológico e sísmico.

O autor ainda discute que, embora os padrões de projeto para barragens de terra demandem estabilidade do maciço e de sua fundação sob todas as condições postuladas - entre as quais encontram-se enchentes e terremotos; controle de fluxo e pressão no maciço; proteção contra galgamento; controle de erosão da superfície do maciço - na prática esses critérios não são integralmente respeitados, o que leva a falha desses empreendimentos.

Barragens são passíveis de falha de forma gradual ou instantânea. O tipo dessa ocorrência depende de sua causa e do empreendimento em si. Quando uma barragem falha de forma abrupta, assume-se a remoção de grande parte da estrutura ou dela completa. Essa liberação súbita de água resulta em onda que se propaga à jusante.

Barragens de terra estão sujeitas a falhas tanto por galgamento quanto por infiltração interna (*pipping*) que consiste na abertura de uma brecha através da barragem em função da erosão gradual resultado de percolação de água pelo maciço. A brecha formada tende a possuir largura menor do que a da própria barragem para maciços compostos de terra e enrocamento (FREAD, 1988). A ASDSO (Association of Dam Safety Officials) levantou as principais causas de falhas de barragens de 1975 a 2011 expostas na Tabela 1.

Tabela 1 Falhas em barragens de 1975 a 2011

Causa da Falha	Ocorrências	Percentual
Inundação ou Galgamento	465	70,9%
Piping ou infiltração	94	14,3%
Estrutural	12	1,8%
Humana	4	0,6%
Atividade Animal	7	1,1%
Vertedor	11	1,7%
Escorregamento/instabilidade	13	2,0%
Desconhecido	32	4,9%
Outro	18	2,7%
Total	656	100,0%

Fonte: ASDSO, 2011.

A causa mais comum de falhas em barragens (85,2%), entre 1975 e 2011, foi devido a inundações com galgamento e a *piping* (erosão interna). Na Tabela 2 são apresentados os principais modos de falha e os principais exemplos de falha.

Tabela 2 Modos e exemplos de falhas

Modo de Falha	Exemplo de Falha	
Hidrológica	Galgamento causado por: Vertedor com capacidade de descarga inadequada Vertedor obstruído	
	Assoreamento do reservatório Sobrecarga das estruturas	
	Erosão na superfície causada por: Alta Velocidade do escoamento Ação de ondas	
	Geológica	Piping e erosão interna causada por: Rachaduras internas, fratura hidráulica ou assentamento diferencial Filtros inadequados
		Falha na tubulação de saída Piping através do aterro formado por raízes ou tocas de animais/insetos Instabilidade do talude e faturamento hidráulico: A carga excede a resistência ao deslizamento na base ou nas juntas da estrutura
		Estrutural
Sísmica		
Causa Humana	Falha de operação: Aumento repentino do nível do reservatório o que causa fluxo através de rachaduras transversais no aterro Incidentes incluindo falhas em comportas, interrupção de energia etc. Sabotagem: Falha de operação Proposital Impacto do objeto que remove parte da crista da barragem	

Fonte: ASDSO, 2011

Casos históricos fornecem informações valiosas para a identificação dos modos de falha e da evolução da formação das brechas ao longo do tempo de ruptura. Essas informações fomentam os meios para



a conceitualização e especificação dos fatos que levaram as barragens a falhar.

Dentre os acidentes em barragens de aterro bem documentados está o da barragem de Teton em Idaho, nos Estados Unidos. Projetada pelo Bureau of Reclamation para o controle de cheias e produção de energia, foi construída entre os anos de 1972 e 1975, de enrocamento zoneada com 93m de altura e 945 m de crista. No ano de 1976 a barragem entrou em colapso levando à morte de 11 pessoas e a danos da ordem de 400 milhões de dólares. O colapso foi devido à infiltração pela fundação da barragem que evoluiu para erosão interna (*piping*), levando ao colapso da ombreira esquerda. As Figura 2 e 3 apresentam fotografias de antes e durante o rompimento.

Figura 2 Barragem de Teton antes do rompimento.



Fonte: Gee (2010)

Figura 3 Barragem de Teton durante o rompimento



Fonte: Gee (2010).

Gee (2010) faz referência a um dos acidentes em barragens de aterro brasileiras mais bem documentados, da barragem de Orós. O empreendimento, localizado no estado do Ceará, foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra a Seca (DNOCS) com objetivo de regularização do rio Jaguaripe. Em 1960, durante a construção, uma cheia resultou no galgamento do maciço e sua erosão. A Figura 4 e 5 exibem fotos do empreendimento antes e durante o ocorrido, respectivamente.

Figura 4 Barragem de Orós antes do rompimento



Fonte: Gee (2010)

Figura 5 Barragem de Orós durante o rompimento



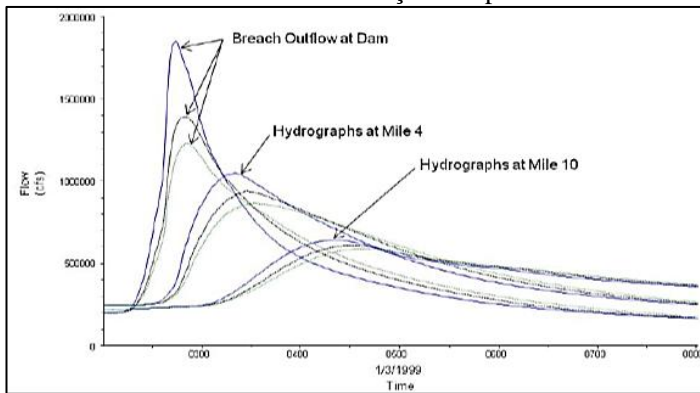
Fonte: Gee (2010)

### 3.2 DEFINIÇÃO DA BRECHA EM ESTUDOS DE RUPTURA

Foram desenvolvidas várias regressões para a determinação dos parâmetros da brecha e das vazões de pico. O USBR (1989) propõe que a largura da brecha  $L_b$  para barragens de aterro seja um valor entre uma a três vezes a altura da barragem. A ANA (2016) propõe que a largura da brecha  $L_b$  para barragens de aterro seja um valor entre uma a cinco vezes a altura da barragem.

De acordo com USACE (2014), a brecha de ruptura é comumente definida em função do material que constitui a barragem, usualmente considerada com o formato trapezoidal nas simulações de ruptura hipotética. A determinação das características da brecha tem influência direta sobre as demais etapas do estudo. A Figura 6 ilustra três hidrogramas definidos para a mesma barragem com pequenas variações nos parâmetros da brecha.

Figura 6 Análise de sensibilidade na definição dos parâmetros da brecha

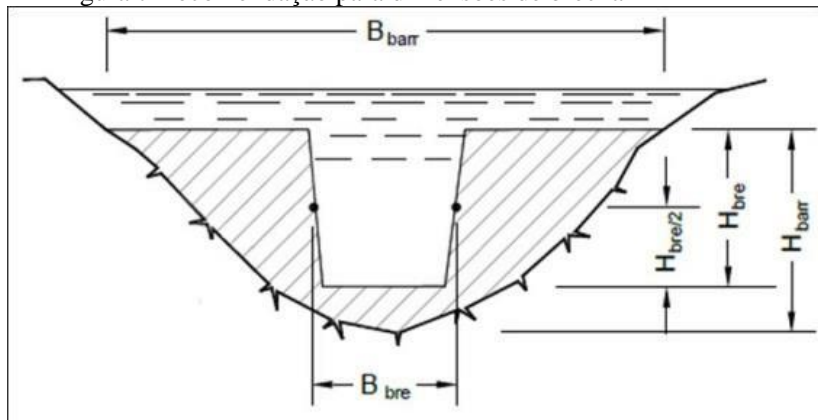


Fonte: USACE (2014)

Pode-se notar que estas pequenas variações produzem resultados bem diferentes na magnitude do pico de vazão, porém todos os hidrogramas tem o mesmo volume de água. Nesse exemplo, em 4 milhas (6,5 km) e em 10 milhas (16 km) o pico dos hidrogramas é quase o mesmo; assim que os hidrogramas se movem para jusante os valores de vazão convergem. Essa convergência depende de vários fatores, como a declividade do vale, a rugosidade, o volume da planície de inundação, entre outros. A ANA (2016) recomenda que seja adotada uma metodologia simplificada para definição das dimensões da brecha e do

tempo de ruptura. As recomendações são reproduzidas na Figura 7 e na Tabela 3.

Figura 7 Recomendação para dimensões de brecha



Fonte: ANA (2016)

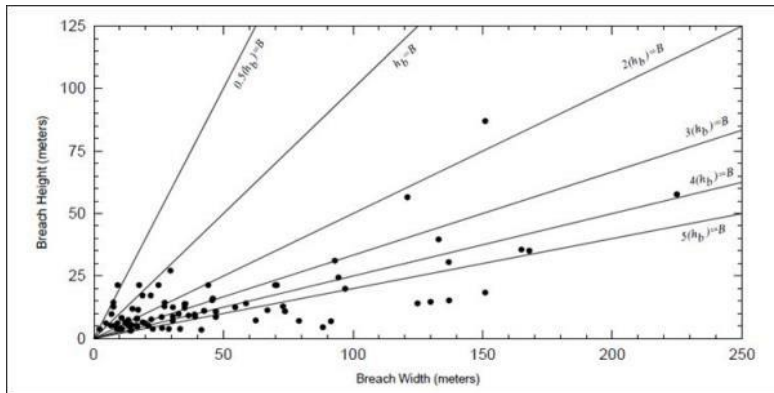
Tabela 3 Recomendações acerca de brechas de ruptura em barragens

Tipo de Barragem	Largura Média da Brecha ( $B_{bre}$ )	Componente horizontal da inclinação dos taludes da brecha (1V:ZH)	Tempo de Ruptura ( $t_{rot}$ ) (horas)
Concreto em Arco	Todo o desenvolvimento da barragem $B_{bre} \geq 0,8B_{barr}$	$0 \leq Z$ $\leq$ Inclinação do vale	$t_{rot} \leq 0,1$
Concreto Gravidade	Um múltiplo de vários blocos, sendo usualmente $B_{bre} \leq 0,5B_{barr}$	$Z = 0$	$0,1 \leq t_{rot} = 0,1$
Enrocamento ou Solo	$H_{barr} < B_{bre} < 5H_{barr}$	1	$0,5 \leq t_{rot} = 3$
Barragem de Rejeito	$B_{bre} \geq 0,8B_{barr}$	$\frac{4 \leq Z \leq 1}{1 \leq Z \leq 2}$	$0,1 \leq t_{rot} = 0,1$

Fonte: ANA (2016)

Essa recomendação é uma simplificação do USBR (1998), em que foram analisados os dados de rompimentos documentados de 108 barragens de enrocamento com núcleo argiloso e/ou terra, apresentados na Figura 8. Pode-se notar que há uma grande dispersão entre largura e altura da brecha, o que evidencia a dificuldade em se obter uma função.

Figura 8 Brechas de rompimentos utilizadas no *Prediction of Embankment Dam Breach*



Fonte: USBR (1998)

### 3.3 MODELOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DE FALHAS EM BARRAGENS

Modelos empíricos focados no estudo da vazão de ruptura de barragens, na forma da brecha e processo de formação foram objeto de estudo ao longo dos anos. O primeiro foi Cristofano (1965), que derivou equação que relacionava a força da água pela brecha com o atrito das partículas de solo em seu fundo e, dessa forma, desenvolveu a taxa de erosão do canal da brecha como função da taxa de variação da vazão por ela. O autor assumiu que a largura de fundo da brecha era constante com o tempo e sempre possuía seção com forma trapezoidal, cujos ângulos das laterais eram determinados pelo ângulo de repouso do material da brecha e a declividade do fundo do canal igual ao ângulo de atrito do material. Ainda se valia de um coeficiente empírico, crítico para a funcionalidade do modelo.

Já Harris e Wagner (1967) utilizaram a equação de transporte de sedimento de Scoklitsch e consideraram que a progressão da brecha se iniciava para baixo imediatamente depois do galgamento e sua erosão ocorre de cima para baixo. Brown e Rogers (1977) apresentaram modelo pautado no trabalho de Harris e Wagner.

Ponce e Tsivoglou (1981) apresentaram modelo de erosão computacionalmente complexo, que unia a equação de transporte de sedimento de Meyer-Peter e Muller com equações diferenciais de uma dimensão para conservação de sedimento e fluxo turbulento. A sequência de equações diferenciais era resolvida por diferenças finitas. A resistência ao escoamento era representada por meio do coeficiente de Manning. A largura da brecha era relacionada empiricamente com a vazão. Assumia-se a

ocorrência de um canal no início do rompimento, no caminho da vazão. A erosão progredia de modo a aumentar as dimensões desse canal inicial o que também ocorria com vazão e taxa de erosão.

O modelo de Fread (1988) surge em sequência aos supracitados e difere do modelo de Cristofano (1965) e Harris e Wagner (1967) pela utilização de algoritmo de transporte de sedimento; do método utilizado para definir as mudanças sofridas pela brecha ao longo do rompimento; o atraso na erosão da brecha para baixo até que a face de jusante tenha sido erodida suficientemente; a introdução do mecanismo de colapsos abruptos na mecânica do alargamento da brecha; e na possibilidade de simulação de uma falha por pipping. O autor ainda cita similaridades no que concerne a simplicidade do modelo, a utilização da granulometria média e do ângulo de atrito interno como parâmetros geotécnicos e o fato de que se assumiu condições de fluxo uniforme quasi-laminar.

Quando comparado ao trabalho de Ponce e Tsvoglou (1981), o modelo BREACH de Fread (1988) difere pela utilização de algoritmo de transporte de sedimento; quanto ao método utilizado para definir as mudanças sofridas pela brecha ao longo do rompimento; o atraso na erosão da brecha para baixo até que a face de jusante tenha sido erodida suficientemente; a introdução do mecanismo de colapsos abruptos na mecânica do alargamento da brecha; a possibilidade de simulação de uma falha por pipping; a utilização de um algoritmo computacional muito mais simples; o uso do ângulo de atrito; a utilização de  $D_{50}$  para a determinação do coeficiente de Manning, além de levar em conta vertedores em barragens antrópicas. A nível de similaridade, cita-se o desenvolvimento gradual do canal da brecha ao longo do parâmetro de jusante antes de sua erosão vertical pela crista; o uso de coeficiente de atrito de Manning na hidráulica da brecha; na forma em que a hidráulica do reservatório é incluída no desenvolvimento da brecha (FREAD, 1988).

Walder e O'Connor (1997) realizaram estudo acerca dos métodos de previsão da vazão de pico resultante de falha de barragens de terra naturais e construídas. Os autores revisam relações estatísticas, derivadas de dados de rompimentos de barragens tanto construídas quanto naturais, levando em conta vazão de pico, volume perdido e queda no nível de água do reservatório. Concluem para esse caso que tais relações são limitadas em função de falharem ao considerar os efeitos resultantes da taxa da formação da brecha. Em seguida, Walder e O'Connor (1996) estudam a utilização de modelos empíricos e enfatizam que a formação do hidrograma de ruptura está intimamente conectado com a taxa de erosão da brecha, a velocidade de sua formação e o tamanho do reservatório. Postulam por fim como viável a utilização de modelos físicos no que concerne a estimativa do hidrograma de ruptura e características da brecha de forma rápida e relativamente precisa,

desde que conhecidos ou estimáveis o volume e níveis de água do reservatório.

Macchhione (2008) propõe modelo empírico que, segundo o autor, prevê de forma simples, porém fisicamente embasada, tanto o hidrograma efluente quanto o desenvolvimento da brecha. O modelo considera os seguintes aspectos: geometria do barramento, a forma do reservatório, as características hidráulicas da vazão pela brecha e sua capacidade erosiva, bem como seu formato. O autor dá ênfase que o modelo fornece bons resultados para 12 falhas de barragem de aterro com três magnitudes distintas de descargas.

Welming Wu (2013) desenvolve modelo empírico para simular o rompimento de barragens de aterro de maciço homogêneo para falhas por galgamento e pipping. Postula que a brecha causada por galgamento é aproximada por um vertedor de soleira espessa com seção trapezoidal, conectada a jusante por uma queda e um talude para barramentos homogêneos coesos e não coesos, respectivamente. Reitera que no caso de barragens com núcleo de argila, as laterais da brecha são dois taludes logo depois do núcleo exposto. O autor propõe que a brecha por pipping é aproximada para um cano reto com seção retangular até que o topo do cano colapse e a modelagem procede como a de galgamento. O transporte de sedimento é considerado, bem como suas mudanças para a seção reta no topo da brecha e dentro do cano de pipping por meio de modelos de transporte de sedimento não-equilibrados com carga total. A estabilidade dos taludes laterais da brecha é analisada por meio da compilação de forças. Considera ainda que a declividade é definida como a média com inclinação mais íngreme. O modelo foi testado em 50 conjuntos de dados laboratoriais e estudos de caso de campo.

A Tabela 4 sintetiza os modelos supracitados usando como referência seus respectivos autores e ano, associado a seu tipo e indicação de terem sido derivados de outro trabalho, elenca ainda, suas características principais.

Tabela 4 - Síntese dos modelos de simulação de rompimento de barragens revisados

Modelo	Tipo	Derivado de outro modelo	Características
Cristofano (1965)	Físico	Não	Relacionava a força da água pela brecha e o atrito das partículas no seu fundo; Brecha trapezoidal.
Harris e Wagner (1967)	Físico	Não	Equação de transporte de sedimento de Skoklitsch;
Bower e Rogers (1977)	Empírico	Pautado em Harris e Wagner (1967)	Utilizou como estudo de caso a falha da barragem de Teton.
Ponce e Tsivoglou (1981)	Físico	Não	Computacionalmente complexo; Equações de transporte de sedimento e diferenciais.
Fread (1988)	Físico	Não	Algoritmo de transporte de sedimento; do método utilizado para definir as mudanças sofridas pela brecha ao longo do rompimento;
Walder e O'Connor (1997)	Estatístico	Não	Relações estatísticas; Não considera os efeitos da taxa de formação da brecha.
Macchione (2008)	Físico	Não	Considera geometria do barramento, a forma do reservatório, as características hidráulicas da vazão pela brecha e suas características;
Welming Wu (2013)	Empírico	Não	Simula falhas por galgamento e erosão interna, aproximando-os, respectivamente, a vertedor de soleira livre e conduto forçado

### 3.4 MODELO BREACH

Fread (1988) formulou modelo matemático para a previsão do hidrograma de rompimento de uma brecha. Trata-se de modelo empírico baseado em princípios hidráulicos, transporte de sedimento, mecânica dos solos, nas propriedades geométricas e de material da barragem, além de características do reservatório, tais quais: volume de armazenamento, vertimento e contribuições variáveis com o tempo. A barragem simulada pode ser natural (resultado de desabamento) ou construída, diferença que não causa grandes variações na mecânica da formação da brecha. Por outro lado, o autor postula que a principal diferença no rompimento de barragens naturais e antrópicas se situa na escala: no caso barragens naturais tendem a ser maiores do que as maiores barragens antrópicas. As propriedades críticas do



material da barragem são o ângulo de fricção interna, coesão e granulometria média ( $D_{50}$ ).

O modelo proposto por Fread (1988) leva em conta parâmetros coletados de rompimentos de barragens, tais quais a relação largura-comprimento da brecha, tempo de sua formação e profundidade para a previsão do hidrograma.

O modelo apresenta vantagens em relação a outros de natureza distinta no contexto da aplicação e barragens construídas, em função do fato de que os parâmetros críticos considerados são passíveis de serem medidos ou estimados.

O modelo de erosão de brecha (BREACH, na sigla em inglês) simula a falha de barragens de terra como mostrado na Figura 9. A barragem pode ser homogênea ou consistir de dois materiais: uma zona externa com materiais de propriedades distintas (ângulo de atrito ( $\phi$ ), coesão (C), granulometria média ( $D_{50}$ ), peso específico ( $\gamma$ )) e núcleo com seus respectivos  $\phi$ , C,  $D_{50}$ . e  $\gamma$ .

Além disso, a face de jusante da barragem pode possuir as seguintes condições: cobertura por grama de comprimento específico, em bom ou mau estado; material idêntico à porção externa do barramento; material de granulometria maior que a parcela externa.

A geometria do parâmetro de jusante é descrita por meio da altura do topo a barragem ( $H_u$ ) a elevação do fundo ( $H_l$ ) ou elevação original do corpo d'água, bem como a inclinação do talude 1(vertical):ZD (horizontal). Adicionalmente, a geometria da face montante é descrita pela inclinação do talude pelo parâmetro 1(vertical):ZU (horizontal).

Como a barragem estudada foi construída (em oposição à formada naturalmente), o modelo também prevê a largura da crista ( $W_{cr}$ ) e a curva de descarga do vertedor em sua crista.

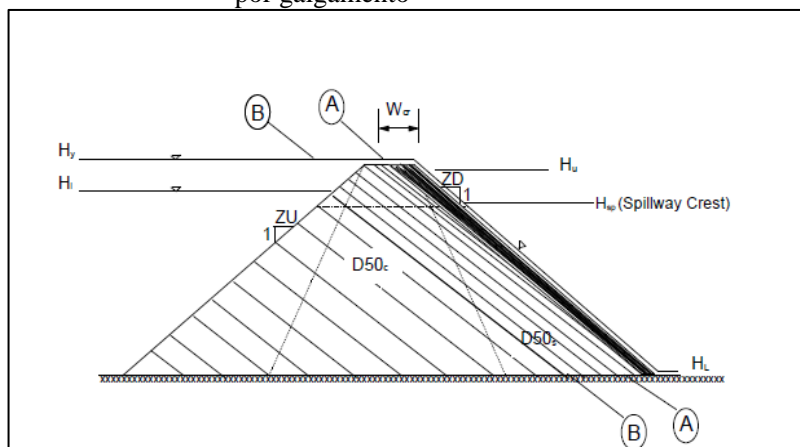
As características de armazenamento do reservatório são descritas por meio da relação entre a área do espelho d'água ( $S_a$ ) em acre-pé pelo nível d'água, a elevação inicial da superfície ( $H_i$ ) no começo da simulação e a relação de vazão efluente ( $Q_i$ ) do reservatório em pés cúbicos por segundo pela hora da ocorrência ( $T_i$ ).

No caso de falha por galgamento, o nível d'água (H) no reservatório deve exceder o do topo da barragem antes da ocorrência de erosão. Os primeiros estágios da erosão ocorrem inicialmente na face de jusante da barragem como delimitado pela linha A-A na Figura 9, na qual caso não exista cobertura por grama, assume-se a existência de um pequeno canal irregular nessa face. Um canal de erosão cuja profundidade depende da largura é gradualmente cavado na face de jusante. A vazão é determinada pela relação do vertedor de soleira espessa.

$$Q_b = 3 * B_0 * (H - H_c)^{1,5} \quad (1)$$

Na qual  $Q_b$  é a vazão no canal da brecha,  $B_0$  a largura instantânea do canal inicialmente retangular, e  $H_c$  a elevação do fundo da brecha. A medida que a brecha erode na face jusante da barragem, a elevação do fundo ( $H_c$ ) tende a elevação de topo da barragem ( $H_u$ ), e o ponto mais a montante do canal da brecha se move ao longo da crista da barragem em direção à jusante. Quando o fundo do canal de erosão atinge a linha B-B na Figura 9, o fundo da brecha ( $H_c$ ) começa a erodir verticalmente para baixo. O fundo da brecha continua até atingir a elevação de fundo da barragem  $H_l$ .

Figura 9 Perfil lateral de barragem com sequência conceitual de falha por galgamento



Fonte: Fread (1988)

Se a face de jusante da barragem (linha A-A na Figura 9) possui cobertura em grama, a velocidade ( $v$ ) da vazão de galgamento ao longo do parâmetro de jusante com grama é computado a cada variação de tempo por meio da equação de Manning. Essa velocidade é comparada com uma velocidade máxima permitida (VMP) de canais em grama. Para falhas por pipping e galgamento, a erosão se inicia quando a velocidade excede a permissível. Nesse momento, um canal com dimensões na proporção de 1 de profundidade por dois de largura é criado instantaneamente na face de jusante. A erosão interna a esse canal

continua caso não exista cobertura de grama. A velocidade ao longo da face de jusante ( $v$ ) é calculada da seguinte forma:

$$q = 3*(H - H_c)1.5 \quad (2)$$

$$y = \left[ \frac{qn'}{1,49*\left(\frac{1}{ZD}\right)^{0,5}} \right]^{0,6} \quad (3)$$

$$n' = a*q b \quad (4)$$

$$v = q/y \quad (5)$$

Na qual  $q$  é a vazão em pés pelo tamanho da crista,  $(H - H_c)$  é a pressão hidrostática (pés) sobre a crista,  $n'$  o coeficiente de Manning para canais revestidos em grama,  $a$  e  $b$  são coeficientes necessários para representar de forma matemática as curvas fornecidas em Chow (1959).

Se a simulação considera rompimento por *pipping*, o nível de água ( $H$ ) no reservatório deve ser maior que a elevação da linha central ( $H_p$ ) do canal inicialmente retangular antes que seu tamanho aumente por meio de erosão. O fundo do canal é erodido verticalmente para baixo ao passo que seu topo erode na mesma taxa verticalmente para cima. O fluxo no canal é controlado pela vazão em orifícios.

$$Q_b = A [2g(H - H_p)/(1 + fL/D)]^{0.5} \quad (6)$$

Na qual  $Q_b$  é a vazão em pés cúbicos por segundo pelo canal,  $g$  a aceleração da gravidade constante,  $A$  seção transversal (pés<sup>2</sup>) do canal ( $H-H_p$ ) é a pressão hidrostática (pés) no canal de pipping,  $L$  seu comprimento (pés),  $D$  seu diâmetro ou largura (pés), e  $f$  o fator de fricção de Darcy, calculado pela seguinte representação matemática das curvas de Moody

$$f = 64/NR \quad NR < 2000 \quad (7)$$

$$f = 0,105 \left( \frac{D_{50}}{D} \right)^{0,167} NR \geq 2000 \quad (8)$$

$$NR = 83333 Q_b D/A \quad (9)$$

Na qual  $f$  é o fator de fricção de Darcy e  $Nr$  o número de Reynolds. A medida que a elevação superior ( $H_{pu}$ ) do canal de pipping erode verticalmente para cima, alcança-se um ponto no qual a vazão muda e deixa de ser representada por um orifício e se aproxima de um vertedor, quando a carga no canal é menor que seu diâmetro. Assume-se que a transição ocorre quando a seguinte desigualdade é satisfeita:

$$H < H_p + 2(H_{pu} - H_p) \quad (10)$$

A vazão de vertimento é regida pela Eq. (1) no qual o  $H_c$  é equivalente a elevação de fundo do conduto (conduto formado durante a erosão interna), e  $B_0$  é a largura do canal de pipping no instante da transição. Ao atingir o instante da transição entre orifício e vertedor, o material remanescente sobre o canal e abaixo da crista da barragem colapsa e é transportado pelo canal da brecha na atual taxa de transporte de sedimentos antes que mais erosão ocorra. A erosão então progride ao corte de um canal paralelo para e ao longo da face de jusante entre a elevação de fundo e o fundo do canal de *pipping*. O processo erosivo remanescente é descrito pela falha por galgamento em uma posição similar a linha A-A na Figura 9.

### 3.4.1 Largura da Brecha

O método para determinar a largura da brecha no canal é um componente crítico de qualquer modelo de brecha. Neste modelo, a largura é dinamicamente controlada por dois mecanismos. O primeiro assume que ela possui inicialmente formato retangular como mostrado na Figura 10. A largura da brecha ( $B_0$ ) é governada pela seguinte relação:

$$B_0 = B_r y \quad (11)$$

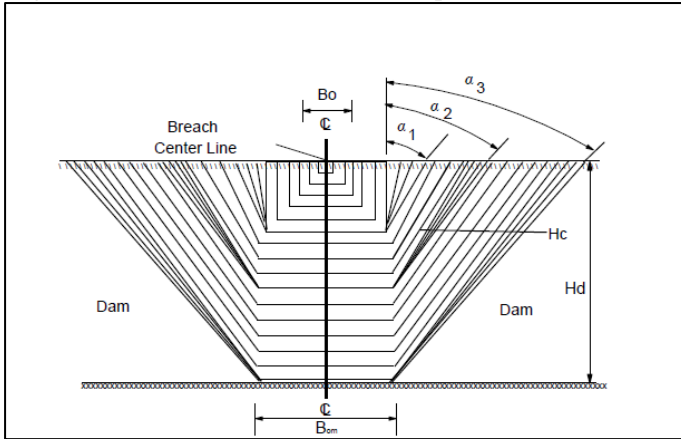
Na qual  $B_r$  é um fator baseado na eficiência hidráulica do canal e  $y$  sua profundidade. O parâmetro  $B_r$  tem valor igual a 2 para galgamento e 1 para falhas por pipping. O modelo assume que  $y$  é a profundidade crítica na entrada do canal da brecha:

$$y = 2/3(H_d - H_c) \quad (12)$$

O segundo mecanismo que controla a largura da brecha deriva da estabilidade de taludes de solo (Spangler, 1951). A forma inicialmente

retangular transforma-se em trapezoidal à medida que as laterais colapsam e formam um ângulo ( $\alpha$ ) com a vertical.

Figura 10 Vista frontal da brecha e sequência de formação



Fonte: Fread (1988)

O colapso ocorre quando a profundidade da brecha ( $H'_c$ ) atinge a profundidade crítica ( $H'$ ), que é função das propriedades do material: ângulo de atrito, coesão e peso específico.

$$H'_k = \frac{4 C \cos \phi \operatorname{sen} \theta'_{k-1}}{\gamma [1 - \cos (\theta'_{k-1} - \phi)]} \quad k = 1, 2, 3. \quad (13)$$

Na qual o  $k$  denota uma das três condições de colapso sucessivas exibidas na Figura 10 e  $\theta$  é o ângulo da lateral do canal da brecha com a horizontal exibido na Figura 11. Portanto, os ângulos ( $\theta$ ) ou ( $\alpha$ ) a qualquer momento são dados por:

$$\theta = \theta'_{k-1} \quad \text{para } H_k \leq H'_k \quad (14)$$

$$\theta = \theta'_k \quad \text{para } H_k > H'_k \quad (15)$$

$$B_o = B_r \quad \text{para } k = 1 \quad (16)$$

$$B_o = B_{om} \quad \text{para } k > 1 \quad (17)$$

$$B_{om} = B_r \quad \text{quando } H_1 = H'_1 \quad (18)$$

$$\alpha = 0.5\pi \theta \quad (19)$$

Nas quais:

$$\theta'_0 = 0.5\pi \quad (20)$$

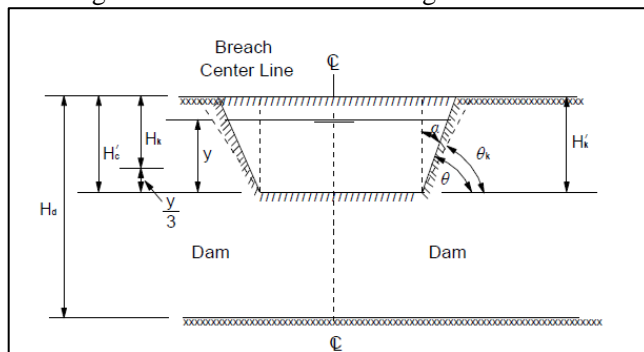
$$\theta'_k = (\theta'_{k-1} + \phi) / 2 \quad \text{para } k=1,2,3 \quad (21)$$

$$H_k = H'_{c-y} / 3 \quad (22)$$

O  $k$  aumenta em 1 quando  $H_k > H'_k$  na Eq. (22), o termo  $y/3$  é subtraído de  $H'_c$ . Na Eq. (22) o termo  $y/3$  é subtraído de  $H'_c$  para fornecer a carga efetiva na qual a influência de suporte da água na estabilidade dos taludes laterais é levada em conta. Por meio desse mecanismo, é possível que a brecha se alargue depois que a vazão de pico passe pela brecha, já que a profundidade ( $y$ ) diminui após a vazão máxima.

Assume-se ocorrência de erosão de forma igualitária ao longo do fundo e nas laterais do canal da brecha, a não ser quando as laterais do canal colapsam. A partir daí o fundo da brecha é considerado que a erosão para baixo é interrompida.

Figura 11 Vista frontal de barragem com brecha



Fonte: Fread (1988)

Quando a brecha erodir à cota original do vale, erosão posterior não é admitida pelo modelo. A ocorrência da vazão de pico pode coincidir com o fundo da brecha atingir o vale ou algum tempo depois dessa. A descarga máxima pela brecha depende da sua taxa de crescimento por

erosão e a taxa de decréscimo do nível do reservatório como resultado do aumento da vazão causada pelo alargamento da brecha. O modelo permite uma largura máxima do fundo e topo da brecha na crista da barragem a serem definidas durante o processamento. Esses limites referem-se as elevações topográficas assumidas como não erodíveis.

### 3.4.2 Determinação do nível do reservatório

Utiliza-se princípios de conservação de massa para computar a mudança de elevação no reservatório (H) em função da influência da vazão afluente ( $Q_i$ ), da efluente de vertimento ( $Q_{sp}$ ), da efluente pela crista ( $Q_0$ ), pela brecha ( $Q_b$ ), e das características de armazenamento do reservatório. A conservação de massa por um tempo ( $\Delta t$ ) em horas é representado da seguinte forma.

$$Q_i - (Q_b + Q_{sp} + Q_0) = S_a = \frac{\Delta H \ 43560}{\Delta t \ 3600} \quad (23)$$

Na qual  $\Delta H$  representa a diferença na elevação da superfície da água no intervalo ( $\Delta t$ ) e  $S_a$  a área superficial para a elevação H. Todas as vazões são expressas em pés cúbicos por segundo. A divisão na equação expressa que a vazão é média pelo passo de tempo. Se rearranjarmos a equação supracitada temos a seguinte expressão para as mudanças na superfície do reservatório:

$$\Delta H = \frac{0,0826 \ \Delta t}{S_a} (Q_i - Q_b - Q_{sp} - Q_0) \quad (24)$$

A elevação do reservatório (H) em um tempo (t) pode ser facilmente obtida pela relação:

$$H = H' + \Delta H \quad (25)$$

Na qual  $H'$  é a elevação do reservatório no tempo  $t - \Delta T$ .

A vazão afluente à barragem é determinada por meio de uma relação entre vazões afluentes ao reservatório ( $Q_i$ ) pelo tempo ( $T_i$ ). A vazão pelo vertedor ( $Q_{sp}$ ) é determinada pela relação entre a vazão do vertedor ( $Q_s$ ) pela elevação do reservatório (H). A da brecha ( $Q_b$ ) é computada pela Eq. (2) que exprime a vazão por pipping. Quando o fluxo na brecha é aproximado ao de um vertedor  $H_c = H_u$ , contudo, quando  $H_c < H_u$ , a seguinte equação para vertedores de soleira espessa é utilizada:

$$Q_b = 3 B_0 (H - H_0) 1,5 + 2 \tan(\alpha) (H - H_0)^{2,5} \quad (26)$$

Na qual  $B_0$  é dado pela Eq. (16) ou Eq. (17) e  $\alpha$  pela Eq. (19). A vazão efluente pela brecha é calculada como a de um vertedor de soleira espessa na Eq. (1), na qual  $B_0$  é substituído pela largura da crista da barragem e  $H_c$  por  $H_u$ .

### 3.4.3 Hidráulica do Canal da Brecha

Assume-se que a brecha seja adequadamente descrita por fluxo quasi-permanente e uniforme. Determinado por meio da aplicação da equação de Manning para canais abertos a cada  $\Delta t$ .

$$Q_b = \frac{1,49 S^{0,5} A^{1,67}}{n p^{0,67}} \quad (27)$$

Na qual  $S=1/ZD$ ,  $A$  é a área da seção transversal do canal,  $P$  o perímetro molhado, e  $n$  o coeficiente de Manning. No presente modelo,  $n$  é definido por meio da relação de Strickler, isto é, baseada na granulometria média do material que forma o canal da brecha:

$$n = 0,013 D_{50}^{0,67} \quad (28)$$

Na qual  $D_{50}$  representa a granulometria média do diâmetro dos grãos expressa em mm.

A utilização do regime quasi-permanente uniforme é considerada apropriada por conta do curto comprimento do canal da brecha e laterais íngremes do canal ( $1/ZD$ ). Essa simplificação é aceita pela pouca variação da vazão pela distância no canal da brecha e mitiga problemas relacionados a instabilidade numérica que seriam gerados caso se assumisse fluxo turbulento.

Quando o canal da brecha é retangular, a seguinte relação existe entre a altura da linha da água ( $y_n$ ) e vazão de descarga pela brecha ( $Q_b$ ):

$$y_n = \left( \frac{Q_b n}{1,49 B_0 S^{0,5}} \right)^{0,6} \quad (29)$$

Na qual  $B_0$  é definido pelas equações de 16 a 18.



Quando o canal da brecha é trapezoidal, o seguinte algoritmo baseado na iteração de Newton-Raphson é usado para computar a profundidade ( $y_n$ ).

$$y_n^{k+1} = y_n^k - \frac{f(y_n^k)}{f'(y_n^k)} \quad (30)$$

$$f(y_n^k) = Q_b P^{0,67} - 1,49 S^{0,5} A^{1,67} \quad (31)$$

Nas quais:

$$A = 0,5 (B_0 + B) y_n^k \quad (32)$$

$$B = B_{om} + y_n \tan(\alpha) \quad (33)$$

$$P = B_{om} + y_n / \cos(\alpha) \quad (34)$$

$$f'(y_n^k) = \frac{0,67 Q_b P'}{P'^{\frac{1}{3}}} - 1,67 \frac{1,49}{n} S^{0,5} B A^{0,67} \quad (35)$$

Na qual:

$$P' = 1 / \cos(\alpha) \quad (36)$$

O  $k$  é um contador de interação, que continua até:

$$| y_n^{k+1} - y_n^k | < \epsilon \quad \epsilon \leq 0,01 \quad (37)$$

A primeira estimativa para  $y_n$  é obtida:

$$y_n^1 = \left( \frac{Q_b n}{1,49 B S^{0,5}} \right) 0,6 \quad (38)$$

Na qual:

$$\underline{B} = 0,5 (B_{om} + B') \quad (39)$$

### 3.4.4 Transporte de Sedimento

A taxa pela qual a brecha é erodida depende da capacidade da água de transporte do material erodido. Segundo Fread (1988) a relação de transporte de sedimento de Meyer-Peter e Muller modificada em 1984 por Smart para canais com lado inclinada é usada:

$$Q_s = 3,64 (D_{90}/D_{30})^{0,2} P \frac{D^{2/3}}{n} S^{1,1} (DS - \Omega) \quad (40)$$

Na qual:

$$\Omega = 0,0054 \tau_c D_{50} \text{ (não coeso)} \quad (41)$$

$$\Omega = \frac{b'}{62,4} (PI)^{c'} \text{ (coesos)} \quad (42)$$

$$\tau_c = a' \tau'_0 \quad (43)$$

$$a' = \cos\theta (1 - 1,54 \tan\theta) \quad (44)$$

$$\theta = \tan^{-1} S \quad (45)$$

$$\tau'_0 = 0,122/R^*0,970 \text{ para } R^* < 3 \quad (46)$$

$$\tau'_0 = 0,056/R^*0,266 \text{ para } 3 \leq R^* \leq 10 \quad (47)$$

$$\tau'_0 = 0,0205 R^*0,173 \text{ para } R^* < 10 \quad (48)$$

$$S = 1/ZD \quad (49)$$

$$R^* = 1524 D_{50} (DS)^{0,5} \quad (50)$$

Plota-se o hidrograma de saída que consiste nas vazões totais ( $Q_b + Q_s + Q_0$ ) para cada tempo de simulação. Esse hidrograma permite delinear conclusões acerca da precisão do modelo quando comparada com dados experimentais e resultados de simulações computacionais mais complexas.

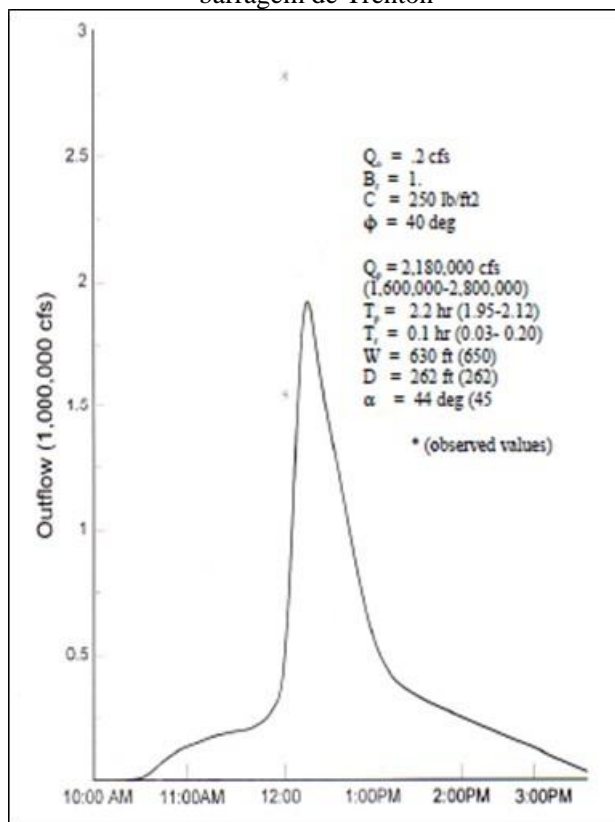
No caso do estudo realizado por Fread (1988), o modelo foi aplicado para a falha por piping da barragem de Tenton em Idaho, das barragens resultados de deslizamentos de Mantaro no Peru e do ocorrido em Spirit Lake, próximo ao Monte St. Helena, Washington.

O autor reporta que a barragem de Tenton era de terra, possuía 93 m de altura e 945 m de comprimento de crista, além de 80 m de água

armazenada. A falha ocorreu dia 5 de janeiro de 1976. De acordo com o relatório abordado no trabalho, a falha iniciou às 10h por *pipping* e aumentou lentamente até as 12h. quando a porção superior do barramento colapsou no buraco da brecha e, em poucos minutos, a brecha se desenvolveu, permitindo que uma vazão de pico de 0,04 à 0,08 hm<sup>3</sup>/s fossem descarregados no vale de jusante. No momento do pico, estimou-se que a brecha possuía formato trapezoidal com seu topo na elevação de 152,4 m e taludes de 1 V: 0,5 H. Passada a vazão de pico, sua diminuição se iniciou e o volume do reservatório diminuiu até que em 5 horas foi registrada uma vazão relativamente baixa. O parâmetro de jusante da barragem possuía uma inclinação de 1:2 e o de montante de 1:2,5. A crista tinha 11 m de largura e o D<sub>50</sub> do material era 0,03 mm.

Para as estimativas em barragens construídas (Teton), que ocorreu por *pipping* e que progrediu para uma brecha similar a um vertedor de soleira livre, o hidrograma e tamanho da brecha aproximaram-se dos valores experimentais. O autor nota que a previsão é sensível ao valor do ângulo de atrito interno que nesse caso foi estimado da granulometria e de uma descrição qualitativa do material do barramento. A outra barragem antrópica, cujo modelo fora testado (Lawn Lake), também falhou por *pipping* e o hidrograma previsto, bem como dimensões da brecha foram aderentes aos valores experimentais. O trabalho exhibe gráfico comparativo do hidrograma de cheia (Figura 12).

Figura 12 Hidrograma de rompimento observado e previsto para a barragem de Trenton



Fonte: FREAD (1988)

A barragem de Lawn Lake era de terra e possuía 8 m de altura com reservatório de aproximadamente 1 hm<sup>3</sup> e falhou por pipping em 15 de julho de 1982. Assumiu-se que a brecha começava a 0,5 m do fundo da barragem. As propriedades do material também foram assumidas sendo  $D_{50} = 0,2 \text{ mm}$ ,  $\phi = 25$ . A face de jusante da barragem tinha inclinação e 1:1,3 e a de montante 1:1,5. A vazão estimada pelo modelo foi de 510,41 m<sup>3</sup>/s ao passo que a vazão de fato foi estimada em 509,7 m<sup>3</sup>/s. O modelo produziu brecha com dimensões de topo e fundo de 29,2608 e 9,75 m, respectivamente. As dimensões da brecha observada foram de 29,566 m de largura e 16,75 de profundidade.

## 4 METODOLOGIA

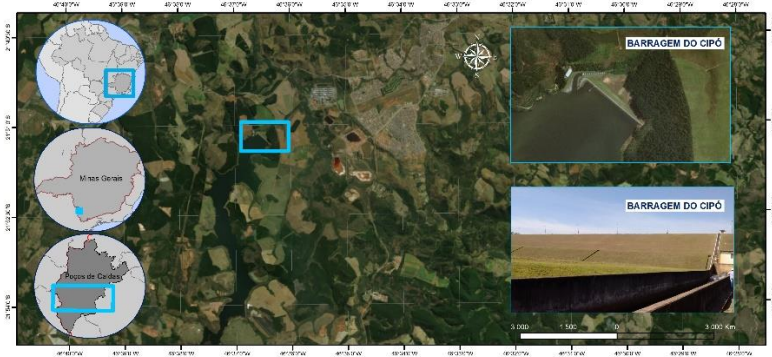
### 4.1 ÁREA DE ESTUDO

A barragem que serve como estudo de caso deste trabalho é a barragem do Cipó, oficialmente denominada Lindolpho Pio da Silva, é o barramento de montante da cascata de usinas da DME. O barramento localiza-se no ribeirão do Cipó no município mineiro de Poços de Caldas e possui como principal objetivo regularizar a vazão do ribeirão das Antas, a montante dos aproveitamentos hidrelétricos do DME Distribuição S.A. O empreendedor responsável pela barragem em questão é o DME Distribuição (DMED), da Prefeitura de Poços de Caldas, Minas Gerais.

A regularização do ribeirão das Antas possibilitou a ampliação do potencial energético da cascata de hidrelétricas instaladas naquela bacia em aproximadamente 6,5 MW médios. Além disso, a Barragem do Cipó garante uma vazão de 420 l/s para abastecimento de água potável para a cidade de Poços de Caldas e proporciona turismo e lazer à população. A construção da obra teve início em novembro de 1996 e final em 23 de maio de 1999, quando foi oficialmente inaugurada.

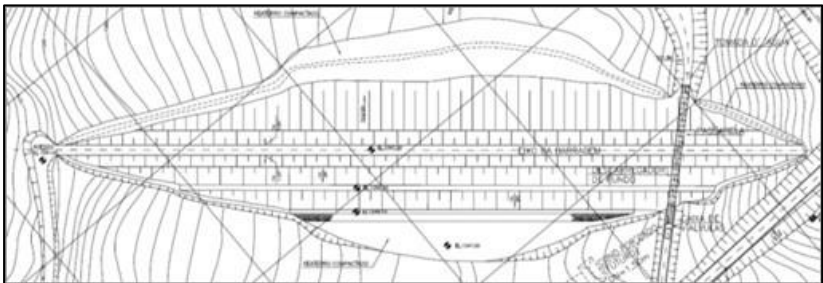
O barramento localiza-se, aproximadamente, no km 1,5 da foz do ribeirão do Cipó com o rio das Antas e com coordenadas aproximadas de 46° 36'18" de longitude oeste e 21° 50'06" de latitude sul. À jusante do reservatório da Barragem do Cipó encontram-se a Barragem de Bortolan, a PCH Eng. Ubirajara Machado de Moraes (Véu das Noivas), UHE Eng. Pedro Affonso Junqueira (Antas I), UHE Walther Rossi (Antas II) e a PCH Padre Carlos (Rolador). A localização da barragem está assinalada em imagem de satélite sob o rótulo de **Figura 13****Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Figura 13 Localização da Barragem do Cipó.



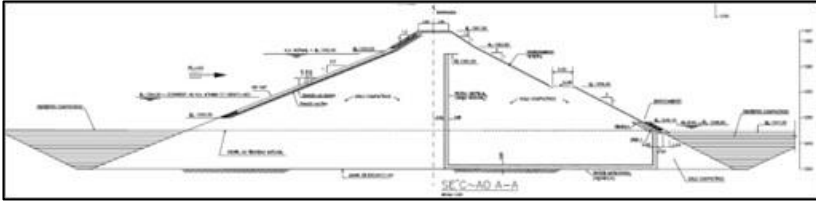
A barragem do Cipó é do tipo estrutural terra homogênea com talude de montante protegido por rip-rap e de jusante por grama associada com sistema de drenagem superficial. A estrutura ainda é dotada de tomada d'água destinada a captação, além de descarga de fundo com objetivo de perenização do rio a jusante e vertedor para a extravasão de cheias. A vista em planta retirada do desenho BRC-103 e a seção de maior altura da barragem retirada do documento BRC-208 estão expostas sob os rótulos de Figura 14 e Figura 15, respectivamente.

Figura 14 Visão em Planta da Barragem



Fonte: Hydros (1996)

Figura 15 Seção de maior altura



Fonte: Hydros (1996)

As fotos do empreendimento a seguir exibidas são de propriedade do DMED e resultado de visita técnica realizada ao empreendimento pela NOVA ENGEVIX S/A. Expõem-se o parâmetro de montante (Figura 16), o de jusante (Figura 17) e a crista do maciço (Figura 18).

Figura 16 Parâmetro de Montante



Fonte: ENGEVIX (2017)

Figura 17 Parâmetro de Jusante



Fonte: ENGEVIX (2017)

Figura 18 Crista do barramento



Fonte: ENGEVIX (2017)

O vertedor é de concreto estrutural com perfil do tipo Creager, com crista na cota 1.262,5 m; 8,0 m de largura e 210 de comprimento da calha. Esse é dotado de dissipadores de energia também em concreto estrutural, em degraus com 0,50 m de altura e 6,50 m de largura. O vertedor está exposto em foto na Figura 19.

Figura 19 Vertedor perfil Creager



Fonte: ENGEVIX (2017)

#### 4.2 LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS

Recorre-se aos documentos de projeto da barragem do Cipó: projeto executivo, memorial descritivo, memorial de cálculo; e documentação de operação e manutenção: relatórios de inspeção, plano de segurança de barragem, plano de ação emergencial, relatório de revisão de estruturas, relatório de revisão hidrológica e de verificação de



estruturas hidráulicas. A lista dos documentos projetuais da barragem do Cipó é apresentada no ANEXO A.

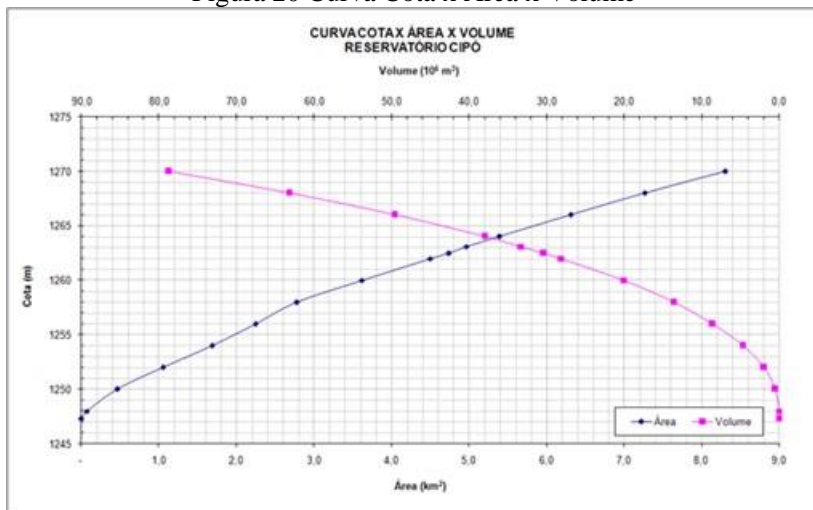
Foram extraídas informações geométricas do barramento: altura do maciço, largura e comprimento do coroamento, bem como cotas do reservatório a partir do desenho BRC507 e BRC-508, que expõem, respectivamente, o empreendimento em planta e suas seções. Dessa forma, têm-se os parâmetros elencados na Tabela 5.

Tabela 5 Dados Geométricos

<b>Parâmetro</b>	<b>Simbologia</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Altura da Brarragem	-	27	Metros
Largura da Crista	Wcr	6	Metros
Comprimento da Crista	-	500	Metros
Cota do coroamento	Hd	1266,7	Metros
Cota de fundo da barragem	HI	1239,7	Metros
Inclinação do Espaldar de Montante	ZU	1:2,5	-
Inclinação do Espaldar de Jusante	ZD	1:2	-

De forma a caracterizar o reservatório e sua extravasão, foram utilizados os relatórios de estudos hidrológicos da barragem, bem como os desenhos BRC-201, BRC-202, BRC-203. Desses, foram extraídas as curvas Cota x Área x Volume (Figura 20 e Tabela 6) utilizadas no modelo para definir a área para o reservatório com base na cota do passo de cálculo. Para sua extravasão, também se valeu da curva de descarga do vertedor (Tabela 7). Na Tabela 8, expõem-se os níveis de referência do reservatório além de outras características da barragem.

Figura 20 Curva Cota x Área x Volume



Fonte: DMED (2005).

Tabela 6 Cota xÁrea xVolume

Cota	(m)	Área (km <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
1247.3		0,00	0
1248		0,07	20000
1250		0,46	490000
1252		1,05	1960000
1254		1,68	4670000
1256		2,24	8580000
1258		2,78	13590000
1260		3,62	19970000
1262		4,50	28070000
1263.1		4,97	33280000
1264		5,40	37980000
1266		6,31	49600000
1268		7,26	63210000
1270		8,31	78750000

Fonte: ENGEVIX (2017)

Tabela 7 Curva de descarga do vertedor

Cota (m)	Descarga (m³/s)
1262.5	0.00
1263	5.37
1263.5	16.17
1264	30.80
1264.5	48.57
1265	69.21
1265.5	93.12
1266	121.37
1266.5	155.99
1266.8	180.59
1267	199.00
1262.5	0.00

Fonte: ENGEVIX (2017)

Tabela 8 Níveis de referência e parâmetros do reservatório

Parâmetro	Valor
Nível Mínimo Normal Montante (m)	1252,00
Nível Máximo Normal Montante (m)	1262,50
Nível Máximo Maximorum Montante (m)	1264,75
Nível Máximo Normal Jusante (m)	1247,00
Nível Máximo Maximorum Jusante (m)	1248,60
Área N.A Máximo Normal (km²)	4,5
Volume N.A Máximo Normal (m³)	32 000 000
Volume Útil (m³)	29 000 000
Profundidade Média (m)	13,60
Tempo de Formação do Reservatório (dias)	60

Fonte: ENGEVIX (2017)

Para os parâmetros geotécnicos do maciço foram utilizados os desenhos BRC-301 a BRC-311, bem como o Anexo Geológico-geotécnico. Os parâmetros utilizados foram os referentes à área de empréstimo utilizada para compor o maciço do empreendimento. As tabelas e gráficos utilizados, retirados dos documentos, estão expostas nas figuras a seguir.

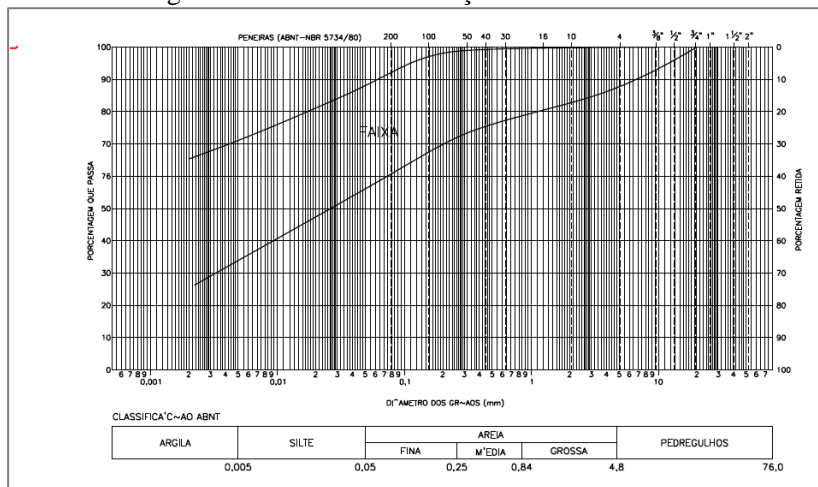
Figura 21 Quadro resumo ensaios de caracterização e compactação

FURO Nº	LOCALIZA'Ç-ÃO	PROF. (m)	DESCR'Ç-ÃO	$\gamma_{wet}$	$w_{opt}$ (%)	$d$	Limites Atterberg (%)			GRANULOMETRIA (%)				COMPACTA'Ç-ÃO PROCTOR NORMAL		PERMEABILIDADE K <sub>20</sub> (cm/s)
							LL	LP	IP	Argilo	Silte	Areia	Pedreg.	$w_{opt}$ (%)	$\gamma_{s,max}$ (t/m³)	
PI-J-9	EXD	2-2,5	Argilo arenoso silteoso, marrom	1,662	40,2	2,744	52,6	26	26,3	44,5	25,5	29,5	0,5	-	-	-
PI-J-10	EXD	2-2,3	Argilo arenoso silteoso, marrom	1,603	61,0	2,714	75,7	36,1	37,6	75,5	9,5	17,5	0,5	-	-	$1,54 \times 10^{-5}$
PI-J-11	EXD	4-4,3	Silte argilo arenoso, laranja	1,508	59,1	2,728	72,3	39,4	35,9	41,0	43,0	13,0	0	-	-	$1,91 \times 10^{-6}$
PI-J-12	AE-01	0-5,0	Silte argilo arenoso, amarelado	2,700	58,2	32,0	26,2	38,0	43,0	17,5	1,5	32,7	1,300	-	-	-
ST-J-23	AE-02	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	45,7	2,756	56,6	35,5	21,1	54,0	20,5	22,0	3,5	33,0	1,387	-	-
ST-J-24	AE-02	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, amarelado	38,3	2,564	62,0	37,4	24,6	63,0	15,5	20,5	1,0	35,9	1,238	-	-
ST-J-25	AE-02	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	44,5	2,642	58,5	35,5	23,0	47,0	39,5	18,5	5,0	30,8	1,370	-	-
ST-J-26	AE-02	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, amarelado	57,8	2,662	54,3	34,3	20,0	66,0	15,0	17,0	2,0	22,7	1,324	-	-
ST-J-27	AE-02	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, amarelado	55,1	2,834	63,0	35,0	28,8	58,5	26,5	14,5	0,5	34,7	1,220	-	-
ST-J-28	AE-02	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	46,1	2,682	65,4	35,9	29,5	65,0	19,5	13,5	2,0	27,9	1,223	-	-
ST-J-29	AE-01	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	28,9	2,720	50,8	32,1	18,5	34,5	23,5	39,0	3,0	29,5	1,443	-	-
ST-J-30	AE-01	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	47,4	2,632	69,2	39,5	29,7	70,5	13,5	15,0	1,0	30,8	1,297	-	-
ST-J-31	AE-01	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	44,4	2,717	65,5	37,1	28,4	46,5	19,5	21,0	1,3	31,1	1,428	-	-
ST-J-32	AE-01	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	43,9	2,767	55,9	34,7	20,2	51,0	33,0	15,0	1,0	31,0	1,235	-	-
ST-J-33	AE-01	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	26,9	2,710	58,5	35,8	22,7	46,0	22,0	32,5	1,5	29,0	1,447	-	-
ST-J-34	AE-01	0-5,0	Argilo arenoso silteoso, marrom	46,2	2,779	63,2	37,4	29,8	60,0	22,5	17,0	0,5	36,5	1,378	-	-

Fonte: SPEC (1996)

Para o índice de plasticidade, foi utilizado a média dos valores expostos na Figura 21 para a área de empréstimos associados a localização AE-01 e AE-02, o que resulta no valor de 24,5.

Figura 22 Faixa de Distribuição Granulométrica



Fonte: SPEC (1996)

O gráfico de faixas de distribuição granulométrica permitiu avaliar os valores de  $D_{30}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$ . Sendo esses, respectivamente, 0,0033 mm, 0,025 mm e 0,06 mm. Os demais parâmetros, retirados do Anexo Geológico-geotécnico, bem como os supracitados, estão listados na Tabela 9.

Tabela 9 Parâmetros Geológico-geotécnicos

Parâmetro	Simbologia	Valor	Unidade
Índice de Plasticidade	IP	24,5	-
Ângulo de atrito	$\phi$	32°	Graus
Peso específico	$\gamma$	16,6	kN/m <sup>3</sup>
Coesão	c	20	kPa
<b>Granulometria</b>			
	$D_{30}$	0,0033	mm
	$D_{50}$	0,025	mm
	$D_{90}$	0,06	Mm

### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO BREACH

Para a implementação dos cálculos do modelo BREACH foi utilizado o software de planilhas parte do Microsoft Office 2016, o Excel. A simulação foi realizada considerando ruptura por galgamento. Os resultados foram comparados com simulação realizada em HEC-RAS executadas como parte do Plano de Ação Emergencial (ENGEVIX, 2017).

De forma a avaliar o modelo como ferramenta de gestão, observou-se além das diferenças quanto ao HEC-RAS, abrangência de aplicabilidade, disponibilidade de informação, complexidade e velocidade de entrega de resultados. Esses fatores foram caracterizados para ambos os modelos, BREACH e HEC-RAS, e sintetizados em tabela comparativa. Esses fatores mostram-se primordiais dentro do contexto de situações de emergência e elaboração de Planos de Ação Emergencial.

#### 4.3.1 Estimativa da vazão de galgamento

No Relatório de Atualização dos Estudos Hidrológicos e Hidráulicos da Barragem do Cipó foram calculadas as vazões de amortecimento das cheias para a barragem do Cipó expostas na Tabela 10.

Tabela 10 Vazões de amortecimento de cheias

Tempo de Retorno (anos)	Vazão Afluente (m <sup>3</sup> /s)	Vazão Efluente (m <sup>3</sup> /s)	Nível de Água (m)
50	153,60	5,38	1263,00
100	168,80	6,42	1263,05
1000	212,30	9,12	1263,17
10000	248,40	11,30	1263,27

Fonte: ENGEVIX (2017)

Adotou-se como a cota para galgamento a correspondente a uma carga de 10 cm acima da cota de coroamento, ou seja, 1266,80 m. Testaram-se valores de onda de cheia, propagadas no reservatório que correspondem a cota predefinida. Para tal, utilizou-se o método de Pulz, descrito por Chow (1959), que consiste na discretização da equação da continuidade concentrada. A relação entre o armazenamento e vazão efluente do reservatório é dada pela equação (51):

$$\int_{S_i}^{S_{i+1}} dS = \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} I(t)dt - \int_{i\Delta t}^{(i+1)\Delta t} Q(t) dt \quad (51)$$

Chow (1959) descreveu tal equação em termos de diferenças finitas, exposto na equação (52):

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{I_t - I_{t+1}}{2} - \frac{(Q_t - Q_{t+1})}{2} \quad (52)$$

Na qual:

$I_t$  e  $I_{t+1}$  = Vazões de entrada no reservatório

$Q_t$  e  $Q_{t+1}$  = Vazões de saída do reservatório

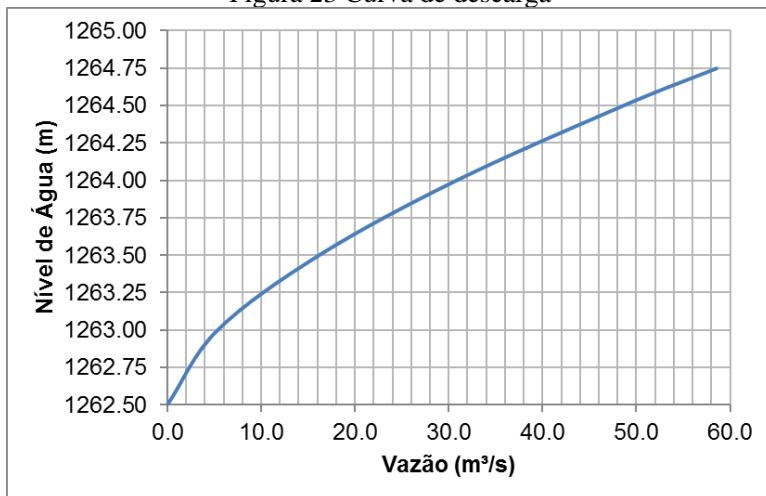
$S_t$  e  $S_{t+1}$  = Armazenamento

Ao reorganizar a equação, separando variáveis conhecidas e desconhecidas em cada termo, têm-se a equação (53):

$$Q_{t+1} + \frac{2S_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} - Q_t + \frac{2S_t}{\Delta t} \quad (53)$$

De forma a avaliar o nível correspondente à vazão de galgamento para a cota definida, confrontou-se a vazão calculada com o nível correspondente por meio da curva de descarga do vertedor exposta na Figura 23.

Figura 23 Curva de descarga

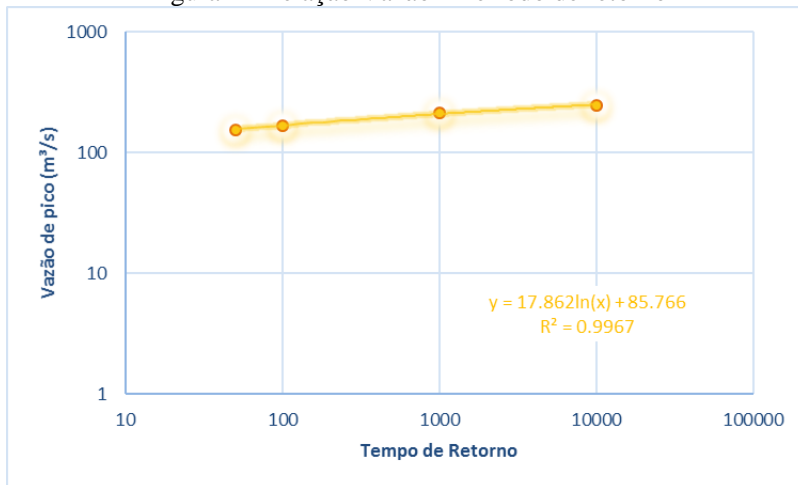


Fonte: ENGEVIX (2017)

A vazão afluente capaz de resultar no galgamento da barragem do Cipó foi de 776,05 m³/s correspondente ao nível do reservatório 1266,80 m. De forma a avaliar o tempo de recorrência dessa vazão, utilizou-se regressão logarítmica pautada nos valores de vazão afluente para tempos

de recorrência distintos apresentados na Tabela 10, cuja representação gráfica e equação estão dispostas na Figura 24.

Figura 24 Relação Vazão x Período de retorno



Por meio da equação da regressão, avaliou-se que a vazão de galgamento se trata de evento extremo, com tempo de recorrência da ordem de 6,07E16 anos.

Para essa vazão, uma vez que propagada a onda cheia, determinou-se os seguintes parâmetros para o momento de ocorrência do galgamento.

Tabela 11 Detalhes do momento do galgamento

$\Delta t$	$Q_i$	$Q_{sp}$	NA reservatório	Delta volume
592.00	776.05	180.95	1266.80	55070627.1

Têm-se, portanto, que o galgamento ocorre no minuto 592 e que a vazão afluyente ( $Q_i$ ) é da ordem de 776,05 m³/s, a vazão extravasada pelo vertedor Creager de 180,95 m³/s correspondente ao nível d'água de 1266,80 m do reservatório.

Assume-se que a vazão efluente inicialmente não encontra resistência do trecho de jusante a ponto de influir na alteração do nível do reservatório durante o processamento da brecha, permitindo que a vazão afluyente corra livremente pelo trecho de jusante.

### 4.3.2 Proteção em grama do talude de jusante

Definiu-se a velocidade do fluxo que deve ser excedida de forma a dar início à erosão do barramento. Essa velocidade possui relação com o fato de que o talude de jusante da barragem Cipó é coberto por grama. O modelo BREACH indica como referência de valor máximo permitido de velocidade os definidos por Chow (1959) expostos na Tabela 12. No Volume I do Plano de Segurança de Barragens, na página 19, faz-se referência a utilização de grama em placa para proteção do barramento.

Tabela 12 Velocidade máxima permitida para coberturas em grama

Cobertura	Declividade %	Velocidade permitida, fps		
		Solos resistentes a erosão	Solos suscetíveis a erosão	
Grama bermuda	0-5	8	6	
	5-10	7	5	
	>10	6	4	
Grama Buffalo, Kentucky e azul	0-5	7	5	
	5-10	6	4	
	>10	5	3	
Mistura de gramas	0-5	5	4	
	5-10	4	3	
	Não utilizar em declividade maiores que 10%			
Lespedeza cuneata, Eragrostis curvula, ischemum, Pueraria lobata, alfafa, Digitaria	0-5	3.5	2.5	
	Não utilizar em declividades maiores que 5% exceto em taludes laterais em canais combinados			
	0-5	3.5	2.5	
Anuais - use em declividades médias ou proteções temporárias	Recomendado em taludes mais íngrimes que 5%			

Fonte: Chow (1959)

Em virtude da falta de informações acerca da espécie da grama utilizada na proteção do talude da barragem objeto de estudo, assumiu-se com base na inclinação do parâmetro de jusante (50%) o valor de



velocidade que acarretará início da erosão mais rapidamente, portanto, o cenário mais crítico. Dessa forma, adota-se o valor relacionado com gramas das variedades Buffalo, Kentucky e grama azul, para materiais resistentes à erosão, o que leva ao valor de 5 fps (1,5 m/s).

### 4.3.3 Vazão da brecha e mecanismos de controle de seu crescimento

A partir do momento da excedência da velocidade permitida, Fread (1988) pontua que se assume a formação de canal com 1 pé de altura e 2 pés de comprimento (0,3 m por 0,6 m) ao longo do parâmetro de jusante, com declividade de fundo de 1/2 (declividade do parâmetro de jusante). Essas dimensões iniciais são utilizadas como ponto de partida para os cálculos de vazão pela brecha ( $Q_b$ ), conforme equações (1) para brecha retangular e (26) para trapezoidal e vazão de sedimento pela brecha ( $Q_s$ ) conforme será abordado na seção 4.3.5.

Essas dimensões iniciais também fomentam a avaliação do crescimento das dimensões da brecha com base na altura crítica da lâmina d'água no canal formado. A brecha, inicialmente retangular, passa a se apresentar trapezoidal a partir do momento que a lâmina d'água no seu interior ( $H_k$ ) ultrapassa o valor crítico ( $H'_k$ ) definido na equação (3). Como esses valores são função dos parâmetros geotécnicos do maciço, e portanto, fixos, é possível definir, além do valor crítico, os ângulos  $\alpha$  e  $\theta$  correspondentes aos estágios de rompimento  $k$ , conforme expostos nas Figura 10 e Figura 11. A Tabela 13 expõe os valores dos ângulos e do  $H'_k$  correspondentes aos estágios de rompimento.

Tabela 13 Parâmetros correspondentes aos estágios de rompimento

Estágio de Rompimento (k)	Formato	theta (°)	alfa (°)	Lâmina crítica (H'k) (m)
Inicial	Retangular	90	0	8,52
1	Trapezoidal	60,50	29,50	27,73
2	Trapezoidal	45,75	44,25	89,79
4	Trapezoidal	38,37	51,62	310,00

### 4.3.4 Hidráulica do Canal da Brecha

A forma de simulação da hidráulica do canal da brecha varia em função do estágio de rompimento, sendo para brecha retangular como exposto na equação (27) e nos estágios seguintes pela adaptação do algoritmo de Newton-Raphson, expresso das equações (30) a (39).

Nesse ponto, é definido o coeficiente de Manning pautado na relação de Strickler, função do  $D_{50}$  na equação (28), referente ao canal da brecha. Para o objeto de estudo foi verificado coeficiente de Manning  $n=0,0010979$ .

A partir do momento em que se passa para o estágio de rompimento 1, quando as laterais do canal da brecha se colapsam e esta se torna trapezoidal, a largura do fundo da brecha atinge o limite definido de  $B_0=B_{0m}$  de 43,31 pés (13,2 m). Estima-se, então, com base no algoritmo de Newton-Raphson, a nova lâmina da água, a largura superior da brecha e os parâmetros geométricos da seção transversal do canal: área, perímetro molhado e raio hidráulico.

#### 4.3.5 Vazão de Sedimento

Fread (1988) elucida que a vazão de sedimento pela brecha é pautada na relação de Meyer-Peter e Muller modificada por Smart (1984), exposta nas equações (40) a (50). Utiliza-se para o parâmetro  $\Omega$  a definição para solos coesos na equação (42), de modo que se recorre ao índice de plasticidade do maciço e aos coeficientes  $b'$  e  $c'$ .

Fread (1988) postula que os coeficientes empíricos  $b'$  e  $c'$  variam respectivamente entre os limites de 0,003 e 0,019 e 0,58 e 0,84, como definido em trabalho realizado por Clapper e Chen (1987). A publicação desses dois atores se trata de um manual técnico intitulado *Minimizing Embankment Damage During Overtopping Flow* e faz referência apenas ao fato de que a variação desses parâmetros depende do tipo de solo, sem especificar faixas de valores ou os tipos propriamente ditos.

Ferreira e Andrzejewski (2015) aplicaram o modelo BREACH para barragem hipotética com 50 m de altura; 1.000 m de comprimento; largura da crista de m; parâmetro de jusante e montante de 1/75; núcleo de argila da crista a fundação, com 5 m de largura na crista e 80 de largura máxima na base. Todavia, não especificam os valores assumidos para  $c'$  e  $b'$ .

#### 4.3.6 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros $b'$ e $c'$

Em virtude da falta de informação quanto a definição dos parâmetros  $c'$  e  $b'$  optou-se por realizar análise de sensibilidade desses. Utilizou-se 5 valores para  $b'$  e 3 para  $c'$ , de forma a verificar a diferença na vazão de pico resultante dessas variações. A diferença na quantidade de valores utilizados é proveniente da variação de ordem de grandeza de cada um. Na modelagem principal, utilizaram-se valores médios para os parâmetros. Na análise de sensibilidade, os valores máximos, mínimos e

médio para  $c'$ . No caso de  $b'$ , além dos valores análogos definidos para  $c'$ , os valores médios entre máxima e média e mínima e média. Os valores assumidos estão sumarizados na Tabela 14.

Tabela 14 Parâmetros da análise de sensibilidade

Parâmetro	$c'$	$b'$
Mínimo	0,58	0,003
Mínimo Intermediário	-	0,007
Médio (Simulado)	0,71	0,011
Máximo Intermediário	-	0,015
Máximo	0,84	0,019

Para o índice de plasticidade (PI) foi utilizada a média dos valores dos índices (IP) das sondagens referentes à área de empréstimo, cujo material compôs posteriormente o maciço do barramento. Os valores expostos na Figura 21 resultam em média de 24,5.

### 4.3.7 Hidrograma de rompimento e geometria da brecha

O hidrograma de rompimento é composto por gráfico relacionando as vazões de galgamento, pela brecha e de sedimento. Inicia-se pelo passo de tempo referente ao minuto 592, em que o galgamento de fato ocorre.

Os parâmetros geométricos da brecha são limitados pela geometria da própria barragem, de forma que a simulação se encerra quando se atinge a cota de fundação, do leito natural do rio (1239,7 m). Fread (1988) postula que o passo de cálculo no qual a elevação do fundo da brecha atinge a máxima permitida têm-se a vazão de pico, de forma que se dá encerrada a simulação.

Para a definição da forma dos hidrogramas foi utilizada a equação (51) com decaimento parabólico:

$$Q(t) = Q_p \left[ \left( \frac{t}{t_p} \right) e^{\left( 1 - \frac{t}{t_p} \right)} \right]^k \quad (51)$$

Na qual:

$Q(t)$  = Vazão no instante  $t$  ( $m^3/s$ );

$Q_p$  = Vazão de pico ( $m^3/s$ );

$t$  = tempo em qualquer instante (s);

$t_p$  = tempo de pico (s);

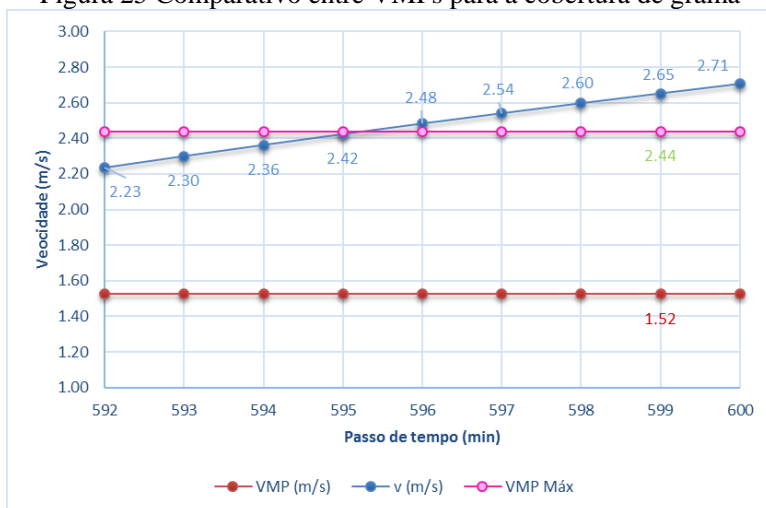
$k$  = Coeficiente de escala.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 PROTEÇÃO EM GRAMA DO TALUDE DE JUSANTE

A Figura 25 exibe gráfico para a velocidade do fluxo de galgamento sobre o parâmetro de jusante comparada com dois valores máximos permitidos definidos por Chow (1959) e expostos na Tabela 12. São selecionados os valores de 5 fps (1,52 m/s) de fato utilizado na simulação e 8 fps (2,44 m/s), referente à grama bermuda aplicada em solos resistentes a erosão e taludes com declividade menor que 5%. Embora esse último seja pouco aplicável ao contexto de barragens, utiliza-se como via comparativa em relação aos resultados obtidos.

Figura 25 Comparativo entre VMPs para a cobertura de grama



A velocidade máxima permitida para a grama é da ordem de 5 fps (1,5 m/s). No início do galgamento a velocidade atingida no primeiro passo de cálculo é de 2,23 m/s, portanto superior ao valor máximo permitido. Dessa forma, o modelo preconiza que a erosão se inicia nesse momento, o que nos leva ao fato de que a cobertura em grama não promove atraso da erosão da barragem durante a falha.

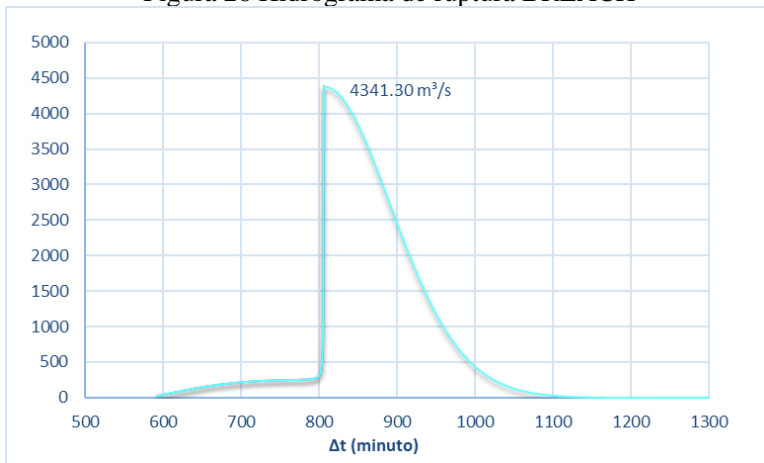
No caso do valor de 8 fps (2,44 m/s), têm-se que o valor é ultrapassado entre os minutos 595 e 596 correspondentes ao quarto e quinto minuto, respectivamente, do evento do galgamento. Portanto, a utilização de um valor ainda maior atrasaria o início da erosão em 5

minutos. É importante enfatizar que os valores definidos por Chow (1959) são referentes a taludes em canais fato esse capaz de impactar na sua capacidade de resistência à erosão.

## 5.2 VAZÃO DE ROMPIMENTO

O hidrograma de ruptura da barragem do Cipó calculado por meio do BREACH neste trabalho (Figura 26) atingiu vazão de pico de 4.341,30 m<sup>3</sup>/s no passo de cálculo referente ao minuto 806: 215 minutos (3,6 horas) depois do início do episódio de galgamento.

Figura 26 Hidrograma de ruptura BREACH



Na simulação desenvolvida pela ENGEVIX como parte do Plano de Ação de Emergência da barragem do Cipó foi elaborado modelo hidráulico por meio do software HEC-RAS 5.0.3, em regime de escoamento não permanente. A vazão de pico resultante dessa ruptura hipotética foi de 1.386 m<sup>3</sup>/s. Percebe-se, portanto uma diferença de 2.955,30 m<sup>3</sup>/s (68,07%) entre as vazões de pico resultado da simulação por meio do BREACH e pelo HEC-RAS.

Essa diferença é possivelmente pautável no fato da complexidade e das considerações de cada uma das metodologias. No caso dos resultados desenvolvidos pela ENGEVIX, foram utilizados parâmetros de brecha padronizados pela ANA expostos na Tabela 3, sem consideração do contexto específico da barragem do Cipó. Em contrapartida, o modelo BREACH se vale da consideração do escoamento como quasi-lâminar

com o objetivo de simplificar a complexidade de parte dos procedimentos iterativos.

No estudo desenvolvido por Ferreira e Andrzejewski (2015) foram comparadas vazões de rompimentos calculadas com base em modelos empíricos e por meio do BREACH. Nos modelos empíricos, ao que se refere à largura média da brecha, a variação de valores foi de 147 m a 480 m. O tempo de formação de 0,7 a 14,4 horas; as vazões de pico entre 28.522 m<sup>3</sup>/s a 46.554 m<sup>3</sup>/s. Em contrapartida, a vazão de pico simulada por meio do BREACH nesse trabalho foi da ordem de 158.650 m<sup>3</sup>/s. Portanto, no trabalho desenvolvido pelos autores supracitados também foi verificada diferença expressiva entre os resultados calculados por diferentes métodos.

A nível de vazão de pico de rompimento, o modelo BREACH de forma geral mostrou-se com resultados de ordem de grandeza superior para o galgamento em barragens de terra, quando comparado com outras metodologias. A utilização do modelo BREACH está atrelada à disponibilidade de uma gama de parâmetros geotécnicos inerentes ao maciço. Em barragens com projetos simplificados demais, ou cuja documentação não é rigorosamente controlada, esses parâmetros são passíveis de não-consideração a nível projetual ou de perda da informação. Nesse cenário, a utilização do BREACH torna-se impraticável, uma vez que o modelo é bastante dependente desses parâmetros, fazendo-se necessário lançar mão de estimativas. Os tempos de processamento foram bastante curtos, invariavelmente menores que 1 minuto, uma vez que todos os parâmetros fossem inseridos.

Conclui-se que o modelo BREACH se posiciona como ferramenta de gestão válida com caráter completar a estudos de rompimento de barragens. O modelo se adequa a barragens bem documentadas e quando a utilização de simulações computacionais detalhadas não é praticável. Enfatiza-se que por ter apresentado resultados superestimados, quando comparado com outras metodologias, ser passível de oferecer margens de segurança robustas, de forma a ser interessante sempre utilizá-lo acoplado com outras metodologias a fim de não fomentar decisões de gestão de risco excessivas.

### 5.3 CARACTERÍSTICAS DA BRECHA

No caso da brecha simulada neste trabalho, os resultados dos parâmetros geométricos e tempo de formação estão expostos na tabela Tabela 15, ao passo que os mesmos parâmetros utilizados na simulação

do Plano de Ação Emergencial realizado pela ENGEVIX estão expostos ao lado, na mesma tabela. .

Tabela 15 Características da brecha calculadas pelo BREACH e HEC-RAS

<b>Parâmetro</b>	<b>BREACH</b>	<b>HEC-RAS</b>
Altura da brecha (m)	27,00	27,00
Largura da brecha (m)	40,82	78,00
Inclinação da brecha	60,5°	45°
Tempo de ruptura (min)	216,00	30,00

A altura da brecha é a mesma, pois ambas as metodologias consideraram que o limite do rompimento e, por conseguinte do fundo da brecha, corresponde a cota de fundação da barragem. Para a largura, têm-se o resultado da modelagem pelo BREACH é quase metade do que a do HEC-RAS, 40,82 m contra 78,00 m. Entretanto, ambas as definições adequam-se ao preconizado pela ANA (2016) e exposto na Tabela 3, em que recomenda-se que a largura da brecha esteja entre de 1 a 5 vezes a altura do barramento. Quanto à inclinação das laterais da brecha, o modelo BREACH resultou em uma seção mais aberta que a utilizada no estudo de rompimento. Destaca-se a diferença no tempo de rompimento, uma vez que o definido pela agência é de 30 min e o calculado pelo BREACH é de 216,00 min.

O trabalho de Ferreira e Andrzejewski (2015), no qual simulou-se uma barragem hipotética, para resultados referentes a Fórmulas Empíricas, exhibe resultados de largura média de brecha que variam entre 147 e 480 m, com tempos de formação entre 0,7 h e 14,4 h. No caso da simulação realizada pelo BREACH no trabalho dos autores supracitados, a largura média foi da ordem de 425,0 m com tempo de formação de 112,0 horas. Nesse caso, a largura mostrou-se dentro do limite estabelecido das simulações executadas com equações empíricas, ao passo que o tempo de formação se mostrou muito superior ao apontado nessas.

Esses resultados, com exceção da largura da brecha, reiteram a superestimação do BREACH relativo ao HEC-RAS, padrão esse repetido nos resultados de Ferreira e Andrzejewski (2015). Portanto, reforça-se a análise da utilização do BREACH como ferramenta de gestão complementar e atrelada a contextos específicos.

#### 5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS $c'$ e $b'$

Os resultados referentes a análise de sensibilidade dos parâmetros  $c'$  e  $b'$  estão expostos nas Figura 27, Tabela 16, Figura 28e Tabela 17. São expressas para diferentes valores desses as vazões de pico resultantes e o hidrograma de rompimento comparado com o valor médio do parâmetro, o qual fora utilizado como resultado principal da simulação realizada neste trabalho.

Figura 27 Resultado gráfico análise de sensibilidade parâmetro  $c'$

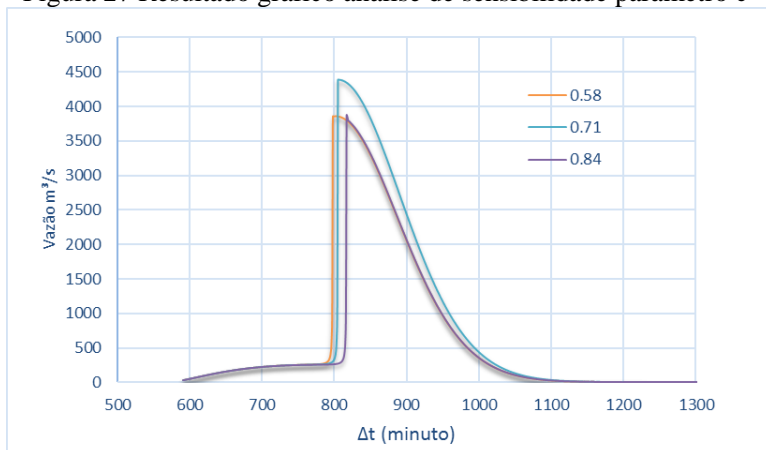


Tabela 16 Resultados análise de sensibilidade parâmetro  $c'$

$c'$	0,58	0,71	0,84
Vazão de pico ( $m^3/s$ )	3.856,00	4.385,20	3.878,63

Para o parâmetro  $c'$  percebe-se que os valores variaram entre  $3.856,00 m^3/s$  a  $4.385,20 m^3/s$ . Verifica-se que não há grande variação nos valores, de forma que esses se mantiveram na mesma ordem de grandeza. É interessante pontuar que a relação não se apresentou linear, sendo que para os valores extremos observou-se decréscimo na vazão de pico quando comparado com o valor médio. Observa-se, porém, que quanto maior o valor do parâmetro maior o tempo necessário para a ocorrência da vazão de pico.



Figura 28 Resultado gráfico análise de sensibilidade parâmetro  $b'$

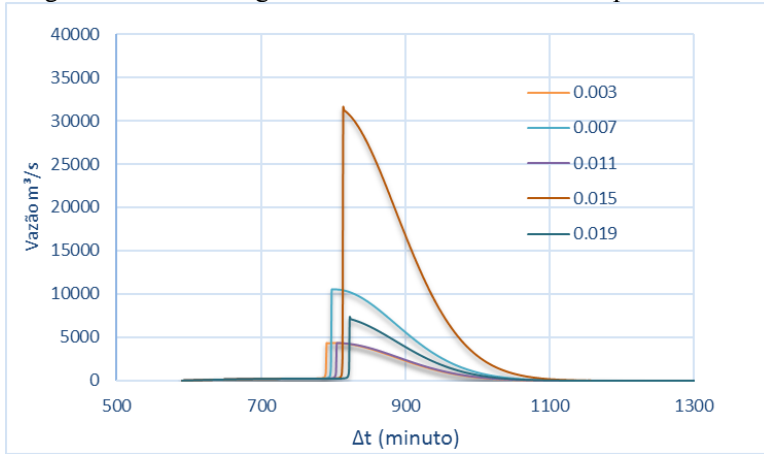


Tabela 17 Resultados análise de sensibilidade parâmetro  $b'$

$b'$	0,003	0,007	0,011	0,015	0,019
Vazão de pico ( $m^3/s$ )	4.331,68	10.560,18	4.385,20	31.556,86	7.403,11

Por outro lado, no caso do parâmetro  $b'$ , têm-se uma variação bastante irregular da vazão de pico para diferentes valores, com valor mínimo de 4.4331,68  $m^3/s$  e máximo de 31.556,86  $m^3/s$ , com variações não correspondentes às alterações ocorridas no parâmetro  $b'$ . Tal qual no parâmetro  $c'$ , à medida que o valor de  $b'$  cresce têm-se um aumento no tempo de ocorrência da vazão de pico. Portanto, os resultados de vazão de pico de BREACH mostram-se mais sensíveis ao parâmetro  $b'$ , quando comparado ao  $c'$ . Essas variações enfatizam a importância desses parâmetros frente a aplicação do modelo, sendo necessárias análises específicas atreladas ao tipo de solo de forma a defini-los com maior precisão. Além disso, as incertezas associadas a esses parâmetros enfatizam a necessidade de utilização do modelo de maneira conjunta com outros métodos.

Dado o fato de que os parâmetros  $c'$  e  $b'$  são relativos ao tipo de solo, as variações na vazão de pico podem possuir uma pluralidade de explicações, de forma que o material construtivo e suas características são fundamentais na resistência à falha de um barramento. Além disso, sem mais informações acerca dos tipos de solo correspondente a diferentes valores desses parâmetros, não é possível precisar completamente a coerência física desses resultados. Por exemplo, se esses valores consideram materiais mais

colapsáveis e pouco adequados a construção de barragens como areias, há espaço para a justificativa de vazões de pico maiores.

## 5.5 BREACH COMO FERRAMENTA DE GESTÃO

Realizou-se análise comparativa dos modelos BREACH e HEC-RAS sob os aspectos de abrangência de aplicabilidade, complexidade, disponibilidade de informação de apoio e velocidade de entrega de resultados. Essa análise, tem como objetivo contextualizar a aplicação do modelo BREACH, bem como sua adequação como ferramenta de gestão. A Tabela 18 sumariza as análises dos aspectos supracitados para ambos os métodos.

Tabela 18 Comparação BREACH e HEC-RAS

Aspecto	BREACH	HEC-RAS
Abrangência de aplicabilidade	Aplicável em barragens de terra construídas e naturais, com proteção de grama, maciços homogêneos e heterogêneos; Demanda, porém, uma gama de parâmetros geológicos-geotécnicos frequentemente ausentes em barragens pouco documentadas.	Não oferece restrições quanto ao tipo de barramento, simulando-os como estrutura hidráulica. Precisão dos resultados depende da disponibilidade e qualidade dos dados de entrada disponíveis.
Complexidade	Demanda entendimento de conceitos físicos, princípios de engenharia e conhecimentos básicos de programação para a confecção da planilha. Uma vez programada, basta conhecimento operacional do Excel e entendimento da dinâmica da planilha.	Demanda além do entendimento de princípios físicos e de engenharia, operação do software em si, dispensando, porém conhecimentos expressivos em programação.
Informação de apoio disponível	Restringe-se ao artigo que descreve o modelo, e escassos trabalhos que lidam com sua aplicação.	Conta com literatura ampla oferecida pelos próprios fabricantes, vídeo-tutoriais, projetos de exemplo, além de comunidade de usuários expressiva.
Velocidade de entrega de resultados	A composição inicial da planilha pode demorar algumas semanas até atingir o ponto de funcionalidade plena, entretanto uma vez que concluída, o ônus se restringe a inserção dos dados do barramento nessa.	A montagem do modelo e simulações são passíveis de durarem semanas.

Com base na Tabela 18 verifica-se que, em relação ao HEC-RAS, o modelo BREACH é mais prático. Uma única planilha é passível de aplicação a contextos de barragens de terra distintas: com proteção em grama, maciços homogêneos ou mistos. Uma vez com a planilha programada, a inserção dos dados e análises subsequentes não devem exceder um período de horas. Todavia, esbarra-se no fato que as barragens objeto do BREACH, apenas de

terra, precisam possuir informações acerca de seus parâmetros geológico-geotécnicos, nem sempre disponíveis em barragens pouco monitoradas ou antigas. Além disso, a bibliografia passível de oferecer apoio ao operador do BREACH se restringe ao artigo original no qual é descrito e em escassos trabalhos nos quais esse foi aplicado.

Em contrapartida, embora a aplicação do HEC-RAS seja mais demorada, podendo durar semanas em atividades necessárias para a confecção do modelo: correção de base, definição de estruturas, refinamento de malha e seções, além da execução dos cálculos efetivos do modelo, as quais a depender de sua complexidade, podem levar horas, há pouca ou nenhuma restrição para sua aplicação. Demanda-se, entretanto, conhecimentos relacionado a operação do software e utilização de Sistemas de Informação Geográficas (SIG). Por outro lado, o HEC-RAS possui uma gama de informações de apoio capaz de favorecer seu uso: manuais bem estruturados do próprio fabricante, projetos de exemplo, além de ampla comunidade de usuários e vídeo-tutoriais.

À luz dessa discussão, reitera-se que o BREACH possui potencial de utilização como ferramenta de gestão aliado a outras metodologias. Embora ofereça respostas de forma mais expedita, é necessário comparar seus resultados a outras metodologias.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou avaliar a capacidade do modelo BREACH proposto por FREAD (1988) na simulação de brechas de ruptura por galgamento em barragens de terra, com ênfase na vazão de pico resultante da brecha e sua geometria. O resultado base deste trabalho retornou vazão de pico de rompimento de 4.385,20 m<sup>3</sup>/s contra a vazão de pico resultante dessa ruptura hipotética de 1.386 m<sup>3</sup>/s. Têm-se, portanto, uma diferença de 2.955,30 m<sup>3</sup>/s (68,07%) entre as vazões de pico, resultado da simulação por meio do BREACH e pelo HEC-RAS.

Quando comparada à ordem de grandeza em relação ao trabalho de Ferreira e Andrzejewski (2015), o resultado para o modelo BREACH (158.650 m<sup>3</sup>/s) apresentou-se expressivamente maior que as equações empíricas: (mínimo de 28.522 m<sup>3</sup>/s e máximo de 46.554 m<sup>3</sup>/s).

No que diz respeito à configuração da brecha, a simulação deste trabalho resultou em brecha de 27 m de altura, largura de 40,82 m, inclinação das laterais de 60,5° e um tempo de ruptura de 216,00 min; no caso do estudo desenvolvido no HEC-RAS, têm-se uma brecha de 27,00 m, largura de 78,00 m, inclinação das laterais de 45° e tempo de ruptura de 30 min. Mostrando-se maior diferença no que diz respeito ao tempo de ruptura, padrão esse que se repete na análise de Ferreira e Andrzejewski (2015). A sobrestimação reitera a utilização do modelo como ferramenta de gestão complementar e em

contextos específicos: barragens de terra cujos parâmetros geológicos-geotécnicos bem documentados.

Essas diferenças expressivas podem se dever por fatores diversos, tais quais as incertezas na seleção de valores para os parâmetros  $b'$  e  $c'$ , a utilização do regime de escoamento quasi-laminar, a opção pela simulação por galgamento, quando comparado ao pipping, em função da maior sensibilidade de barragens de terra à erosão por pipping do que por galgamento.

Analizou-se ainda a sensibilidade de dois parâmetros empíricos envolvidos no cálculo da vazão de sedimento pela brecha:  $b'$  e  $c'$ . Fread (1988) faz referência a Clapper e Chen (1987), os quais expõem que os referidos parâmetros variam de acordo com o tipo de solo, sem especificar de que forma e para quais tipos de solo. A variação na vazão de pico mostrou-se expressivamente mais sensível para variações em  $b'$  (resultados de 4.331,68 a 10.560,18  $m^3/s$ ) do que em  $c'$  (3.856,00 e 4.382,20  $m^3/s$ ), ao passo que ambos os parâmetros não variam de forma linear.

De forma a aprimorar as incertezas relacionadas aos parâmetros  $c'$  e  $b'$ , recomenda-se estudos mais profundos desses parâmetros apoiados por ensaios geológicos-geotécnicos com diferentes tipos de solo, podendo-se ainda, recorrer a experimentos em modelo reduzido, com objetivo de delinear com maior precisão as relações desses parâmetros e de diferentes tipos de solos nos hidrogramas de rompimento. Recomenda-se ainda a realização da simulação por pipping por meio do próprio BREACH para a barragem do Cipó.

Indica-se, portanto, a utilização do BREACH para barragens de terra bem documentadas, nas quais os parâmetros geológico-geotécnicos do modelo tenham sido ensaiados no período de projeto e construção. Recomenda-se ainda a utilização de mão de obra capacitada e com experiência em estudos de *dam break* e nas quais simulações mais complexas não são viáveis. Para barragens de concreto, ou de terra pouco documentadas, não é recomendada a utilização do modelo BREACH.

## REFERÊNCIAS

ALCHETRON. **Kebar Dam**. Disponível em: <<https://alchetron.com/Kebar-Dam>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

ANA, **Guia de Orientações e Formulários dos Planos de Ação de Emergência** – PAE, 2016.

ANDERSON, Chuck et al. **Concrete Dams: Case Histories of Failures and Nonfailures with Back Calculations**. US Department of Interior, Bureau of Reclamation-Dam Safety Office, 1998.

CLAPPER, Paul E.; CHEN, Yung-hai. **Minimizing Embankment Damage During Overtopping Flow**. Denver: Sla, 1987.

CRISTOFANO, E.A. 1965. **Method of computing erosion rate for failure of earthfill dams**. United States Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. ESTADOS UNIDOS. ASSOCIATION OF STATE DAM SAFETY OFFICIALS/ FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY. (Org.). **Specialty Workshop on Risk Assessment for Dams**. Utah, 2011. 900 p.

FERREIRA, Ana Luisa Moreira; ANDRZEJEWSKI, Edgar Alberti. **COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUPTURA DE UMA BARRAGEM HIPOTÉTICA**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, Não use números Romanos ou letras, use somente números Arábicos., 2015, Foz do Iguaçu. **COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DA RUPTURA DE UMA BARRAGEM HIPOTÉTICA**. Foz do Iguaçu: Comitê Brasileiro de Barragens, 2015. p. 1 - 12. Disponível em: <[http://www.cbdb.org.br/xxxsnbg/download/trabalhos\\_tecnicos/tema113/COMPARA%C3%87%C3%83O%20DE%20M%C3%89TODOS%20DE%20C%C3%81LCULO%20DA%20RUPTURA%20DE%20UMA%20BARRAGEM%20HIPOT%C3%89TICA.pdf](http://www.cbdb.org.br/xxxsnbg/download/trabalhos_tecnicos/tema113/COMPARA%C3%87%C3%83O%20DE%20M%C3%89TODOS%20DE%20C%C3%81LCULO%20DA%20RUPTURA%20DE%20UMA%20BARRAGEM%20HIPOT%C3%89TICA.pdf)>. Acesso em: 12 out. 2018.

FREAD, D. L. **BREACH, an erosion model for earthen dam failures**. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA, 1988. GEE, D. Michael. **Comparison of dam breach parameter estimators**. In: World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers. 2009. p. 1-10.

CHOW, Ven TE. **Open channel hydraulics**. McGraw-Hill Book Company, Inc; New York, 1959.

HARRIS, G.W., and D.A. Wagner. 1967. **Outflow from breached earth dams**. University of Utah, Salt Lake City, Utah.

JANSEN, R. B. (1983): **Dams and Public Safety**; Denver, CO (U.S. Government Printing Office).

MACCHIONE, Francesco. **Model for predicting floods due to earthen dam breaching**. I: Formulation and evaluation. Journal of Hydraulic Engineering, v. 134, n. 12, p. 1688-1696, 2008.

PONCE, V.M., and A.J. Tsivoglou. 1981. **Modeling of gradual dam-breaches**, Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, 107(HY6):829-838.

SINGH, Vijay P. **Dam breach modeling technology**. Springer Science & Business Media, 2013.

SODRÉ, Ulysses. **Modelos matemáticos**. Londrina: Uel, 2007. 27 p.

WALDER, Joseph S.; O'CONNOR, Jim E. **Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams**. Water Resources Research, v. 33, n. 10, p. 2337-2348, 1997.

WU, Weiming. **Simplified physically based model of earthen embankment breaching**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 139, n. 8, p. 837-851, 2013.

## ANEXO A – Lista de Projetos e Documentos Fornecidos pela DMED

Código	Discriminante
Anexo Geológico-geotécnico	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Projeto Básico - Volume III - Anexo Geológico-Geotécnico - Relatório Final
BRC-101	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Mapa de Localização e Acessos
BRC-102	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Simbologia de Legendas
BRC-103	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Arranjo Geral do Barramento
BRC-104	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Levantamento Planialtimétrico - Eixos das Estruturas
BRC-105	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Área de Desapropriação - Planta
BRC-106	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Área de Desapropriação - Planta
BRC-107	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Área de Desapropriação - Planta
BRC-108	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Área de Desapropriação - Planta
BRC-201	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Bacia Hidrográfica - Rio das Antas e do Ribeirão do Cipó - Planta e Perfil
BRC-202	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Reservatório - Planta
BRC-203	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Características Hidrológicas
BRC-301	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Mapa Geológico Regional
BRC-302	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Mapa Geológico-Geotécnico
BRC-303	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Áreas de Empréstimo e Bota-Fora
BRC-304	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Localização das Sondagens na Barragem - Planta

Código	Discriminante
BRC-305	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Localização das Sondagens nas Áreas de Empréstimo e Bota-Fora - Planta
BRC-306	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção Geológico-Geotécnica no Eixo do Barramento
BRC-307	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seções Geológico-Geotécnicas nas Estruturas Principais
BRC-308	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seções Geológico-Geotécnicas nas Áreas de Empréstimo
BRC-309	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Bota-Fora - Esquema de Deposição - Plantas e Seções
BRC-310	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Ensaio de Caracterização
BRC-311	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Ensaio de Caracterização
BRC-401	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Desvio do Rio - Fases Construtivas
BRC-501	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Ensecadeiras - Planta e Seções
BRC-502	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Vertedouro Escavação - Planta e Cortes
BRC-503	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Vertedouro Escavação - Seções e Detalhes
BRC-504	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Canal de Restituição Escavação - Planta e Seções
BRC-505	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/Desc. De Fundo Escavação - Planta e Seções
BRC-506	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Barragem de Terra - Escavação e Limpeza da Fundação - Planta e Seções
BRC-507	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Barragem de Terra - Planta



Código	Discriminante
BRC-508	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Barragem de Terra - Perfil e Seções
BRC-509	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Drenagem Pluvial - Planta
BRC-510	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Drenagem Pluvial - Detalhes e Seções
BRC-511	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Drenagem Pluvial - Detalhes e Seções
BRC-512	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Barragem de Terra - Instrumentação - Planta
BRC-601	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Vertedouro - Arranjo - Planta
BRC-602	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Vertedouro - Arranjo - Seções, Vista e Detalhes
BRC-603	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Vertedouro - Armadura
BRC-604	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/Desc. De Fundo Arranjo - Planta e Seções
BRC-605	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/Desc. De Fundo Arranjo - Seções
BRC-606	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água - Arranjo - Seções
BRC-607	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Caixa de Válvulas - Planta, Seções e Detalhes
BRC-608	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Descarregador de Fundo - Arranjo - Seções e Detalhes
BRC-609	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água - Armadura - Planta e Seção
BRC-610	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Descarregador de Fundo - Armadura
BRC-611	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água - Passarela de Acesso

Código	Discriminante
BRC-612	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Descarregador de Fundo - Instrumentação - Seções
BRC-701	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Grade - Arranjo Geral
BRC-702	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Comporta Vagão - Arranjo Geral
BRC-703	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/ Desc. De Fundo - Stop-Log - Arranjo Geral
BRC-704	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Pórtico Rolante Manual - Arranjo Geral
BRC-801	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Barragem - Rede de Distribuição - 15 kV - Subestação - 45 kV - Iluminação
BRC-802	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Tomada D'Água/ Desc. De Fundo - Iluminação - Seções
BRC-901	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Cronograma Básico de Construção da Obra
BRC-902	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Localização do Canteiro de Obras - Planta
Curva de Permanência de Vazões - Fig. 5	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Curva de Permanência Comparativa Entre Dados Utilizados no Estudo Hidrológico
cw002a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Planejamento Construtivo - Canteiro de Obras e Estradas de Serviço
cw003a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído" "Desvio do Rio - 1a Fase - Ensecadeiras e Canal de Desvio - Plantas e Cortes
cw005a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada

Código	Discriminante
	D'Água/Descarregador de Fundo - Escavação - Planta e Seções
cw006a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedor-Escavação - Seções e Detalhes
cw007a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedor - Escavação - Planta e Cortes
cw101a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Formas - Plantas, Cortes e Vista
cw102a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Elev. 1248,30 a 1250,90 - Armadura - Folha 1/3
cw103a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Elev. 1248,30 a 1250,90 - Armadura - Folha 2/3
cw104a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Elev. 1248,30 a 1250,90 - Armadura - Folha 3/3
cw105a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundos - Galerias - Módulos 1 a 9 - Formas - Cortes e Detalhes
cw106a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Armadura - Módulo 1 - Tipo
cw107a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Armadura - Módulos 2 - 3 - 4 e 7 - Tipo 2
cw108a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Armadura - Módulos 5 e 6 - Tipo 3

Código	Discriminante
cw109a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Junção vertedouro/Descarregador de Fundo - Formas
cw110a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Junção - Vertedouro/Descarregador de Fundo - Armadura - FL 02/02
cw111a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedouro - Módulos M1 a M23 - (23X) - Formas
cw112a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedouro - Módulo M-25 - Bacia de Dissipação - Formas
cw113a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedouro - Módulos M1 a M24 - (24x) - Armadura
cw114a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Armadura - Módulo 9 - Tipo 1
cw115a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Junção Vertedouro/Descarregador de Fundo - Armadura - FL 01/02
cw116a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Galerias - Bases - Instrumentação - Detalhes - Formas - Armadura
cw117a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Armadura - Módulo 8 - Tipo 1
cw118a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedouro - Modul M-25 - Armadura
cw119a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-

Código	Discriminante
	Vertedouro - Bacia de Dissipação - Armadura - FL 01/02
cw120a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Vertedouro - Bacia de Dissipação - Armadura FL 2/2
cw121a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Descarregador de Fundo - Caixa de Válvulas - Caixa Dissipadora
cw122a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Descarregador de Fundo - Calhas C1 C2 e C3 - Armadura
cw123a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Descarregador de Fundo - Trecho Blocos de Ancoragem - Armadura
cw124a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Descarregador de Fundo - Caixa Dissipadora
cw125a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Vertedouro - Ogiva - Muros Alas - Direita e Esquerda - Formas - FL 1/2
cw126a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Descarregador de Fundo - Calhas C1 C2 e C3 - Formas
cw127a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído" - Corrompido
cw128a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Armadura - Nível 1267,60
cw129a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"- Vertedouro - Ogiva - Muros Alas - Direita e Esquerda - Formas - FL 2/2

Código	Discriminante
cw130a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedouro - Ogiva - Armadura
cw131a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedouro - Muros Alas - Direita e Esquerda - Armadura
cw133a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído "-Barragem de Terra - Sistema de Filtros e Drenagem - Caixa de Controle/Caixa de Passagem
cw134a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído "-Corrompido
cw135a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído "-Corrompido
cw136a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Drenagem da Caixa de Registro - PV-1 PV-2 PV-3 e PV-4 - Armadura
cw137a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Descarregador de Fundo - Passarela de Acesso - Pórticos - Armadura
cw138a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Vertedouro - Bacia de Dissipação - Drenagem Superficial - Caixa de Passagem - Formas/Armadura
cw201a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Grades - Peças Fixas no Concreto Primário
cw202a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Comporta Ensecadeira - Peças Fixas no Concreto Primário

Código	Discriminante
cw203a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Comporta Vagão - Peças Fixas no Concreto Primário
cw204a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Conduto Forçado - Ancoragem do Conduto do Concreto
cw205a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água - Pórtico Rolante - Peças Fixas no Concreto Primário
cw206a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Condutos e Válvulas - Arranjo-Planta e Detalhes
cw207a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Condutos e Válvulas - Cortes
cw208a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Condutos e Válvulas - Arranjo-Planta, Cortes e Detalhes
cw214a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Grade - Arranjo Geral
cw215a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Comporta Vagão - Arranjo Geral
cw216a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Tomada D'Água/Desc. De Fundo - Comporta Ensecadeira - Arranjo Geral
cw217a1x	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó) Projeto "Como Construído"-Pórtico Rolante Manual - Arranjo Geral
DD778_021A_CP_RE _Alteam NA Cipo_Rel Final	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Projeto de Viabilidade Técnica para Alteamto do Nível Normal do Reservatório

Código	Discriminante
	da barragem do Cipó e Ampliação das Usinas Bortolan e Vêu das Noivas
DD778_021A_CP_RE _Alteam NA Cipo_Rel Final	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Projeto de Viabilidade Técnica para Alteamto do Nível Normal do Reservatório da barragem do Cipó e Ampliação das Usinas Bortolan e Vêu das Noivas
DD778_OR_CP018A_ Or+°am Alteam NA - Alter A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Estudo de Viabilidade de Alteamto do NA do Reservatório da Barragem do Cipó - Orçamento da Alternativa A
DD778_OR_CP019A_ Or+°am Alteam NA - Alter B	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Estudo de Viabilidade de Alteamto do NA do Reservatório da Barragem do Cipó - Orçamento da Alternativa B
DD778_OR_CP020A_ Or+°am Alteam NA - Alter C	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Estudo de Viabilidade de Alteamto do NA do Reservatório da Barragem do Cipó - Orçamento da Alternativa C
DM778_CP-00- 002A1A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Alteamto do Vertedouro - Estudos de Casos - Planta - Seção Típica e Detalhes
DM778_CP-00- 002A1A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Alteamto do Vertedouro - Estudos de Casos - Planta - Seção Típica e Detalhes
DM778_CP-00- 003A1A Layout1 (1)	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Alteamto do Vertedouro - Estudos de Casos - Planta - Seção Típica e Detalhes - Caso C (0,60 m)
DM778_CP-00- 003A1A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Alteamto do Vertedouro - Estudos de Casos - Planta - Seção Típica e Detalhes - Caso C (0,60 m)
DM778_CP-01- 001A1A_LOC- BARRAGENS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Mapa de Localização das Barragens
DM778_CP-03- 001A1A2	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Localização dos Postos Fluviométricos, Precipitação e Base Geológica - Planta



Código	Discriminante
DM778_CP-03-002A1A DME Layout1 (1)	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Filtro Vertical - Alçamento do Filtro - Planta
DM778_CP-03-002A1A DME	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Planta Geral da Barragem - Planta
DM778_CP-03-002A1A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Filtro Vertical - Alçamento do Filtro - Planta
DM778_CP-03-002A1A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Filtro Vertical - Alçamento do Filtro - Planta
DM778_CP-03-003A1A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Filtro Vertical - Alçamento do Filtro - Seção Típica e Detalhe
DM778_CP-03-003A1A	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Filtro Vertical - Alçamento do Filtro - Seção Típica e Detalhe
DM778_CP-03-004A1A DME Layout1 (1)	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Planta Geral da Barragem - Planta
DM778_CP-03-004A1A DME	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Planta Geral da Barragem - Planta
Especificações Técnicas para Contratação de Fiscalização	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Especificações Técnicas para Contratação de Fiscalização e Laboratório para Acompanhamento das Obras
Estudos Hidrológicos	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Estudos Hidrológicos - Índice, Resumo e Capas
GALERIA 27122006	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Nivelamento dos Módulos da Galeria
histórico cotas cipox	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Histórico de Cotas 2001 a 2017
ÍNDICE ESPECIF. TÉCNICA PARA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Projeto Básico - Especificações Técnicas para Obras Civis
Leis Municipais	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Lei de Regulamentação do Uso e Ocupação do Solo da Área destinada à

Código	Discriminante
	implantação da Represa "Ribeirão Cipó" e dá outras providencias.
Lista de Equipamentos para Laboratórios	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Lista de Equipamentos de Laboratório de Solos para o Canteiro de Obras
Medições erivaldo 2 setembro 2009	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Nivelamento dos Marcos da Crista da Barragem
orçamento básico construção	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Projeto Básico - Orçamento Básico
Projeto Básico (Memorial Descritivo)	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Projeto Básico - Barragem do Ribeirão do Cipó - Volume I - Memorial Descritivo - Relatório Final
Projeto Básico_Memorial Descritivo	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Projeto Básico - Barragem do Ribeirão do Cipó - Volume I - Memorial Descritivo - Relatório Final
QUADRO4	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Áreas de Micro bacias e Fluviométrica Local
QUADROS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Curvas de Permanência
Relatório 1º Semetre 2009	Relatório Semestral de Monitoramento - Período: Janeiro a Junho/2009
Relatório Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)	Relatório Semestral de Monitoramento - Período: Janeiro a Junho/2008
Relatório Descritivo do Projeto	Projeto Barragem do Ribeirão Cipó – Relatório Descritivo do Projeto
Relatório	Relatório Semestral de Monitoramento - Período: Julho a Dezembro/2006
RelSem010605Cipó	Relatório Semestral de Monitoramento - Período: Janeiro a Junho/2005
RelSem010606Cip	Relatório Semestral de Monitoramento - Período: Janeiro a Junho/2006
RelSem010608Cip%F3	Relatório Semestral de Monitoramento - Período: Janeiro a Junho/2008

Código	Discriminante
RelSem071206Cipó	Relatório Semestral de Monitoramento - Período: Julho a Dezembro/2006
RelSem071207Cipó	Relatório Semestral de Monitoramento Período: Julho a Dezembro/2007
SECAO1 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção 1 -Escavação e Preparo de Fundações - ET - 1
SECAO2 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção 2 - Aterros - ET - 2
SECAO3 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção 3 - Concreto ET - 3
SECAO4 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção 4 - Embutidos e Elementos Metálicos Diversos - ET-4
SECAO5 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção 5 - Serviços Diversos - ET-5
SECAO6 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção 6 - Canteiro e Acampamento - ET-6
SECAO7 ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA OBRAS CIVIS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Seção 7 - Instrumentação da Barragem - ET-7
TABELA1	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Informações de Monitoramento do Reservatório 1976-1992
TABELA2	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Informações de Monitoramento do Reservatório Vazões por Anos Hidrológicos de 1936 a 1989
TABELA3	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Informações de Monitoramento do

Código	Discriminante
	Reservatório Vazões por Anos Hidrológicos de 1976 a 1989
TABELA4	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Informações de Monitoramento do Reservatório Vazões por Anos Hidrológicos de 1976 a 1989
TABELA5	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Informações de Monitoramento do Reservatório Vazões por Anos Hidrológicos de 1937 a 1992
TABELA6	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Informações de Monitoramento do Reservatório Vazões por Anos Hidrológicos de 1937 a 1989
TABELA7 ESTUDOS HIDROLÓGICOS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Informações de Monitoramento do Reservatório 1938 a 1992
TABELA8 ESTUDOS HIDROLÓGICOS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Vazões Regularizadas de 1938 a 1992
TABELA9 ESTUDOS HIDROLÓGICOS	Represa Lindolpho Pio da Silva Dias (Barragem do Cipó)-Vazões Regularizadas de 1938 a 1992