

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Delimitação de áreas inundadas por rompimento hipotético de barragem no município de Parauapebas/PA

Francisco Felix Siqueira Tarller
Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, ffelixsiqueira@yahoo.com

RESUMO: Neste artigo é apresentado o estudo de ruptura hipotética da barragem contenção de cheia do Igarapé Ilha do Coco, localizada no município de Parauapebas-PA, tendo como foco a caracterização da propagação da onda de cheia e delimitação das áreas potencialmente inundáveis à jusante. Para isso foi realizada a identificação do cenário de risco; levantamento dos dados da barragem, sua geometria, dados de escoamento e condições de contorno, construção das geometrias da barragem no software Qgis; ajuste dessa geometria no HEC-RAS; realização da simulação e análise dos resultados pelo HEC-RAS e a criação do mapa de inundação.

PALAVRAS-CHAVE: Desastre hidrológico, Inundação, Barragem, Modelagem, Hec-Ras.

ABSTRACT: This article presents the study of hypothetical failure of the flood arrest dam at Igarapé Ilha do Coco, located in the municipality of Parauapebas-PA, focusing on the characterization of flood wave propagation and delimitation of potentially floodable areas downstream. For this, the risk scenario was identified; survey of dam data, its geometry, flow data and boundary conditions, construction of dam geometries in Qgis software; adjustment of this geometry in HEC-RAS; simulation and analysis of results by HEC-RAS and creation of the flood map.

KEYWORDS: Hydrological Disaster, Flood, Dam, Modeling, Hec-Ras.

1 Introdução

No Brasil, as inundações cada vez mais frequentes e, de maiores magnitudes, especialmente nos centros urbanos, são indícios que os sistemas de drenagem não mais possuem capacidade de resposta aos eventos extremos (FURTADO, 2018). Eventos de inundações constituem desastres hidrológicos que ocorrem anualmente no município de Parauapebas, sudeste do estado do Pará.

A ocupação desordenada nas últimas três décadas proporcionou que áreas próximas às planícies de inundação do Igarapé Ilha do Coco, que corta os principais bairros do centro da cidade, fossem ocupadas. Diante disto, onde prejuízos e perigos afligem a população, foi criado um programa de saneamento, macrodrenagem e recuperação de igarapés, que conta a construção de uma barragem, com capacidade para armazenar 150.000 m³ de água, objetivando a contenção de cheias do Igarapé Ilha do Coco (Figura 1). Silva (2019), relata que a cota do reservatório será permanentemente mantida através da operação das comportas instaladas na barragem e vertedouro. Este equipamento deverá amortizar o maior fluxo nas épocas de cheia.

Para Ribeiro & Nick (2011), a construção dessas barragens para contenção de cheias vêm sendo utilizadas nos últimos anos com muitos casos de sucesso em diversas cidades que sofrem com os problemas das enchentes. De acordo com ICOLD (1995), 38% das rupturas acontecem durante o primeiro enchimento, sendo essa uma fase bastante crítica na qual a obra é posta em carga e testada.

Em face do cenário nacional, no qual as barragens demandam uma gestão de risco eficiente para mitigar e prevenir desastres, foi aprovada a Lei nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens. Em 2020 houve uma revisão desta lei, a Lei nº 14.066/2020, a qual prevê que as barragens com Dano Potencial Alto deverão ter um Plano de Ação de Emergência – PAE, que estabelece as ações a serem executadas em caso de situação de emergência (BRASIL, 2010). Para se definir essas ações, é necessário identificar áreas potenciais de risco em casos de acidentes. Nesse caso, incluem estudos de ruptura hipotética de barragem no intuito de avaliar o tempo de propagação da onda de cheia e as áreas mais atingidas.

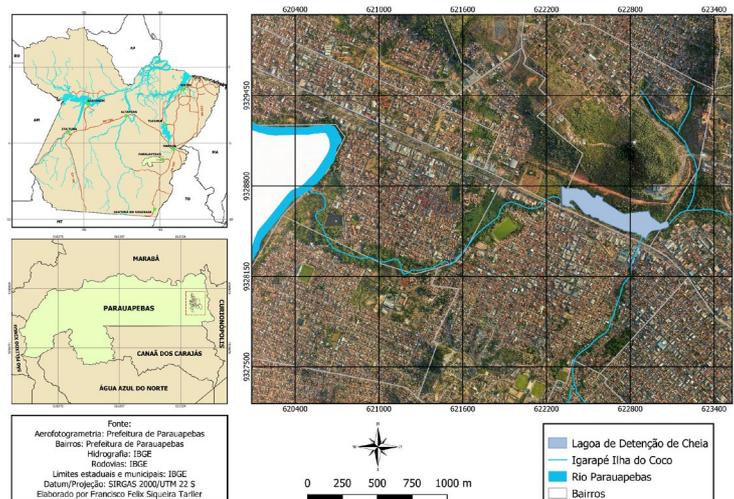


Figura 1 - Localização da barragem de contenção de cheias do Igarapé Ilha do Coco.

2 Metodologia

A metodologia de desenvolvimento deste estudo foi estruturada em cinco etapas: (i) caracterização da área de estudo, (ii) aquisição de dados topográficos e hidráulicos, (iii) estudo da bacia à montante e à jusante das barragens, (iv) modo de falha, (v) modelagem hidrodinâmica e, (vi) elaboração do mapa de inundação.

3.1 Caracterização da barragem

A barragem de contenção de cheia do Igarapé Ilha do Coco está localizada no Município de Parauapebas, estado do Pará. A barragem está em fase de construção, e contará com uma lagoa de detenção, que será implantada a montante da Rodovia PA-275, nas proximidades da prefeitura de Parauapebas (Figura 2). De acordo com o Estudo de Impacto Ambiental e Social – EIAS do projeto assinado por Silva (2019), a lagoa terá uma área alagada permanente de aproximadamente 9,76 hectares, mantida sempre na cota 149 m (maior cota atingida pelo rio Parauapebas, de acordo com dados históricos coletados), possuindo lâmina d'água média de 1 m com um volume estimado 100.000 m³. Porém com a revisão do projeto a cota da lagoa foi aumentada em 0,5 metros, assim, a lagoa será mantida na cota 149,5 m, uma lâmina d'água de 1,5 m, e volume de 150.000 m³ (Tabela 1). A manutenção desta cota será possível por meio da construção de uma barragem com vertedouro e poderá ser regulada a partir da operação das comportas nela instaladas.

Ainda de acordo com Silva (2019), a obra de controle de nível para a lagoa será construída uma barragem, à jusante da Lagoa de Detenção, em estrutura mista de concreto armado e pedra argamassada. Nela será instalado um vertedouro, para manutenção do nível da lagoa na cota 149,5 m, com extensão de 76,5 m e altura de 3,50 m, projetado para possibilitar a passagem de uma vazão de projeto de 326,18 m³/s, considerando uma recorrência de 50 anos. Haverá também na barragem 14 comportas, operadas manualmente para regulagem de vazão e descarga da lagoa. Estas comportas serão acionadas por volantes, instalados na laje de cobertura do vertedouro. As 14 comportas abertas liberam juntas uma vazão de 37,21 m³/s, quando a vazão do igarapé superar esta o excedente de escoamento passará sobre a barragem, sem que prejudique sua estrutura. Em períodos normais, deve-se deixar 6 comportas abertas, para que se mantenha a vazão natural do rio.



Tabela 1- Características da Barragem de Detenção de Cheia do Igarapé ilha do Coco.

Barragem do Igarapé ilha do Coco	
Comprimento do coroamento (m)	172,14
Altura (m)	7,5
Cota da Crista (m)	153
Largura da Crista (m)	3,5
Talude de Montante	
Talude de Jusante	
Início das Obras	2021
Fim das Obras	*
Vertedouro da barragem	
Comprimento (m)	76,5
Altura (m)	3,5
Nº de comportas	14
Vazão (m ³ /s)	37,21
Reservatório do Igarapé Ilha do Coco	
Área do Reservatório (ha)	9,76
Volume (m ³)	150.000
Cota do N.A. máximo (m)	149,5
Vazão Regularizada (m ³ /s)	326,18



Figura 2 - Localização da barragem e trecho do Igarapé Ilha do Coco a jusante da barragem.

Fonte: Consórcio Quanta/Sawaki (2018) apud Silva (2019).

3.2 Aquisição de dados topográficos e hidráulicos

Os dados utilizados na modelagem consistem em informações da geometria do rio e do fluxo de água do canal. As bases topográficas para geração da mancha de inundação foram disponibilizadas pela prefeitura de Parauapebas com resolução de 10 cm, proveniente de restituição LiDAR, do ano 2018. A geometria do rio foi construída a partir do Software ArcGis versão 10.1 e do HEC-GeoRAS. Os coeficientes de Manning foram escolhidos com base nos dados obtidos no Estudo de Impacto Ambiental e Social – EIAS do projeto da barragem. Para as planícies de inundação do lado esquerdo, do lado direito e para o canal, o valor escolhido foi igual a 0,035 m^{1/3}s⁻¹, sendo que esses valores foram distribuídos ao longo de toda a área de estudo.



3.3 Estudo da bacia à montante e à jusante da barragem

Os dados da bacia do Igarapé Ilha do Coco foram obtidos através do Estudo de Impacto Ambiental e Social – EIAS (SILVA, 2019). Trata-se de uma bacia hidrográfica de contribuição de aproximadamente 128,12 km² e uma extensão de talvegue de 27 km, é a principal artéria fluvial urbana do Rio Parauapebas (Figura 3).

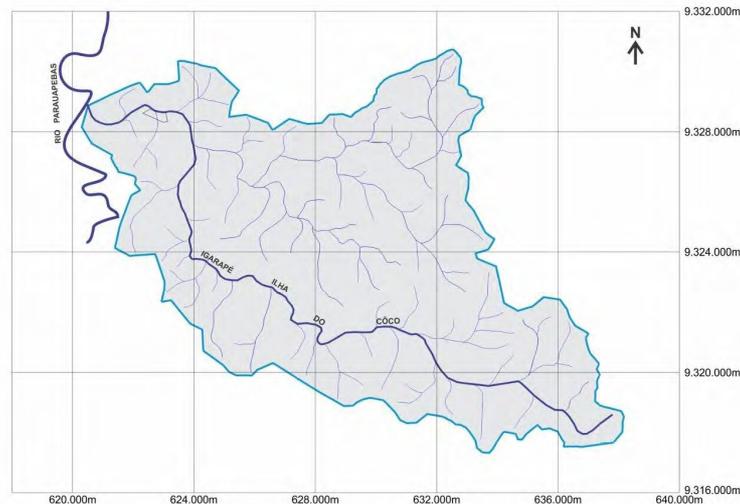


Figura 3 - Bacia Hidrográfica Contribuinte ao Igarapé Ilha do Coco.
 Fonte: Silva, 2019

Nos estudos da bacia elaborado por Silva (2019), considerou-se a bacia do igarapé Ilha do Coco constituída por duas sub-bacias: sub-bacia 1 (bacia de drenagem a montante da lagoa de retenção) e sub-bacia 2 (bacia de drenagem a jusante da lagoa de retenção) para melhor análise de caracterização da região de estudo. As informações sobre cada sub-bacia podem ser vistas a seguir na tabela 2.

Tabela 2 - Características das Sub-bacias.

BACIA 1 (a montante da lagoa)	
Área da bacia de contribuição (ha)	12.452,18
Comprimento do talvegue (km)	23,93
Declividade equivalente	4,137
% Área impermeável	20,07%
BACIA 2 (à jusante da lagoa)	
Área da bacia de contribuição (ha)	359,56
Comprimento do talvegue (km)	2,855
Declividade equivalente	0,701
% Área impermeável	17,60%

3.4 Modo de falha

Dentre todos os modos falhas, o enfoque no referencial será dado ao galgamento; erosão interna (também conhecida como *piping*); falhas nas fundações; e falhas no projeto, construção ou operação.

3.4.1 Galgamento (*overtopping*)

O galgamento é uma das maiores causas de ruptura de barragens no mundo inteiro. Esse fenômeno se dá quando o nível d'água no reservatório se eleva acima da cota da crista da barragem (normalmente devido a chuvas intensas), produzindo arraste de materiais com posterior ruptura em casos de barragem de terra e em barragens de concreto produz uma sobrecarga que pode submetê-la a ruptura (BRASIL, 2012). Segundo Jónatas (2013), galgamento em barragens de terra causa o corte em profundidade do coroamento e a erosão do



material do talude de jusante produzindo à formação de uma área frágil fazendo que a barragem colapse localmente, podendo o processo de corte em profundidade evoluir até atingir a base da barragem. Ele diz ainda que, a localização da área frágil é incerta, mas é de prever que a ruptura inicie na área central da barragem porque geralmente é nela que o escoamento se concentra.

3.4.2 Erosão interna (*piping*)

A erosão é a maior causa de rompimento de barragens, sendo que, a maior contribuição de dados para análise de barragens que sofreram erosão interna foram barragens antigas e barragens de pequeno porte com defeitos de construção (SHERARD et al. 1963). O *piping* ocorre quando a água se infiltra pelo solo compactado ou pela fundação gerando forças erosivas que puxam as partículas do solo através da percolação da água formando um tubo ou um canal no interior da barragem. O canal aumenta suas dimensões à medida que a água percola pelo solo compactado incrementando o caudal e a força erosiva fazendo que o canal ganhe maiores dimensões ocasionando a ruptura da barragem (SHERARD et al. 1963; JÓNATAS, 2013).

3.4.3 Falhas na fundação

O terreno na qual está apoiada a barragem e sua ligação podem deslizar sob o efeito das acomodações geológicas, ocasionando o enchimento do reservatório ou da saturação do material da fundação por infiltração. Também podem acontecer por meio das cheias extraordinárias, pois quando a água passa sobre a barragem, há uma erosão na base da estrutura, podendo levá-la ao colapso (COLLISCHONN, 1997).

3.4.4 Falhas no projeto, na construção ou na operação

Por ser uma obra de grande porte e complexa, barragens exigem critérios de segurança bem rígidos durante todas as fases. Dentre as falhas dessa natureza, segundo Lauriano (2009), pode-se citar:

- a) Projetos de vertedouros com capacidade inferior às cheias de maior magnitude;
- b) Falhas nos procedimentos de sondagem;
- c) Utilização de materiais de má qualidade;
- d) Execução inadequada de drenagem, ancoragem, compactação, limpeza e tratamento da fundação;
- e) Desobediência às regras de manutenção;
- f) Falta de manutenção correta; e
- g) Falhas na instalação e registro da instrumentação.

3.5 Modelagem hidrodinâmica

Foram utilizados alguns softwares na elaboração do modelo de inundação como: O Hec-Ras, um programa de análises hidráulicas capaz de trabalhar em regime permanente, análise unidimensional e bidimensional de regime não permanente, transporte de sedimentos e qualidade da água (BRUNNER, 2014). O ArcGIS é uma solução de análise e mapeamento utilizado para criar mapas e analisar dados. A partir do ArcGIS foi utilizado a extensão HEC-GeoRAS, um conjunto de procedimentos, ferramentas e utilitários para processamento de dados geoespaciais usando uma interface gráfica de usuário. A interface permite a elaboração de dados geométricos para importação no HEC-RAS e processa resultados de simulação exportados do HEC-RAS. Finalmente foi utilizado o Qgis para confecção do mapa de inundação.

Morris (2000) apud Lauriano (2009), apontam que o objetivo de se utilizar um modelo hidrodinâmico de propagação de um hidrograma de ruptura é simular o movimento da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem. As informações fundamentais em qualquer ponto de interesse na área de inundação são:

- O tempo de chegada da onda de ruptura;
- O tempo de chegada do nível de água máximo atingido;
- As profundidades e velocidades da onda, para diferentes seções de interesse do vale a jusante; e
- A duração da inundação.

O resultado obtido na simulação pode ser influenciado por diversos fatores, tais como: hipóteses adotadas, esquemas numéricos de resolução, condições de simulação (iniciais e de contorno) e dados de



entrada (VISEU & RAMOS, 1999). Os modelos para simulação do escoamento podem ser classificados em cinco tipos, por ordem crescente de precisão:

- Modelos simplificados;
- Modelos hidrológicos;
- Modelos hidrodinâmicos unidimensionais (1D);
- Modelos hidrodinâmicos bidimensionais (2D); e
- Modelos físicos tridimensionais (3D).

Segundo Morris e Galland (2000), os modelos hidrodinâmicos unidimensionais são os indicados para a maioria dos casos, pois possuem uma interface mais simples de utilização e uma boa precisão de resultados.

3.6 Mapa de inundação

O mapa de inundação é baseado em simulações hidráulicas da propagação da onda de ruptura, pelo vale a jusante da barragem objeto de estudo, realizadas a partir do software HEC-RAS 5.0.3. A criação da mancha de inundação foi feita através de uma ferramenta chamada RAS Mapper, logo após a criação de um arquivo .flt para representar o terreno existente na ferramenta. Após a finalização da mancha foi exportada para o software QGIS, onde foi finalizado.

4 Resultados e Discussão

Para a realização deste trabalho optou-se pela modelagem unidimensional (1D) por possuir uma interface mais simples e uma boa precisão de resultados. Após todo o processamento tanto no ArcGIS, através do HEC-GeoRAS, quanto no HEC-RAS, a geometria final para a análise está presente na Figura 4.

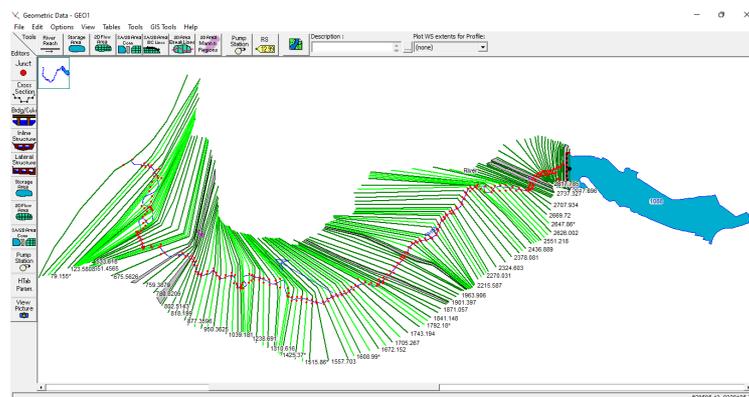


Figura 4 - Geometria finalizada no HEC-RAS.

3.4 Cenário de Ruptura

Segundo Meneses (2016) a ruptura de barragens pode ocorrer por diversas causas como galgamento, *piping*, deslizamento, dentre outras. Uma análise publicada no Boletim 99 do ICOLD (1995), concluiu que barragens de terra são mais susceptíveis à ruptura por galgamento e as de concreto por erosão interna.

Segundo Xiong (2011), caso o vertedor da barragem tenha sido dimensionado para a cheia máxima provável, tendo capacidade adequada para evitar o rompimento da barragem por galgamento, pode-se analisar apenas o cenário de ruptura por percolação, como é o caso da barragem do Igarapé Ilha do Coco. Por esse motivo, optou-se pelo *piping* como modo de ruptura para a simulação de rompimento da barragem.

Para o estudo da ruptura hipotética da barragem, considerou-se o reservatório em configuração operacional com nível d'água na cota 149,5 m (nível máximo normal) e que todo o volume de armazenamento correspondente, de 150.000 m³, seria propagado pela calha a jusante. Foi considerado para a simulação de ruptura da Barragem os tempos de formação da brecha de 6,5h. Para a simulação deste cenário, partiu-se de uma condição inicial correspondente a um dia seco, em que o reservatório da barragem do Igarapé ilha do Coco encontrar-se-ia com nível d'água igual ao nível máximo normal. Os parâmetros utilizados na simulação



e os resultados obtidos são resumidos na Tabela 3. Na figura 5, são apresentados o mapa de inundação da barragem, assim como os resultados obtidos na simulação.

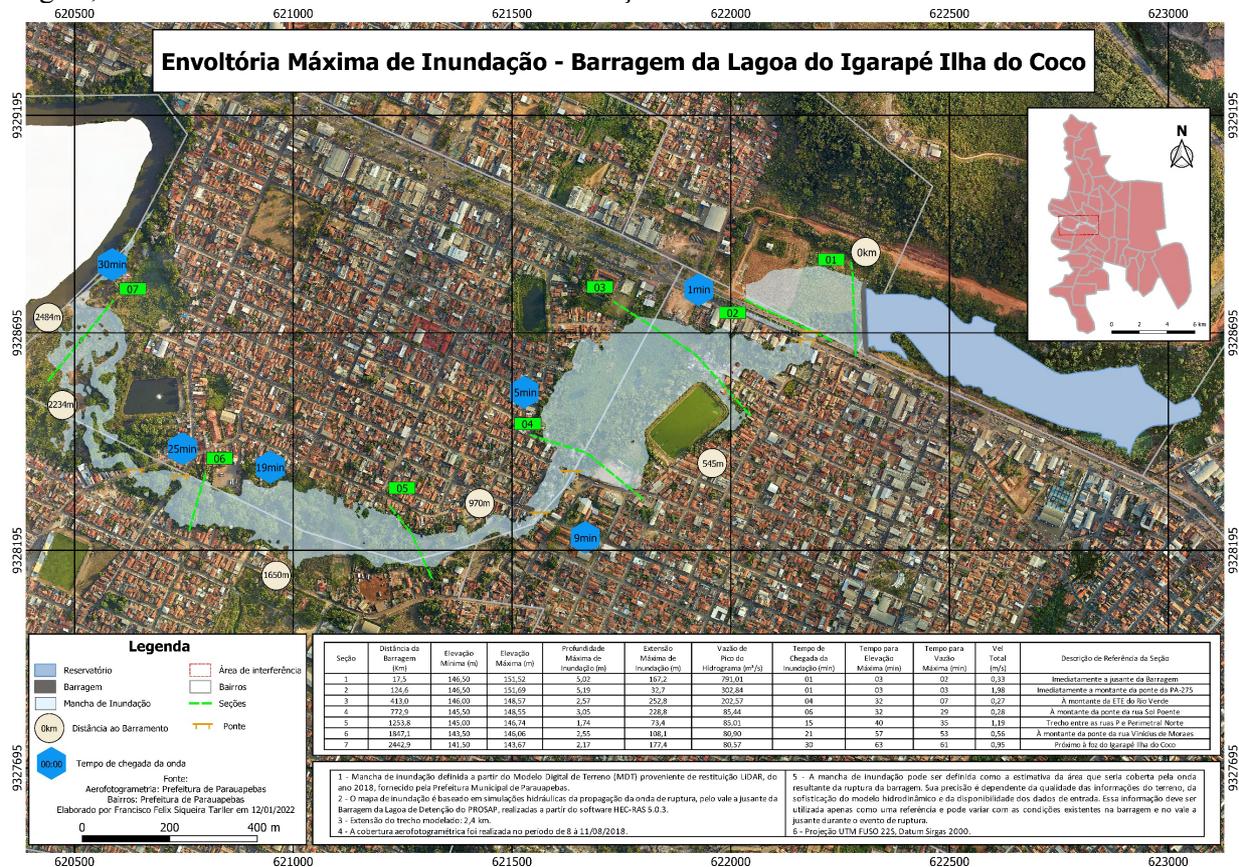


Figura 5 - Mapa de inundação da barragem de retenção de cheia do Igarapé Ilha do Coco.

4 Conclusão

A bacia hidrográfica do Igarapé Ilha do Coco é uma das regiões que apresenta os maiores riscos à cidade de Parauapebas, consequência de um processo de ocupação desordenada (SILVA, 2019). A barragem, foco deste estudo, tem como objetivo a diminuição das inundações que ocorrem, principalmente, na região central do município de Parauapebas. Para o estudo, foram utilizados softwares para auxiliar na construção da geometria e na simulação da propagação da onda de cheia, entre eles o ArcGis, com auxílio do HEC-GeoRAS e o HEC-RAS. Para obter os dados da geometria, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação com resolução de 10 cm. Neste último, foi definido o alinhamento do rio à jusante da barragem, e definidas as seções transversais. Exportando os dados do ArcGis para o HEC-RAS, além da finalização da geometria, foram inseridos os dados da barragem, do seu reservatório, os coeficientes de Manning, e as condições de contorno e condições iniciais.

O estudo foi realizado analisando um cenário de ruptura por *piping* como cenário mais provável para ruptura de barragem de concreto. Como resultado, os valores da simulação se apresentaram satisfatórios, porém instáveis, como consequência dos dados não tão precisos quanto o necessário. Com o mapa de inundação gerado, notou-se que áreas próximas a várzea do Igarapé ilha do Coco serão atingidas pela onda de inundação consequente do rompimento hipotético da barragem, áreas essas com concentração populacional e de edificações. Observou-se também que a região logo a jusante da área de estudo será atingida pela máxima elevação da cheia aproximadamente nos primeiros três minutos após a formação total da brecha e as áreas próximas à confluência com o rio Parauapebas levarão 63 minutos para ser atingido pela máxima elevação da onda, havendo um tempo muito curto ou suficiente para aviso e evacuação dos habitantes da área.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Universidade Federal da Bahia – UFBA, pelo apoio na realização deste trabalho.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRASIL. Engecorps Engenharia. Agência Nacional de Águas (Org.). (2012) *Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigações de Campo Correlatas: Estudos de Ruptura de Barragens*. Brasília: Engecorps. 113 p.
- BRASIL. Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de informações sobre Segurança de Barragens. Diário Oficial da União. Brasília, DF.
- Brunner, G. (2014) *Using HEC-RAS for dam break studies*. Califórnia: Hydrologic Engineering Center. 74 p.
- Collinschon, W. (1997) *Análise do Rompimento Hipotético da Barragem de Ernestina* – RS. 214 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRS.
- Cunge, J. A.; Holly, F. M.; Verwey, A. (1980) *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Boston.
- Furtado A. P. F. V. (2018) *Plano de Segurança da Barragem de Contenção de Cheias do Córrego Bonsucesso Belo Horizonte/M*. Pós Graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará-IFCE.
- ICOLD – *International Commission on Large Dams*. Dam failures statistical analysis. Bulletin 99. Paris, 1995.
- Jónatas, R. J. L. (2013) *Rotura de barragens de aterro por galgamento- Ensaios experimentais com aterros homogêneos*. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia da Energia e do Ambiente, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Lauriano, A. W. (2009) *Estudo de Ruptura da Barragem de Funil: Comparação entre os modelos FLDWAV e HEC-RAS*. 251 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) UFMG.
- Menezes, D. S. A. B. (2016) *Classificação dos danos decorrentes da ruptura de barragens de acumulação de água. Estudo de caso: barragem de Santa Helena – BA*. Dissertação (Mestrado) – UFBA.
- Morris, M. W. (2000) *CADAM – Concerted Action on Dambreak Modeling* – Final Report, Jan.
- Morris, M. W.; Galland, J. C. *Dambreak Modeling - Guidelines and Best Practice*. CADAM Project.
- Ribeiro, L. B. F., Nick, P. L. L. (2011) *Requalificação Fluvial Parcial x Barragem de Controle de Cheias: Medidas de Mitigação para enchentes no perímetro urbano da cidade de Rezende*. Projeto de Graduação, Escola Politécnica UFRJ, Setembro.
- Sherard, James L et al. (1963) *Earth-Rock Dams- Engineering Problems of Design and Construction*. New York- Library Of Congress. 721 p.
- Silva, M. A. C. (2019) *Estudo de Impacto Ambiental e Social Projeto de Saneamento Ambiental, Macrodrenagem e Recuperação de Igarapés e margens do Rio Parauapebas/PA*. Parauapebas/PA.
- Xiong, Yi. (2011) *A Dam Break Analysis Using HEC-RAS*. *Journal Of Water Resource And Protection*. Mississippi, p. 370-379.
- Viseu, T.; Ramos, C. (1999) *Zoneamento Territorial e Critérios para Aplicação dos Modelos Hidrodinâmicos*, SEPREM, Madri.