



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

**ANÁLISE DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE BARRAGEM NO SEMIÁRIDO
PERNAMBUCANO**

**RECIFE
2018**

ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

ANÁLISE DO ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE BARRAGEM NO SEMIÁRIDO
PERNAMBUCANO

Monografia apresentada à Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Coorientador: Eng. Gastão Cerquinha da Fonseca Neto

RECIFE

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

R696a Rodrigues, Arivânia Bandeira.
Análise de rompimento hipotético de barragem no semiárido
pernambucano / Arivânia Bandeira Rodrigues. – Recife, 2018.
65f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.
Coorientador: Eng. Gastão Cerquinha da Fonseca Neto.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Barragens de Serrinha e Poço da Cruz. 3.
Rompimento de barragem. 4. Hec-ras. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva
Pereira (Orientador). II. Fonseca Neto, Gastão Cerquinha da
(Coorientador). III. Título.

624 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2018/ 61



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL

CANDIDATO: ARIVÂNIA BANDEIRA RODRIGUES

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: JAIME JOAQUIM DA SILVA PEREIRA CABRAL

Coorientador: GASTÃO CERQUINHA DA FONSECA NETO

Examinador 1: JOSÉ ALMIR CIRILO

Examinador 2: WASHINGTON MOURA DE AMORIM JUNIOR

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: ANÁLISE DE ROMPIMENTO HIPOTÉTICO DE BARRAGEM NO SEMI ÁRIDO PERNAMBUCANO

LOCAL: Centro de Tecnologias e Geociências – UFPE

DATA: 06/02/2018 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 11:00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____(deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) () aprovado(s) (nota > = 7,0), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **3,0 = < nota < 7,0**, será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota <3,0)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 06 de fevereiro de 2018

Orientador:

Coorientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato :

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil
Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº. Cidade Universitária. Recife-PE CEP: 50740-530.
Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219.

*Santo Anjo do Senhor, meu zeloso
guardador, se a ti me confiou a piedade divina
sempre me rege, guarda, governa, ilumina.*

Amém!

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter sido a minha fortaleza e guiado os meus caminhos.

Aos meus pais, pelo exemplo de luta, foça, coragem e pelo amor incondicional durante toda essa jornada na universidade.

Aos meus irmãos, primos, tios, avós pelo incentivo e o conforto quando precisei e demais familiares que formam um suporte fundamental para mim.

Aos meus pequenos, que sempre me fizeram transbordar de tanto amor.

Aos amigos, Alexandre, Diogo, Erinho, Fabiano, Geilson, Igor, Jacyara, Marcos, Maria Clara e muitos outros que a universidade me deu de presente e que sempre estiveram junto a mim.

A incrível família Prisma que me mostrou a união e como é possível superar qualquer barreira.

A equipe do Galpão de Recursos Hídricos e todos os professores em geral por todo conhecimento transmitido e dedicação.

Ao meu orientador Jaime Cabral e Gastão Cerquinha, pelo suporte, pelas suas correções e incentivos, além de todo o conhecimento adquirido que me tornaram quem sou.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigada.

RESUMO

As barragens foram fundamentais para o desenvolvimento da espécie humana, haja vista suas diversas finalidades. Porém, associadas a elas, temos vários riscos que devem ser avaliados, pois podem gerar consequências catastróficas, principalmente quando essas barragens se localizam a montante de regiões urbanizadas. Tendo em vista a segurança das pessoas, em consonância com a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), é necessário fornecer subsídios que auxiliem a elaboração de um PAE (Plano de Ações Emergenciais), cuja finalidade é a evacuação da população ribeirinha instalada e a minimização dos prejuízos associados no caso de ocorrência de ruptura de barragem. A fim de mensurar parâmetros de tempo de chegada da onda e altura de cheia, este trabalho simulou o rompimento hipotético da barragem de Serrinha II, localizada no município de Serra Talhada-PE, e da barragem de Poço da Cruz, no município de Ibimirim. Para a execução dos mapas de inundação, foram utilizadas informações de terreno obtidas do Programa Pernambuco Tridimensional, assim como formulado o hidrograma de rompimento com base no método do hidrograma triangular simplificado, proposto por Mascarenhas (1990). Também foi realizada a análise bidimensional através do programa HEC-RAS, versão 5.0.2 e 5.0.3. Verificou-se que as principais localidades afetadas seriam Tupanaci, distante 9,5km e Floresta, distante 63,5km da barragem da Barragem de Serrinha II e Ibimirim, distante 5km da Barragem Poço da Cruz. Os resultados mostraram que após o hipotético rompimento, o tempo de chegada do pico da onda de cheia levaria, respectivamente, 3 horas, 19 horas e 3 horas para atingir as cidades. As profundidades máximas de inundação obtidas nas cidades analisadas são 11,2m em Tupanaci, 11,9m em Floresta e 27,2m em Ibimirim.

Palavras-chave: Barragens de Serrinha e Poço da Cruz. Rompimento de barragem. Hec-ras.

ABSTRACT

The dams were fundamental for the development of the human species, in addition to its various purposes, but associated with them, we have several risks that must be evaluated since they can generate catastrophic consequences, especially when these dams are located upstream of urbanized regions. In view to the people's safety, in line with the National Dam Safety Policy (NDSP), it is necessary to provide subsidies that assist in the elaboration of a Emergency Action Plan (EAP), whose purpose is the evacuation of the riverside population installed and minimizing the associated losses arising from the event of a dam rupture. In order to measure parameters of wave's arrival time and flood height, this work simulated the hypothetical breakup of the Serrinha II dam, located in the city called Serra Talhada, in the state of Pernambuco (PE) and the dam of Poço da Cruz in the city Ibimirim. For the execution of the flood maps, land information obtained from the three-dimensional Pernambuco program was used, as well as formulated the breakwater hydrograph based on the simplified triangular hydrograph method, proposed by Mascarenhas (1990). Two-dimensional analysis was also performed through the HEC-RAS program, 5.0.2 and 5.0.3 version. It was found that the main affected localities would be Tupanaci, that is located in a distance of 9,5 km, and Floresta, distant 63,5km of the Serrinha dam and Ibimirim, distance of about 5km of the Poço da Cruz dam. The results showed that after the hypothetical breakup, the arrival time of the peak of the flood wave would take 3 hours and 19 hours to reach the cities. The maximum flood depths obtained in the analyzed cities are 11,2m in Tupanaci, 11,9m in Floresta and 27,1m in Ibimirim.

Keywords: Serrinha Dam and Poço da Cruz Dam. Dam break. Hec-ras.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Barragens classificadas pelas entidades fiscalizadoras, em 31 de dezembro de 2016.....	14
Figura 02 - Evolução do número de barragens classificadas, segundo seu uso principal.....	14
Figura 03 - Distribuição das Grandes Barragens por Área Geográfica.....	18
Figura 04 - Processo de Violação Exemplo para uma falha Piping	21
Figura 05 - Processo de Violação Exemplo de uma Falha Galgamento	22
Figura 06 - Instabilidade de taludes em barragem	23
Figura 07 - Barragens com Plano de Ação de Emergência (PAE), em 31 de dezembro de 2016	32
Figura 08 - Localização da Barragem de Serrinha	33
Figura 09 - Localização da Barragem de Poço da Cruz	35
Figura 10 - Histórico de volumes acumulados na Barragem de Serrinha II	38
Figura 11 - Histórico de volumes acumulados na Barragem de Poço da Cruz	39
Figura 12 - Método de determinação de hidrograma de ruptura segundo Mascarenhas (1990)	43
Figura 13 - Hidrograma hipotético de ruptura da barragem de Serrinha II	45
Figura 14 - Hidrograma hipotético de ruptura da barragem de Poço da Cruz.....	45
Figura 15 - Etapas de avanço da onda de cheia hipotética – Tupanaci	47
Figura 16 - Local de maior profundidade, Tupanaci.....	48
Figura 17 - Etapas de avanço da onda de cheia hipotética – Floresta	49
Figura 18 - Local de maior profundidade, Floresta	50
Figura 19 - Etapas de avanço da onda de cheia hipotética – Ibimirim	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Casos de ruptura de barragens no Brasil e impactos causados nos anos de 2014 a 2016	24
Tabela 02 - Quadro para Classificação das Barragens de Acumulação de Água.....	27
Tabela 03 - Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado	28
Tabela 04 - Ficha técnica da Barragem de Serrinha II	34
Tabela 05 - Ficha técnica da Barragem de Poço da Cruz.....	36
Tabela 06 - Distribuição média mensal dos volumes afluentes ao reservatório Serrinha II.....	37
Tabela 07 - Distribuição média mensal dos volumes afluentes ao reservatório Poço da Cruz....	37
Tabela 08 - Evaporação na superfície líquida da Barragem de Serrinha II	37
Tabela 09 - Evaporação na superfície líquida da Barragem de Poço da Cruz.....	38
Tabela 10 - Dados utilizados para o hidrograma de ruptura hipotético	44

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra a Seca
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center River Analysis System – Software de Análise Hidráulica Fluvial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD	<i>International Commission on Large Dams</i>
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
MDT	Modelo Digital de Terreno
PAE	Plano de Ações Emergenciais
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos do Estado de Pernambuco
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
UTM	Universal Transverse Mercator

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	16
1.2	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	HISTÓRICO DO USO DE BARRAGENS.....	18
2.2	TIPOS DE BARRAGEM	19
2.2.1	Tipos de Barragem de acordo com sua finalidade.....	19
2.2.2	Tipos de Barragem de acordo com seu projeto hidráulico	20
2.2.3	Tipos de Barragem de acordo com o material de composição	20
2.3	RUPTURA DE BARRAGENS.....	20
2.3.1	Modos de ruptura	21
2.3.1.1	Ruptura por <i>Piping</i>	21
2.3.1.2	Ruptura por Galgamento	22
2.3.1.3	Ruptura por instabilidade de taludes	23
2.3.2	Impacto da ruptura de barragens	23
2.4	GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS	26
2.5	POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	29
2.6	PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	30
2.7	PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL (PAE)	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	ÁREA DE ESTUDO	33
3.1.1	Barragem de Serrinha.....	33
3.1.2	Barragem de Poço da Cruz.....	35
3.1.3	Dados hidrológicos da barragem.....	37
3.2	MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO: HEC - RAS	39
3.3	DADOS REQUERIDOS PARA SIMULAÇÃO	40
3.3.1	Modelo Digital do Terreno.....	41
3.3.1.1	Pernambuco Tridimensional	41
3.3.2	Área de alagamento	42
3.3.3	Coeficiente de Manning.....	43

3.3.4	Hidrograma de ruptura	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	444
4.1	DETERMINAÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA.....	45
4.2	SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA	46
4.3	MANCHAS DE INUNDAÇÃO.....	46
5	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS	55
	ANEXOS	58

1 INTRODUÇÃO

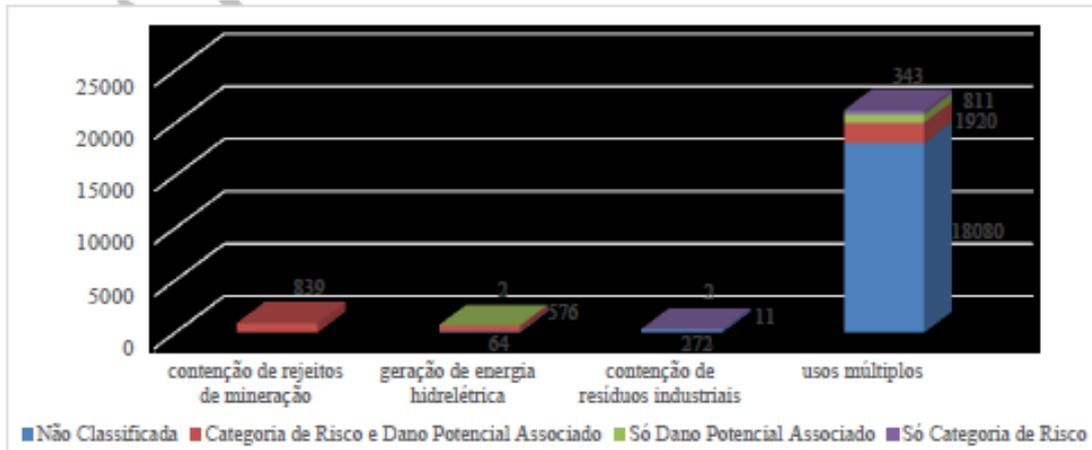
Barragens são estruturas destinadas à retenção de líquidos e sólidos, utilizadas sobretudo para o abastecimento de águas em zonas residenciais, agrícolas, industriais, produção de energia elétrica ou regularização de um caudal. Também tem seu uso relacionado a retenção de sólidos e rejeitos provenientes da atividade mineradora. Desde o início da civilização, as barragens foram fundamentais para o desenvolvimento da espécie humana. Porém, nos últimos 40 anos o Brasil tem participado intensamente da economia internacional, variando entre a oitava e a décima maior economia do mundo. As secas no Nordeste e o desenvolvimento do País foram os fatores determinantes para a implantação do grande número de barragens construídas desde a última década do século XIX (ANA, 2015).

A mais antiga barragem que se tem notícia em território brasileiro foi construída onde hoje é área urbana do Recife-PE, possivelmente no final do século XVI, antes mesmo da invasão holandesa. Conhecida presentemente como açude Apipucos, a barragem original foi alargada e reforçada para permitir a construção de uma importante via de acesso ao centro do Recife (CBDB, 2011).

Nenhuma forma de vida, animal ou vegetal, é possível sem água, razão porque esta é considerada um recurso de primeira necessidade. Nenhuma comunidade pode viver ou evoluir sem um abastecimento adequado de água, que permita aos seus habitantes viver de modo saudável e confortável, e que contribua para o desenvolvimento da sua economia. Assim, há mais de quatro séculos as barragens vêm propiciando benefícios à humanidade, como armazenar a água para ser utilizada quando for necessária à irrigação, no combate às secas para regiões com extensas e prolongadas estiagens, abastecimento de indústrias e cidades, navegação, produção de energia elétrica, controle de cheias, entre outros.

Diante disso, a Agência Nacional de Águas (ANA), em 2016, reportou 22.290 barragens cadastradas no Brasil (o RSB 2015 havia reportado 17.259 barragens). A situação atual da classificação das barragens, conforme os critérios da Resolução CNRH nº 143/2012 e demais critérios complementares editados pelas entidades fiscalizadoras, atendendo ao uso principal do reservatório, pode ser visualizada na Figura 1 (ANA, 2017).

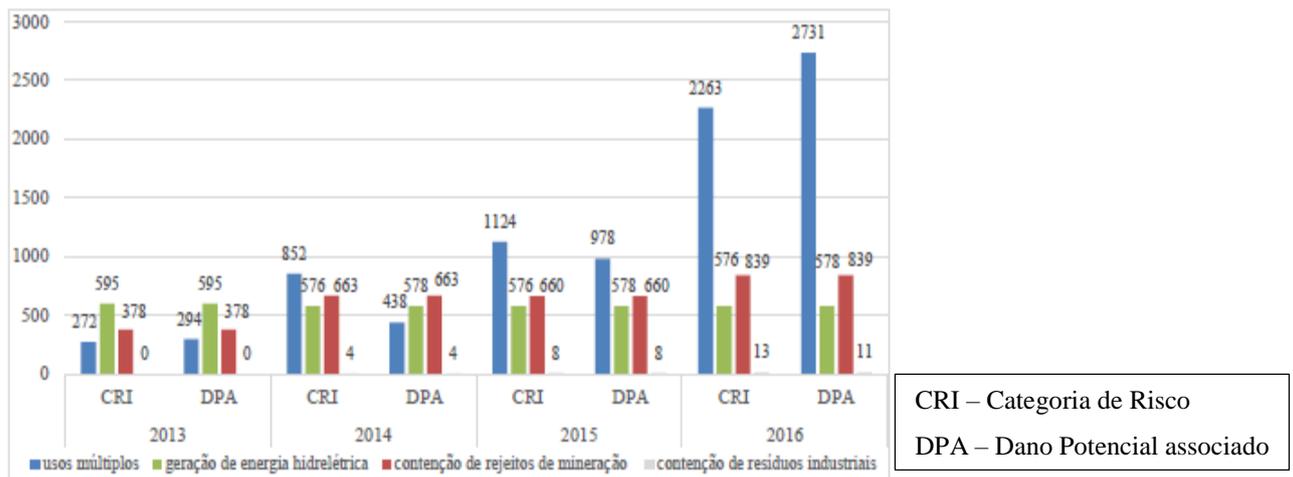
Figura 1 – Barragens classificadas pelas entidades fiscalizadoras, em 31 de dezembro de 2016.



Fonte : ANA (2017)

Houve evolução significativa no número total de barragens de usos múltiplos classificadas. Entretanto, verifica-se que cerca de 80% das barragens cadastradas ainda não possuem nenhum tipo de classificação. Na Figura 2 encontra-se a informação disponível relativa ao número de barragens classificadas, distribuídas por seu uso principal, após a publicação da Lei nº12.334/2010.

Figura 2 - Evolução do número de barragens classificadas, segundo seu uso principal.



Fonte : ANA (2017)

Dessa maneira, apesar das finalidades múltiplas mencionadas anteriormente, existe a possibilidade de ocorrência de ruptura de barragens, mesmo que com uma probabilidade muito baixa, podendo acarretar consequências catastróficas, principalmente quando essas se localizam a montante de regiões urbanizadas. Lauriano (2009) destaca que dentre os impactos causados

estão os econômicos e sociais diretos e indiretos, as consequências para o meio ambiente e a perda de vidas humanas, efeitos bastante significativos em todos os aspectos.

Como exemplo, podemos citar o colapso da Barragem de Vajont na Itália, cujo incidente não foi caracterizado como um evento de ruptura, pois a estrutura da mesma não entrou em colapso durante o evento crítico ocorrido no ano de 1963. Entretanto, o número de mortes ocorridas, devido à onda de cheia formada, pode ser descrito como um dos piores eventos de inundação ocorridos na Itália durante o século XX (DOOGE, 2004). Chuvas excepcionais elevaram repentinamente o nível do reservatório e verificou-se a existência de deslizamentos importantes e alarmantes nos taludes do reservatório. Um volume de 240 milhões de m³ do maciço rochoso envolvente ao reservatório deslizou na sua direção com uma velocidade de 30 m/s, provocando uma enorme onda que atingiu uma altura de 40m acima do anterior nível do reservatório. No mesmo instante uma onda galgou por cima a barragem, atingindo uma altura de 99m acima do coroamento. A área a jusante foi devastada e dois minutos após o início do deslizamento da massa rochosa uma onda de cerca de 70 m de altura atingiu a Vila de Longarone, situada à apenas 1,5 km a jusante da barragem, vitimando quase todos os seus habitantes em um breve intervalo de tempo de 15 minutos (SÓRIA, 2013).

Outro caso que pode ser citado foi o risco de colapso da barragem de Oroville, na Califórnia, que fez com que ao menos 188 mil pessoas deixassem suas casas em fevereiro de 2017. O Departamento de Recursos Hídricos da Califórnia chegou a informar no Twitter por volta das 16h30, no horário local, que era previsto que o vertedouro próximo à represa "falhasse na próxima hora". Helicópteros passaram a jogar rochas em uma fenda aberta em um muro de contenção do vertedouro em uma tentativa de evitar que a água escapasse. As autoridades também liberaram água para diminuir o nível do lago após semanas de fortes chuvas no Estado. O governador da Califórnia, Jerry Brown, emitiu uma ordem de emergência do estado para ajudar as autoridades locais com a situação de emergência e as evacuações. Centros de acolhida foram montados, mas as estradas que saem de Oroville, que tem mais de 16 mil habitantes, ficaram congestionadas segundo o site G1 no mundo da Rede Globo.

As causas de rupturas de barragem são as mais diversas, podendo ser motivadas por fenômenos naturais ou provocadas por ação humana, sendo consequência de um fator isolado ou pela combinação de mais de um (MASCARENHAS, 1990). Segundo Collischonn (1997), o tipo de barragem influencia na causa da ruptura, sendo as barragens de terra mais sensíveis ao galgamento (overtopping), em cheias maiores que as de projeto, quando o vertedouro não é

suficiente. Os problemas de infiltração também são importantes, gerando brechas que se iniciam como pontos de vazamento e crescem a partir do ponto de surgimento (piping).

Com esse contexto, torna-se relevante desenvolver estudos que possibilitem a melhor caracterização desses cenários, com outras técnicas de análises complementando as tradicionais propostas pela engenharia, tanto em termos da avaliação do risco, como no que se refere ao conhecimento e à caracterização de suas consequências. Para uma boa construção e manutenção de barragens é necessário uma equipe multidisciplinar para que sejam analisados diversos fatores como os sociais, topográficos, geológicos, geotécnicos, porém ao decorrer desse trabalho estaremos analisando apenas no âmbito hidráulico. Alguns países exigem, sob a forma da lei, que nos projetos de construção de barragens de médio e grande porte sejam incluídos estudos visando a elaboração do Plano de Ações Emergenciais (PAE) para a evacuação da população ribeirinha instalada a jusante e minimização dos prejuízos associados no caso de ocorrência de ruptura de barragem localizada a montante.

Os estudos de casos terão como referência o Açude Serrinha II, comumente conhecido como “barragem de Serrinha”, situado no município de Serra Talhada, Pernambuco, tendo como Bacia Hidrográfica Estadual a Bacia do Rio Pajeú e o açude Engenheiro Francisco Sabóia também conhecido como barragem de Poço da Cruz, situado no município de Ibimirim na bacia do Rio Moxotó. Será feito uso do software “HEC-RAS”, desenvolvido pelo Corpo de Engenharia do Exército Norte Americano amplamente utilizado em análises de propagação de ondas de cheia.

1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

No Brasil, assim como no exterior, o número de barragens rompidas nos últimos anos vem confirmando a necessidade de estudos dos sistemas de alerta, legislações, planejamento e tecnologias adequadas para as construções a fim de avaliar e traçar planos de redução dos danos ocasionados por uma possível ruptura do maciço, por exemplo. Somente no século XX foram registrados no mundo cerca de 200 acidentes graves. Em barragens com altura superior a 15 metros, que causaram a morte de mais de 8.000 pessoas e deixaram outros milhares desabrigados.

O rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, localizada em Mariana, na região central de Minas Gerais, teve forte influência para a importância desse tema, sendo considerado um dos maiores desastres ambientais da história do Brasil. O rompimento desta barragem

chegou a liberar 55 milhões de m³ de lama, provocando 19 mortes como também causou sérios impactos à vegetação nativa e à bacia do Rio Doce (LOPES, 2016).

Outro caso importante é a Barragem de Camará, que na noite do dia 17 de junho de 2004 se rompeu, levando desespero para os moradores das cidades de Alagoa Nova, Alagoa Grande, Areia e Mulungu, lançando em torno de 17 milhões de metros cúbicos de água, causando devastação e inundação das ruas da parte baixa desses municípios, e um saldo de mais de 800 famílias desabrigadas. A mesma foi reconstruída com um benefício previsto para mais de 225 mil habitantes e de 21 localidades da região do Brejo Paraibano, com capacidade de armazenamento de aproximadamente 26 milhões de metros cúbicos de água, segundo informações do site do Governo da Paraíba (2016).

1.2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é a analisar a propagação da onda de cheia decorrente da ruptura hipotética de barragens no Sertão Pernambucano, assim como abordar a gestão de riscos em barragens e exemplificar o grau de perigo o qual as comunidades afetadas pela ruptura de barragens estão sujeitas, considerando casos reais e simulação.

Como objetivos específicos, pode-se listar:

- Abordar a gestão de risco e incertezas associadas, além de mostrar a legislação brasileira na gestão de riscos em barragens.
- Breve revisão bibliográfica do processo de rompimento de barragens de terra e enrocamento.
- Simular o rompimento hipotético de duas barragens conhecidas e analisar hidrograma de ruptura, mancha de inundação com foco no tempo de chegada da onda de cheia em pontos ao longo do percurso e avaliação da cota máxima atingida pela onda de cheia nos municípios.

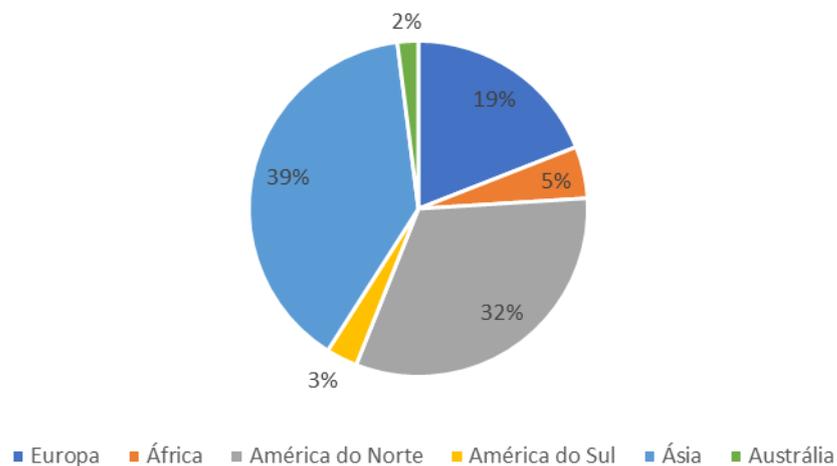
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HISTÓRICO DO USO DE BARRAGENS

Barragens são definidas como obstáculos artificiais com a capacidade de armazenar água, ou qualquer outro fluido, para fins de acúmulo ou controle. Uma das barragens mais antigas ainda em uso é uma barragem de terra e enrocamento construída em, aproximadamente, 1300 a.C., na área que hoje corresponde à Síria. Na China, um sistema de barragens e canais foi construído em 2280 a.C. e ainda estão em uso (CBDB, 2011).

A construção de barragens para os mais diversos fins teve um forte crescimento em todo o mundo a partir dos anos 50. Dos anos 1950 até os anos 2000 foram registrados cerca de 25.000 novos empreendimentos. Deste total, 7.511 barragens foram registradas na década de 70, que corresponde ao maior pico do período analisado. O continente asiático é o que detém a maior percentagem de barragens no mundo, com 39% do total mundial, seguido da América do Norte com 32% e da Europa com 19% (ICOLD, 2007). A Figura 3 a seguir apresenta a distribuição das grandes barragens por área geográfica.

Figura 3 – Distribuição das Grandes Barragens por Área Geográfica



Fonte : ICOLD (2007).

Em relação à função das barragens atuais no mundo, no Registro da Comissão Internacional de Grandes Barragens – CIGB, a maioria é de barragens de uso único, embora haja um número crescente (28,3%) de barragens de usos múltiplos. Hoje, a irrigação é a função

mais comum das barragens no Registro da CIGB. A distribuição entre as barragens de uso único é a seguinte :

- 48,6% para irrigação
- 17,4% para hidroeletricidade
- 12,7% para suprimento de água
- 10,0% para controle de enchentes
- 5,3% para recreação
- 0,6% para navegação e piscicultura
- 5,4% para outras funções.

2.2 TIPOS DE BARRAGEM

As barragens podem ser classificadas por ter diversas finalidades, servindo para navegações, turismo, hidrelétricas, contenção de águas e controle de enchentes, pelo seu projeto hidráulico e os materiais que são constituídas. A classificação de acordo com a finalidade é realizada definindo a barragem como sendo: de armazenamento, de desvio ou retenção. De acordo com seu projeto hidráulico, pode-se dividir as barragens em dois grupos principais : “barragens galgáveis” e “barragens não galgáveis”. A classificação por meio do material de sua composição é subdividida em: barragens de concreto, barragens de terra/enrocamento e barragem de rejeitos.

2.2.1 Tipos de Barragem de acordo com sua finalidade

Barragens de armazenamento são utilizadas para reter água, podendo assim variar em tamanho desde pequenos maciços de terra, usados frequentemente em fazendas, a enormes estruturas de concreto ou de aterro, geralmente utilizadas nos períodos de seca e estiagens (PET CIVIL UFJF, 2015).

Barragens de desvio são aquelas construídas para proverem, de água, os diques, canais ou outros sistemas de abastecimento, sendo assim mais usuais nos sistemas de irrigação e abastecimento da rede municipal e industrial (FRANCO, 2008).

As barragens de retenção são construídas com a finalidade de reter água, amortecendo a onda de cheias para evitar inundações, podem ser utilizadas também para a retenção de sedimentos ou resíduos industriais. No caso de amortecimento de cheias, a onda de cheia é

temporariamente armazenada, sendo posteriormente liberada, de tal modo que não cause danos a jusante (ASSIS et al, 2006)

2.2.2 Tipos de Barragem de acordo com seu projeto hidráulico

Segundo Bureau of Reclamation(1987) apud Moecke (2014) tem-se que as barragens galgáveis são aquelas projetadas para suportar a descarga de fluxo sobre sua crista ou vertedouro. Barragens com estrutura composta de concreto são comumente empregadas como barragens galgáveis. Já as barragens “não galgáveis” foram projetadas para manter borda livre (distância livre entre o nível de água e a crista da barragem) para todas as condições para qual foram projetadas. Este tipo de barragem geralmente é de terra ou de enrocamento.

2.2.3 Tipos de Barragem de acordo com o material de composição

As barragens podem ser classificadas em dois grandes grupos: as barragens de concreto são aquelas construídas essencialmente com materiais granulares produzidos artificialmente aos quais se adicionam cimento e aditivos químicos. Os tipos mais comuns são: barragem de concreto gravidade, barragem de concreto em arco e barragem de contrafortes.

As barragens de terra e/ou enrocamento são aquelas construídas com materiais naturais tais como argilas ou com materiais produzidos artificialmente tais como britas e enrocamentos, devendo possuir um elevado grau de estanqueidade e sistemas de extravasamento bem dimensionados que lhes confirmem elevados coeficientes de segurança. No caso de barragens de contenção de rejeitos, os próprios rejeitos podem ser utilizados como materiais de construção e, assim, estas estruturas são denominadas barragens de rejeitos.

2.3 RUPTURA DE BARRAGENS

O rompimento de barragens é uma modalidade de desastres consideravelmente recorrente tendo dois fatores principais como causa primária desse evento: a existência de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o mau planejamento dessa estrutura que independentemente de fatores externos entra em colapso em razão dos erros de cálculos dos engenheiros.

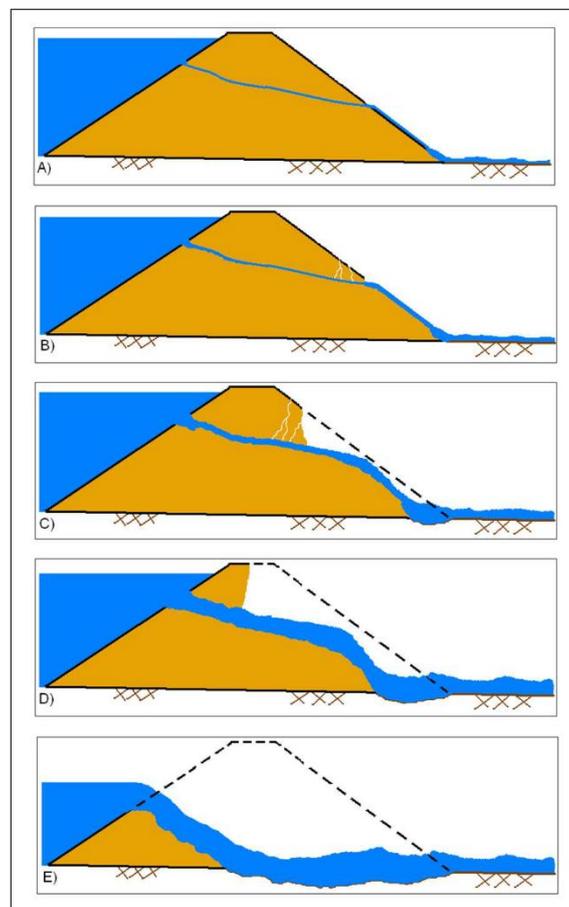
2.3.1 Modos de ruptura

A seguir serão apresentados os modos de ruptura mais comuns para rompimento de barragens: *piping*, galgamento e instabilidade de taludes.

2.3.1.1 Ruptura por *Piping*

A ruptura por falha estrutural ou “*piping*” produz-se por uma falha estrutural da barragem. No caso de barragens de terra ou enrocamento, essa falha ocorre quando existem infiltrações através do corpo da barragem, de tal modo que se produz uma erosão e arraste dos materiais, que acabam causando uma ruptura. A ruptura também pode ser ocasionada por erro na compactação do maciço da barragem, ou erro na escolha da faixa granulométrica e tipo de material criando-se um caminho para o fluxo de água, que acaba arrastando partículas de solo, progressivamente, resultando no fenômeno de *Piping*. No caso de barragens de concreto, a falha estrutural normalmente ocorre devido a problemas relacionados a deficiência do próprio concreto utilizado. (ANA, 2012). A Figura 4 mostra a evolução do processo de *piping*.

Figura 4 - Processo de Violação Exemplo para uma falha *Piping*

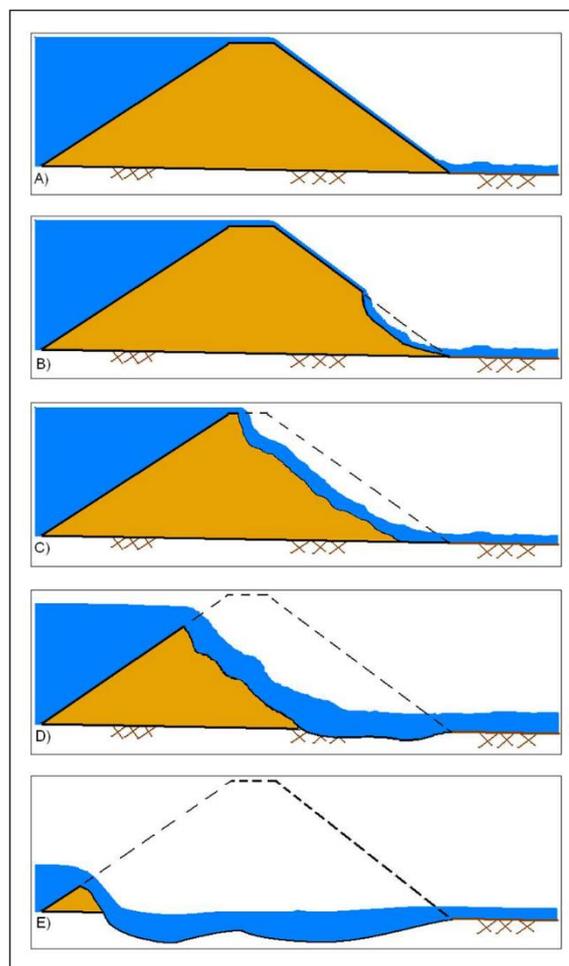


Fonte : USACE (2014)

2.3.1.2 Ruptura por Galgamento

A ruptura por galgamento ocorre quando o nível d'água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem. No caso das barragens de terra, o galgamento produz um arraste de materiais e a posterior ruptura. No caso das barragens de concreto, um galgamento não produz necessariamente uma ruptura, porém, as sobrecargas a que barragem pode ser submetida podem conduzi-la à ruptura. Normalmente, as rupturas por galgamento devem-se a chuvas muito intensas, que produzem cheias nos cursos fluviais superiores à capacidade do vertedouro. A Figura 5 ilustra o processo de rompimento por galgamento.

Figura 5 - Processo de Violação Exemplo de uma Falha Galgamento



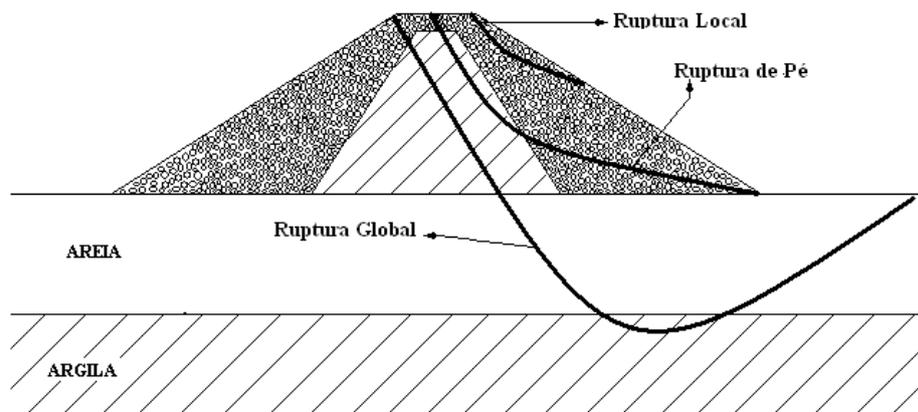
Fonte : USACE (2014)

2.3.1.3. Ruptura por instabilidade de taludes

Segundo Mendes (2016) além do *piping* e do galgamento, a instabilidade de taludes aparece como outro evento que pode levar ao colapso de uma barragem. A análise de instabilidade de taludes em barragens segue modelos consagrados, como Bishop e Morgenstern-Price, sendo o formato da superfície de ruptura dependente do tipo de material da fundação e do maciço. Em materiais mais coesivos, ela tende a ser mais circular, ao passo que em materiais com uma parcela de atrito mais significativa ela tende a ser mais planar (ASSIS, 2015). Assis (2015) cita três modos de ruptura quando à abrangência da superfície, conforme mostrado na Figura 6 :

1. Ruptura local: a linha de ruptura inicia na crista e percorre parcialmente o talude;
2. Ruptura de pé: a linha de ruptura inicia na crista e passa pelo pé do talude;
3. Ruptura global: a linha de ruptura atravessa também o material de fundação.

Figura 6 – Instabilidade de taludes em barragem



Fonte : Assis (2015)

2.3.2 Impacto da ruptura de barragens

Analisando os dados do RSB de ruptura de barragens apenas no Brasil nos anos de 2014 a 2016, exemplificados na Tabela 1, verifica-se a importância dos sistemas de alerta precoce, em prol da evacuação mais rápida dos locais atingidos e assim minimizar os danos ambientais e riscos de morte.

Tabela 1 - Casos de ruptura de barragens no Brasil e impactos causados nos anos de 2014 a 2016.

UF	Data	Nome da Barragem	Empreendedor	Entidade Fiscalizadora	Impactos Causados	Causa Provável
MT	22/02/14	Agropecuária Buritis	Agropecuária Buritis	SEMA-MT	Sem informação	Sem informação
GO	05/03/14	Fazenda Boa Vista do Uru	Sr. Roserval Alves Moreira	SEMARH-GO	02 vítimas fatais e número de pessoas afetadas não informado.	Erosão interna ou Galgamento
AP	29/03/14	UHE Santo Antônio do Jari	Energias do Brasil AS	ANEEL	04 vítimas fatais (operários atingidos pela cheia).	Galgamento
SC	27/06/14	Vacaro	Indústria de maçãs Vacaro	SDS-SC	Retirada preventiva de 30 famílias por parte da defesa civil	Galgamento
MG	10/09/14	B1 e B2	Mineradora Herculano	DNPM	03 vítimas fatais e total de 08 pessoas afetadas.	Erosão interna
MS	12/12/14	Pesque - Pague	Sem informação	IMASUL	Elevação da turbidez no rio, impossibilitando a captação de água afetando cerca de 14.000 pessoas.	Cheia
AP	07/05/15	UHE Cachoeira Caldeirão	EDP – Energias do Brasil AS	ANEEL	Inundação do município de Ferreira Gomes/AP.	Cheia
MT	06/06/15	PCH Inxu	Inxu Geradora e Comercializadora Energia Elétrica S/A	ANEEL	Rompimento do dique da câmara de carga e destruição parcial da casa de força.	Percolação de água pela fundação da estrutura de tomada d'água de alta pressão e pelo fluxo nos taludes laterais de escavação criados durante o período construtivo.

UF	Data	Nome da Barragem	Empreendedor	Entidade Fiscalizadora	Impactos Causados	Causa Provável
SC	15/07/15	Propriedad e de Nei Zampieri	Nei Carlos Pedro Zampieri	SDS	Destruição de cercas, estrebaria, chiqueiro e estrada da propriedade localizada a 370 metros do local do rompimento.	Erosão interna
MG	05/11/15	Fundão	Samarco S.A.	DNPM	19 vítimas fatais e 300 famílias afetadas diretamente.	Liquefação de efluentes
BA	04/01/16	Alto Grande	PM de Araci	INEMA/BA	Comprometimento da estrada que liga a sede do município ao povoado do Quererá. Sem vítimas fatais.	Cheia
GO	20/02/16	Fazenda Felícia (2 barragens)	Alcides Basílio de Oliveira	SECIMA/GO	Mortandade de peixes e danos na vegetação à margem do córrego da Lagoa Velha, e destruição parcial da Rodovia GO 070. Sem vítimas fatais.	Sem informação
PR	24/08/16	Fazenda Guavirova	Ivo Polinário	AGUAS PARANA/PR	Prejuízos materiais e perda de uma vida humana na área de jusante da barragem.	Cheia
MS	Sem Info	Balneário Ayrton Senna	Sem informação	IMASUL/MS	Morte de todos os peixes nos tanques de piscicultura, lavouras e pastagens a jusante arruinadas. Sem vítimas fatais.	Cheia

Fonte: Adaptada do RSB

2.4 GESTÃO DE RISCO EM BARRAGENS

Pode-se definir risco como a probabilidade de insucesso de determinado empreendimento, em função de acontecimento eventual, incerto, cuja ocorrência não depende exclusivamente da vontade dos interessados. Dessa maneira, sabemos que o risco está presente em qualquer obra de engenharia, visto que não é possível determinar com exatidão o comportamento de alguns materiais, como por exemplo, o solo, sendo necessário o constante monitoramento, visando gerenciar ou minimizar o risco.

Segundo Fontenelle (2007), o risco depende de fatores intrínsecos à barragem, de natureza física e/ou socioeconômica. Por exemplo, é função dos fatores intrínsecos da barragem onde se destacam o controle de construção e operação, de fatores de natureza física o regime hidrológico da região e, por fim, o porte da cidade que se encontra a jusante é um dos principais fatores socioeconômicos. Calcula-se o risco em função dos danos, da probabilidade e das consequências dos possíveis eventos (MEDEIROS, 2005 apud FONTENELLE, 2007). Desta forma, estes podem ser classificados em elevado, significativo ou baixo quanto a magnitude com que afeta vidas humanas e custos materiais (FONTENELLE, 2007).

A análise de risco utiliza a avaliação de risco como forma de coletar dados para a análise da situação da segurança da barragem. A avaliação de risco, por sua vez, tem como objetivos básicos identificar as ameaças em potencial e os modos de ruptura, proceder a uma estimativa estatística de risco, avaliar tolerabilidade, avaliar o potencial de redução através de medidas corretivas eventualmente necessárias e estabelecer uma estratégia de atenuação (SILVEIRA, 2007 apud FONTENELLE, 2007).

Analisando de acordo com a Resolução nº 143 do CNRH a classificação quanto a categoria de risco das barragens é realizada de acordo com as características técnicas do empreendimento (CT), como: altura do barramento, comprimento do coroamento, tipo de barragem quanto ao material de construção, tipo de fundação, idade da barragem e tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro. Outro fator que a classificação também leva em conta é o estado de conservação da barragem (EC) analisando fatores como a confiabilidade das estruturas extravasoras e de captação, eclusa, percolação, deformação e recalques e deterioração dos taludes. Assim como o plano de segurança do empreendimento (PS), bem como o dano potencial associado (DPA). De acordo com a pontuação obtida em cada parâmetro analisado, é realizada a classificação (CNRH, 2012). A Tabela 2 a seguir apresenta em síntese

o Quadro para Classificação das Barragens de Acumulação de Água da Resolução nº 143 do CNRH.

No Anexo I pode-se analisar o quadro com a categoria e pontuação para classificação de barragens para disposição de resíduos e rejeitos e o Anexo II o quadro para classificação das barragens de acumulação de água para fins de análise de risco.

Tabela 2 - Quadro para Classificação das Barragens de Acumulação de Água.

PARÂMETROS			PONTUAÇÃO
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Altura da Barragem (m)		
	Comprimento do barramento (m)		
	Tipo de barragem quanto ao material de construção		
	Tipo de fundação		
	Idade da barragem (anos)		
	Vazão de projeto		
	Total de pontos		
PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS	Existência de documentação de projeto		
	Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de Segurança de Barragens		
	Procedimento de roteiro de inspeções de segurança e monitoramento		
	Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem		
	Relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação		
	Total de pontos		
ESTADO DE CONSERVAÇÃO	Confiabilidade das estruturas extravasoras		
	Confiabilidade das estruturas de adução		
	Percolação		
	Deformação e recalques		
	Deterioração dos taludes/paramentos		
	Total de pontos		
DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Volume total do reservatório		
	Potencial de perdas de vidas humanas		
	Impacto ambiental		
	Impacto socioeconômico		
	Total de pontos		

Fonte : Adaptada CNRH (2012)

De acordo com a resolução nº 91, 02 de abril de 2012 as barragens fiscalizadas pela ANA são classificadas de acordo com a Matriz de Categoria de Risco e o Dano Potencial Associado exemplificados na Tabela 3. Esta tabela tem o objetivo de relacionar o universo das barragens, quanto à abrangência e frequência das ações de segurança, e funciona como uma ferramenta de planejamento e gestão. As barragens são agrupadas em cinco classes (A, B, C, D e E) e assim, as que apresentam uma classe maior, na escala de categoria de risco e dano potencial associado, devem elaborar um Plano mais abrangente, bem como realizar a Revisão Periódica de Segurança de Barragem com maior frequência.

Tabela 3 – Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	C	D
BAIXO	A	C	E

Fonte : ANA (2012)

Com base nos dados do Relatório de Segurança de Barragens (RSB), tem-se um aumento na quantidade de barragens classificadas em relação ao último relatório de 2015, principalmente de usos múltiplos e contenção de rejeitos de mineração. Até o momento, 3.691 foram classificadas por Categoria de Risco e 4.159 quanto ao Dano Potencial Associado, sendo que 695 foram classificadas simultaneamente com Categoria de Risco e Dano Potencial Associado altos. Entretanto, restam ainda 80% das barragens para classificar, sendo grande parte de usos múltiplos.

Para melhores esclarecimentos registra-se que a Categoria de Risco de uma barragem diz respeito aos aspectos da própria barragem que possam influenciar na probabilidade de um acidente: aspectos de projeto, integridade da estrutura, estado de conservação, operação e manutenção, atendimento ao Plano de Segurança, entre outros aspectos. Já o Dano Potencial Associado é o dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

2.5 POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

A necessidade de estabelecer leis que regulamentem a construção, operação e manutenção de barragens, de acordo com boas práticas de engenharia e que estabeleçam planos de ações emergenciais, começaram a surgir após alguns acidentes graves, como a ruptura das barragens de Teton, Malpasset e Vajont, localizadas nos Estados Unidos, França e Itália, respectivamente. Após estes acidentes os governantes passaram a se conscientizar mais a respeito das consequências da ruptura de uma barragem e os órgãos responsáveis pela segurança de barragens passaram a exigir dos proprietários um plano de ações emergenciais (ICOLD, 1998). Em relação ao Brasil, a ruptura da Barragem de Rejeitos da Industria de Papel Cataguases em 2003 e da Barragem de Camará em 2004 tiveram grande influência para que o Governo Federal passasse a atuar de forma mais categórica nas questões relativas à segurança de barragens.

Diante desse contexto foi estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Esta Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

I - altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15m (quinze metros);

II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

São objetivos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB):

I - garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;

II - regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional;

III - promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;

IV - criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;

V - coligir informações que subsidiem o gerenciamento da segurança de barragens pelos governos;

VI - estabelecer conformidades de natureza técnica que permitam a avaliação da adequação aos parâmetros estabelecidos pelo poder público;

VII - fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

O SNISB compreenderá um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção, em operação e desativadas. Tem como princípios básicos para o funcionamento do SNISB : descentralização da obtenção e produção de dados e informações, coordenação unificada do sistema e acesso a dados e informações garantido a toda a sociedade.

2.6 PLANO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

O Plano de Segurança da Barragem é um documento a ser elaborado para cada barramento do Brasil. Nesse sentido, a Agência Nacional de Águas (ANA), responsável por fiscalizar a segurança de barragens para usos múltiplos de recursos hídricos de domínio da União, editou a Resolução nº 91, de 2 de abril de 2012 exemplificada anteriormente e que estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento tanto do Plano de Segurança da Barragem quanto da Revisão Periódica de Segurança da Barragem.

O Plano de Segurança da Barragem é um instrumento da PNSB e deve ser, obrigatoriamente, implantado pelo empreendedor - agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore o barramento para benefício próprio ou da coletividade. O objetivo do Plano é auxiliar o empreendedor na segurança da barragem e o documento deve conter dados técnicos de construção, operação e manutenção do empreendimento.

O Plano de Segurança da Barragem deve compreender, no mínimo, as seguintes informações:

I - identificação do empreendedor;

II - dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, inclusive, no caso de empreendimentos construídos após a promulgação desta Lei, do projeto como construído, bem como aqueles necessários para a operação e manutenção da barragem;

III - estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem;

IV - manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;

V - regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;

VI - indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem;

VII - Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido;

VIII - relatórios das inspeções de segurança;

IX - revisões periódicas de segurança.

A PNSB deverá estabelecer programa de educação e de comunicação sobre segurança de barragem, com o objetivo de conscientizar a sociedade da importância da segurança de barragens e então promover ações descentralizadas para conscientização e desenvolvimento de conhecimento sobre segurança de barragens, elaboração de material didático, disponibilização anual do Relatório de Segurança de Barragens.

Para barragens novas, o Plano de Segurança da Barragem deverá ser elaborado até o início da operação da barragem, a partir de quando deverá estar disponível para utilização pela Equipe de Segurança de Barragem, composta por profissionais do próprio empreendedor ou contratados especificamente para este fim. Para barragens existentes, o Plano deverá estar completo em até 1 ano após a realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB), cujo prazo para elaboração é determinado em função do número de barragens do empreendedor e se encontra detalhado no anexo III da Resolução ANA nº 91/2012. Sendo assim, a Revisão Periódica, é uma parte integrante do Plano, com o objetivo de verificar regularmente o estado geral de segurança da barragem e indicar as ações a serem adotadas pelo responsável pela barragem para a manutenção da segurança.

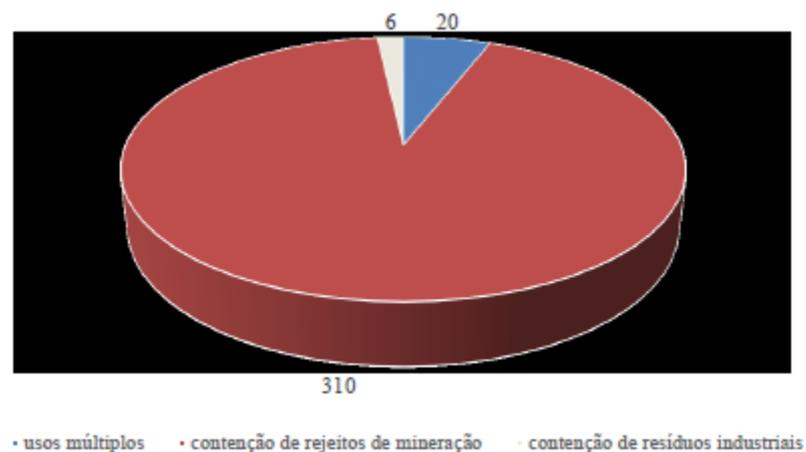
2.7 PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL (PAE)

O PAE é um documento formal, a ser elaborado pelo Empreendedor, no qual deverão ser estabelecidas as ações a serem executadas em caso de situação de emergência, bem como identificados os agentes a serem notificados dessa ocorrência (Art. 12 da Lei nº 12.334/2010)

De acordo com o RSB, 2016 constata-se que há 336 PAE's implantados, o que corresponde a cerca de 1,5% das barragens atualmente em cadastro abrangidas pela PNSB, podendo-se inferir que é um número muito baixo, apesar de ainda não se ter um conhecimento exato de quantos PAE's são necessários. Na Figura 7 encontra-se a informação disponível relativa à existência do Plano de Ação de Emergência (PAE), para as barragens agrupadas, atendendo ao seu uso principal.

Algumas razões possíveis para o baixo número são : muitos fiscalizadores ainda não publicaram regulamentos ou o fizeram apenas recentemente; muitos fiscalizadores não classificaram as barragens sob sua jurisdição ou o fizeram recentemente; muitos empreendedores ainda não começaram ou estão na fase inicial de elaboração de seus Planos; e por fim, muitos empreendedores ainda estão dentro do prazo estipulado pelos fiscalizadores para elaborar o PSB, incluindo o PAE, a exemplo dos empreendedores fiscalizados pela ANA e pela ANEEL (ANA, 2017).

Figura 7 - Barragens com Plano de Ação de Emergência (PAE), em 31 de dezembro de 2016 (*).



Fonte : ANA (2017)

(*). Os dados acima representam o universo de 15,43% das barragens cadastradas.

latitude sul, e 36°59' 00" e 38°57' 45" de longitude oeste, formando a Unidade de Planejamento Hídrico UP9. Os municípios totalmente inseridos na bacia são: Afogados da Ingazeira, Betânia, Brejinho, Calumbi, Flores, Ingazeira, Itapetim, Quixabá, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo e Tuparetama. Os municípios parcialmente inseridos na bacia são: Belém do São Francisco, Custódia, Ibimirim e Salgueiro.

Segundo informações que podem ser obtidas no site da APAC o rio Pajeú nasce no município de Brejinho e percorre uma extensão de aproximadamente 353 km. Inicialmente apresenta sentido nordeste-sudoeste, até desaguar no lago de Itaparica, no rio São Francisco. Seu regime fluvial é intermitente e, ao longo do seu curso, margeia as cidades de Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada e Floresta. Seus afluentes principais são: pela margem direita, os riachos Tigre, Barreira, Brejo, São Cristóvão e Belém; e, pela margem esquerda, os riachos do Cedro, Quixabá, São Domingos, Poço Negro e do Navio.

A barragem foi projetada com a finalidade de abastecimento humano e usos em irrigação, com uma capacidade de 311.080.000 m³ e um volume morto de 46.650.000 m³. A Tabela 4 mostra a ficha técnica do reservatório (DNOCS, 2006).

Tabela 4 – Ficha técnica da Barragem de Serrinha II

Reservatório	Açude Serrinha II
Nome	Serrinha
Bacia Hidrográfica Estadual	Bacia do Rio Pajeú
Órgão Responsável	DNOCS
Finalidade	Abastecimento humano, irrigação
Município	Serra Talhada
Estado	PE
Capacidade (1.000 m ³)	311.080
Volume Morto (1.000 m ³)	46.650
Cota soleira sangradouro/vertedouro (m)	395,00
Cota do coroamento (m)	397,00
Bacia Hidrográfica (m ²)	44.220.000,00

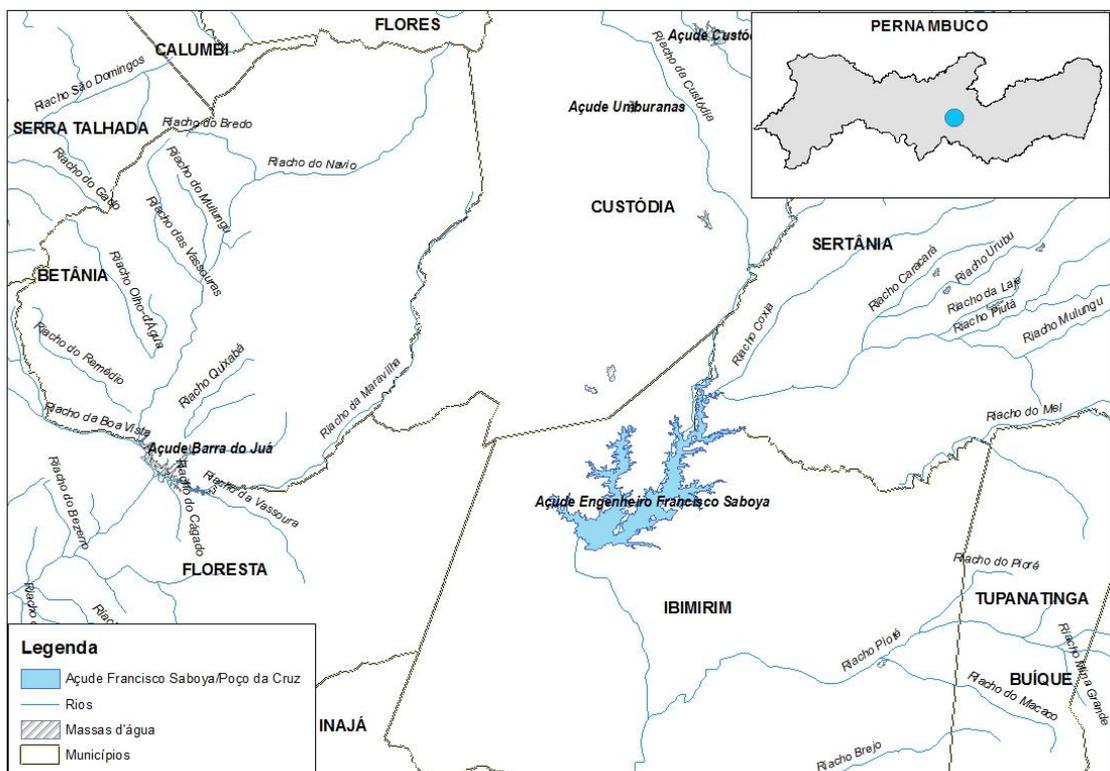
Fonte : DNOCS (2006)

Desde o projeto, em 1950, passando pela conclusão da obra em 1996 até hoje, a Barragem de Serrinha ainda não serve a população conforme seu projeto original. Entre outras propostas, a criação de lotes irrigados no entorno da barragem. A falta de controle na abertura das comportas também é um problema que vem se arrastando há anos (SÁ, 2014). Hoje os agricultores que vivem no local disputam o uso da água gerando tensões sociais advindas da negociação da abertura e fechamento da comporta. A acumulação da água também favoreceu o uso para a atividade pesqueira (OLIVEIRA, 2005).

3.1.2 Barragem de Poço da Cruz

O reservatório Engenheiro Francisco Sabóia, também conhecido como o açude Poço da Cruz, é o maior do estado de Pernambuco e está situado em Ibimirim, no Sertão Pernambucano, na bacia do Rio Moxotó. A Figura 9 ilustra a localização da Barragem de Poço da Cruz. A jusante da barragem, distante aproximadamente 5 km, localiza-se o município de Ibimirim com população estimada de 28985 habitantes de acordo com o último Censo (IBGE, 2017).

Figura 9 - Localização da Barragem Poço da Cruz



Fonte : ANA (2017)

A bacia do Moxotó está inserida na bacia hidrográfica do rio São Francisco, limitada ao norte pelo estado da Paraíba e pela bacia do rio Pajeú em Pernambuco; a leste pelas bacias dos rios Ipojuca e Ipanema, também em Pernambuco; a oeste pela bacia do rio Pajeú, em Pernambuco; e ao sul, pelo lago da UHE de Paulo Afonso no rio São Francisco e com a bacia do rio Capiá em Alagoas.. A bacia do rio São Francisco está dividida em quatro regiões fisiográficas, compondo o Alto, Médio, Submédio e Baixo São Francisco. A bacia do rio Moxotó está localizada na região fisiográfica conhecida como Submédio e possui localização estratégica no semiárido nordestino, abrangendo uma população de aproximadamente 185.000 habitantes, ou seja, 2,34% da população do estado de Pernambuco.

A bacia localiza-se entre as latitudes 7°52' e 9°21' sul e entre as longitudes 37°00' e 38°15' oeste. A área total da bacia é de 9.619 km². Deste total, 91,2% se encontram no estado de Pernambuco e os 8,8% restantes, em Alagoas. Os municípios pernambucanos inseridos na bacia são: Arcoverde, Buíque, Custódia, Floresta, Ibimirim, Igaraci, Inajá, Jatobá, Manari, Sertânia, Tacaratu, Tupanatinga.

A barragem foi projetada pela Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas - IFOCS, atualmente Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS. As finalidades principais eram a irrigação das terras a jusante e a montante do vale, a piscicultura e a geração de energia, com uma capacidade de 504.000.000. De acordo com a coordenadora do DNOCS a barragem foi recuperada para receber água da Transposição. Porém, as estruturas de distribuição de água (canais, comportas) continuam completamente danificadas. A Tabela 5 mostra a ficha técnica do reservatório (DNOCS, 2014).

Tabela 5 – Ficha técnica da Barragem de Poço da Cruz

Reservatório	Açude Poço da Cruz
Nome	Poço da Cruz
Bacia Hidrográfica Estadual	Bacia do Rio Moxotó
Órgão Responsável	DNOCS
Finalidade	Irrigação, piscicultura e geração de energia
Município	Ibimirim
Estado	PE
Capacidade (1.000 m ³)	504.000
Bacia Hidrográfica (m ²)	5.000.000.000

Fonte : MIN (2005)

3.1.3 Dados hidrológicos da barragem

A caracterização hidrológica da Barragem de Serrinha e Poço da Cruz foi realizada através do sistema de informações hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA).

Os estudos da Coordenação de Marcos Regulatórios e Alocação de Água – COMAR apontaram a presença de um período com chuvas entre os meses de janeiro e maio, e um período de estiagem entre os meses de junho e dezembro, podendo ser explicitado nas Tabela 6 e 7 abaixo (ANA, 2018).

Tabela 6 – Distribuição média mensal dos volumes afluentes ao reservatório Serrinha II

Estações/mês	% Volume afluente total anual	
	CHUVAS	Janeiro
Fevereiro		20,7%
Março		46,5%
Abril		77,7%
Maió		92,2%
ESTIAGEM	Junho	95,4%
	Julho	97,0%
	Agosto	97,4%
	Setembro	97,5%
	Outubro	97,6%
	Novembro	98,1%
	Dezembro	100,0%

Fonte : ANA (2017).

Tabela 7 – Distribuição média mensal dos volumes afluentes ao reservatório Poço da Cruz

Estações/mês	% Volume afluente total anual	
	CHUVAS	Janeiro
Fevereiro		16,0%
Março		44,7%
Abril		80,0%
Maió		91,6%
ESTIAGEM	Junho	95,9%
	Julho	97,9%
	Agosto	98,6%
	Setembro	98,6%
	Outubro	98,7%
	Novembro	98,9%
	Dezembro	100,0%

Fonte : ANA (2017).

Também foi analisada a taxa de evaporação na superfície líquida em mm, de acordo com cada mês, explicito na Tabela 8 e 9 abaixo.

Tabela 8 – Evaporação na superfície líquida da Barragem de Serrinha II

EVAPORAÇÃO NA SUPERFÍCIE LÍQUIDA (mm)											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
198,3	148,5	129,0	112,7	123,5	129,0	144,1	195,1	221,1	257,9	249,3	222,3
ANUAL: 2130,7mm											

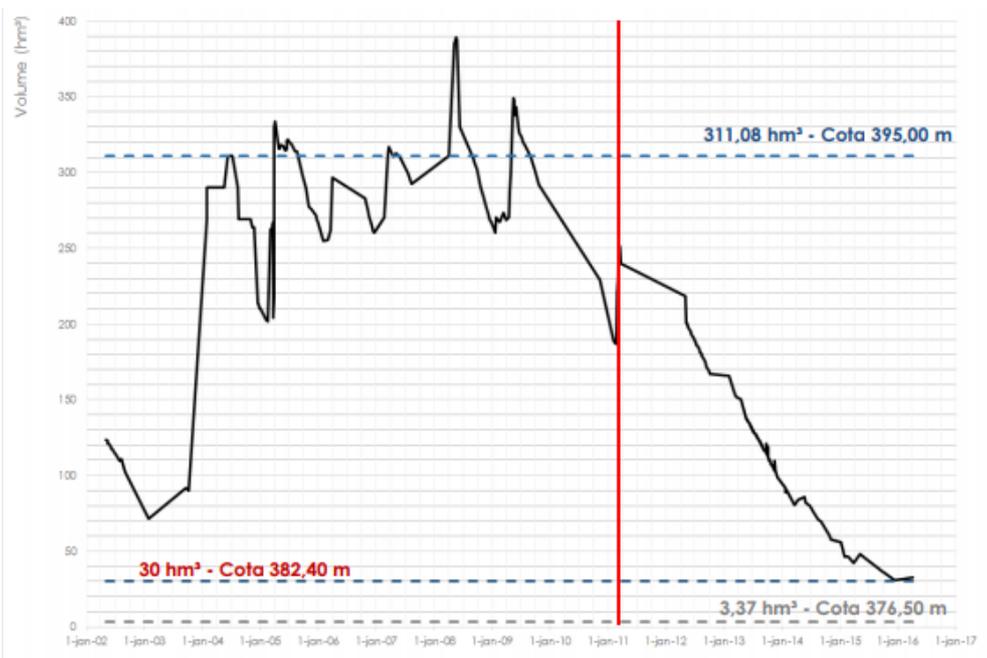
Fonte : ANA (2017).

Tabela 9 – Evaporação na superfície líquida da Barragem de Poço da Cruz

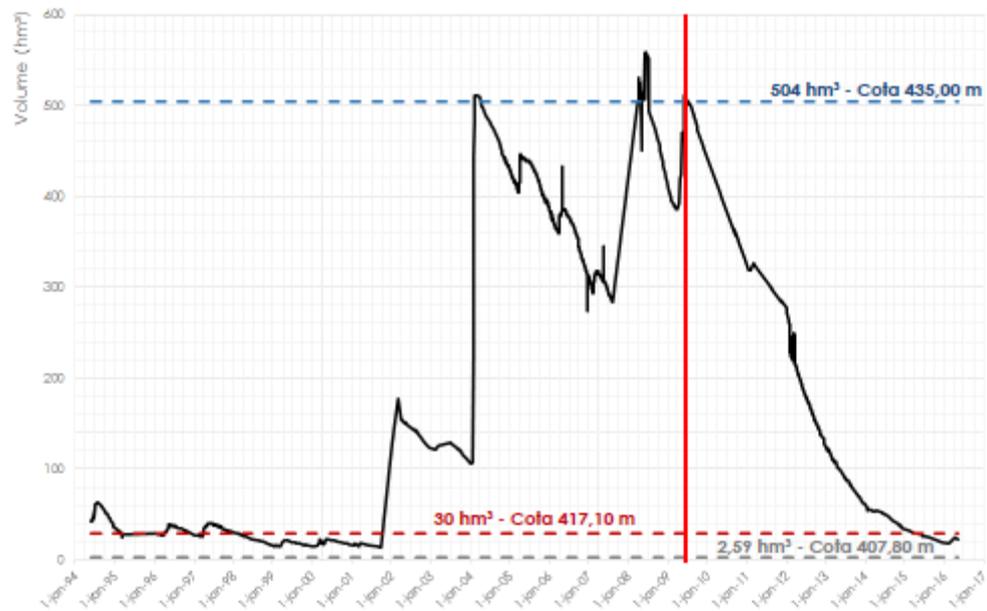
EVAPORAÇÃO NA SUPERFÍCIE LÍQUIDA (mm)											
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
159	119	107	92	85	87	90	129	155	190	185	170
ANUAL : 1.568mm											

Fonte : ANA (2017).

De acordo com a Figura 10 podemos observar que nos anos de 2005, 2007, 2008 e 2009 foi atingido um volume maior que 311.080.000 m³ e assim o extravasamento a partir do vertedouro da barragem de Serrinha II. A partir do ano de 2010 pode-se observar a diminuição no volume acumulado evidenciando o período de seca pelo qual essa região foi atingida. Analogamente pode-se observar na Figura 11 que nos anos de 2004, 2009 e 2010 foi atingido um volume maior que 504.000.000 m³ na barragem de Poço da Cruz e assim o extravasamento a partir do vertedouro, e a partir dos anos subsequentes se confirma a presença desse período de seca que afeta toda a região.

Figura 10 – Histórico de volumes acumulados na Barragem de Serrinha II

Fonte : ANA (2017).

Figura 11 – Histórico de volumes acumulados na Barragem de Poço da Cruz

Fonte : ANA (2017).

3.2 MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE ROMPIMENTO : HEC-RAS

O HEC-RAS é um modelo hidrodinâmico unidimensional ou bidimensional desenvolvido pelo “US Army Corps of Engineers – USACE “ em 1995. Este software é um sistema integrado, designado para um uso interativo em tarefas múltiplas. Pode realizar simulações de escoamento permanente, escoamento não permanente, transporte de sedimentos e ainda a análise da qualidade da água. Seus resultados são expressos em forma de hidrogramas, níveis de água e velocidades (USACE, 2010).

Os modelos hidrodinâmicos são capazes de determinar as elevações de nível de água e descarga em locais específicos ao longo de um curso de água sujeito a escoamento não-permanente, baseado na solução das equações completas unidimensionais de Saint-Venant com o princípio da conservação da massa, por meio de métodos implícitos de diferenças finitas, permitindo representar, junto com as equações de contorno interno, a variação rápida do fluxo.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{Conservação da massa} \quad \text{Eq. 01}$$

A modelagem matemática da propagação de uma onda de cheia significa empregar a equação da continuidade e da quantidade de movimento em todos os seus termos (gravidade, atrito, pressão e inércia).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} = g(S_o - S_f) \quad \text{Conservação da quantidade de movimento Eq. 02}$$

Onde t [s] é a variável independente relativa ao tempo; x [m] é a variável independente relativa à direção do escoamento; u [m/s] é velocidade média do escoamento; g [m/s²] é a aceleração da gravidade; h [m] é a espessura da lâmina líquida; S_o [m/m] é a declividade média da calha fluvial ou do fundo do canal; e S_f [m/m] é a declividade da linha de energia, equivalente ao termo de perda de carga unitária decorrente do atrito.

Os modelos possuem como componente essencial um algoritmo de cálculo computacional hidráulico que possibilita a determinação da extensão e do tempo de ocorrência de uma inundação no rio, quando nesse se verificam hidrogramas de fluxo não-permanente.

A simulação da onda de cheia utilizando o modelo HEC-RAS, ou outros programas embasados nas equações de Saint-Venant, apresenta algumas limitações, como por exemplo : a consideração do efeito da onda de choque, pois essa equação não foi desenvolvida para escoamentos bruscamente variados, sendo necessário inúmeras considerações particulares. Este fenômeno, descrito pela variação brusca da vazão e da profundidade do nível de água, corresponde à criação de regiões de forte aceleração vertical, invalidando a hipótese da distribuição hidrostática de pressões. Sendo assim, há uma descontinuidade no escoamento e as hipóteses utilizadas para a dedução das equações de Saint-Venant são invalidadas, o que pode gerar resultados não confiáveis em algumas situações (MASCARENHAS (1990) apud LAURIANO et al, (2009)).

O HEC-RAS pode apresentar ainda resultados considerados instáveis, como descontinuidades nos hidrogramas ou nos perfis d'água. Estes problemas podem ser resolvidos alterando alguns parâmetros do modelo, como a distância entre as seções, o intervalo de tempo de computação ou ainda as condições de contorno. Um modo de garantir a estabilidade e a precisão da simulação é a adoção de um tempo de computação que satisfaça a condição de Courant (USACE, 2010).

3.3 DADOS REQUERIDOS PARA SIMULAÇÃO

A simulação de um rompimento hipotético de uma barragem exige determinados dados de entrada, além dos parâmetros do próprio reservatório e do maciço, para que seja devidamente executado a fim de gerar os mapas com as manchas de inundação, que é o objetivo final do

estudo. É necessário que tais dados sejam colhidos de fontes confiáveis e que sua precisão seja verificada.

Dentre os diversos modelos de simulação do escoamento provocado pela ruptura de uma barragem foi escolhido o modelo hidráulico HEC-RAS. O regime de escoamento simulado foi o não-permanente, bidimensional.

Como condições de contorno, foram adotados o hidrograma de ruptura no início da malha, localizado na barragem de Serrinha, já no trecho final na área urbana do município de Floresta e Tupanaci, foi considerada como profundidade normal da lâmina d'água com inclinação de 0,01 m/m. Para a barragem de Poço da Cruz a profundidade normal da lâmina d'água com inclinação de 0,001 m/m.

3.3.1 Modelo Digital do Terreno

A topografia da região foi obtida a partir das informações disponíveis no site do Governo do Estado de Pernambuco (Pernambuco Tridimensional) com precisão altimétrica melhor que 25 cm com uma escala de 1:5.000. A adoção de um modelo com tal precisão possibilitou uma melhor modelagem dos mapas gerados, gerando manchas de inundação mais precisas. Além disso, a projeção adotada foi a SIRGAS 2000 para a zona 24 em coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator).

3.3.1.1 Pernambuco Tridimensional

A secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE), realizou uma varredura a laser do terreno que permite obter com rapidez e qualidade as informações altimétricas para a elaboração de projetos de barragens de controles de cheia, além de desenvolver um sistema de prevenção e alerta de inundações para a bacia do rio Una. Perfilamento ou varredura a laser consiste no levantamento de altura de pontos sobre uma superfície através da emissão de raios laser.

Os serviços contratados através do Pernambuco tridimensional abrangeram 26 municípios. A escolha destes municípios considerou critérios como população, localização geográfica e a necessidade de base cartográfica para desenvolvimento de projetos de abastecimento de água e esgotamento sanitário.

Os serviços contratados pelo Pernambuco Tridimensional incluem recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser em dois níveis de precisão. O primeiro abrange todo o território de Pernambuco com um recobrimento aerofotogramétrico e geração de ortofotos na escala 1:5.000, perfilamento a laser com precisão altimétrica melhor que 25 cm e geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de Intensidade Hipsométricas.

O segundo abrange 870km², distribuídos em 26 municípios, com recobrimento aerofotogramétrico e geração de ortofotos na escala 1:1.000, perfilamento a laser com precisão melhor que 10 cm e geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de Intensidade Hipsométricas. As Imagens Hipsométricas representam o terreno associando faixas de altitude a escala de cores. O MDT representa apenas a superfície do terreno e o MDE, além da superfície do terreno, considera os alvos mais elevados, identificando o topo de edificações, árvores, pontes, etc.

Todos os produtos do Pernambuco Tridimensional passam por três etapas de validação: Análise de Completude, Análise de Consistência e Análise Estatística da Precisão Planialtimétrica. A precisão planimétrica das ortofotos e a precisão altimétrica do perfilamento a laser são analisadas por amostragem. As ortofotos atendem ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), referente à Classe A nas escalas 1:5.000 e 1:1.000.

Nas Análises de Completude e Consistência, todos os arquivos disponibilizados são abertos, analisados e têm seu conteúdo verificado em relação à conformidade com as especificações técnicas exigidas no contrato do Pernambuco Tridimensional. A validação dos dados do PE3D foi realizada pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP).

3.3.2 Área de alagamento

Seguindo o curso do Rio Pajeú, a área de abrangência do estudo contemplou os municípios de Serra Talhada, local da barragem, passando pelo povoado de Tupanaci, distrito de Mirandiba, até o município de Floresta. Em relação ao curso do Rio São Francisco, a área de abrangência atingiu o município de Ibimirim e a rodovia PE-360, no Sertão de Itaparica que faz a ligação do município de Floresta a Ibimirim.

A simulação da mancha de inundação da área analisada foi feita em um modelo 2D. Para tanto, foi determinada no programa HEC-RAS, uma área a ser alagada, e a malha determinada de acordo com a precisão do modelo digital do terreno.

3.3.3 Coeficiente de Manning

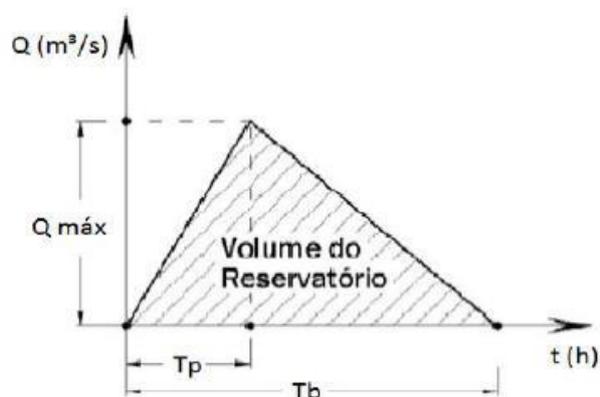
A determinação do coeficiente de Manning envolve várias incertezas, pois características como as margens da área analisada, vegetação, entre outras definem este parâmetro. Além disso, os valores para o coeficiente disponibilizados na literatura dificilmente condizem com a cheia induzida pela ruptura de barragens, sendo necessário utilizar o valor do coeficiente subestimado, o que pode levar a instabilidades numéricas.

3.3.4 Hidrograma de ruptura

O hidrograma de ruptura foi obtido a partir do método do hidrograma triangular simplificado, proposto por Mascarenhas (1990) exemplificado na Figura 12 a seguir.

Para isto, estabeleceu-se uma rotina de cálculo com a definição do tempo de formação da brecha para maciço de barragem resistente e erodível - t_f (Eq. 03) e vazão de pico devido a brecha na barragem - Q_p (Eq. 04). O tempo de pico (T_p) do hidrograma foi estimado como equivalente ao tempo de formação da brecha (t_f) responsável pelo evento de ruptura. Já o tempo de base do hidrograma triangular (T_b) foi encontrado a partir da área do triângulo em função da vazão de pico (Q_p) e do volume total do reservatório (V_r). As vazões máximas de defluência para cada instante (t) foram obtidos pelas equações 05, 06 e 07.

Figura 12 - Método de determinação de hidrograma de ruptura segundo Mascarenhas (1990)



Fonte : Mascarenhas (1990).

A seguir, são apresentadas as fórmulas matemáticas utilizadas:

$$tf = 1,20 * h + 15 \quad (\text{Eq. 03})$$

$$Qp = 0,607 * Vr^{0,295} * h^{1,24} \quad (\text{Eq. 04})$$

$$Qp = 2 * \frac{Vr}{Tb} ; \text{para } Tp = 0 \quad (\text{Eq. 05})$$

$$Q(t) = Qp * \left(\frac{t}{Tp}\right); \text{para } 0 \leq t \leq Tp \quad (\text{Eq. 06})$$

$$Q(t) = Qp - Qp * \left(\frac{t - Tp}{Tb - Tp}\right); \text{para } t \geq Tp \quad (\text{Eq. 07})$$

Sendo:

Vr: Volume total de água armazenado na barragem

h: Altura máxima da barragem

Tp: Tempo de pico do hidrograma = tf (tempo de formação da brecha), em segundos.

Tb: Tempo de base do hidrograma (s).

Para os casos analisados, segue a Tabela 10 abaixo com os dados necessários:

Tabela 10 – Dados utilizados para o hidrograma de ruptura hipotético

	Serrinha II	Poço da Cruz
Vr = (Volume total de água armazenado na barragem)	311.000.000 m ³	504.000.000 m ³
h = (Altura máxima da barragem)	28,00 m	35,00m
Tp (Tempo de pico do hidrograma) = tf (tempo de formação da brecha)	48,6 min	66 min

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado final da análise de rompimento hipotético das barragens Serrinha II e Poço da Cruz está expresso nos mapas de inundação. Ao se fazer tal análise, não é suficiente apenas obter o desenho da mancha, mas também outros parâmetros que permitam uma tomada de decisão sobre a evacuação das áreas afetadas, reiterando a importância de uma equipe multidisciplinar para análise de todos os fatores necessários.

4.1 DETERMINAÇÃO DO HIDROGRAMA DE RUPTURA

Da aplicação do método do hidrograma hipotético de ruptura de barragens foram obtidos os hidrogramas apresentados a seguir. A Figura 13 refere-se ao hidrograma hipotético de ruptura da barragem de Serrinha II e Figura 14 refere-se ao hidrograma hipotético de ruptura da barragem de Poço da Cruz.

Figura 13 – Hidrograma hipotético de ruptura da barragem de Serrinha II

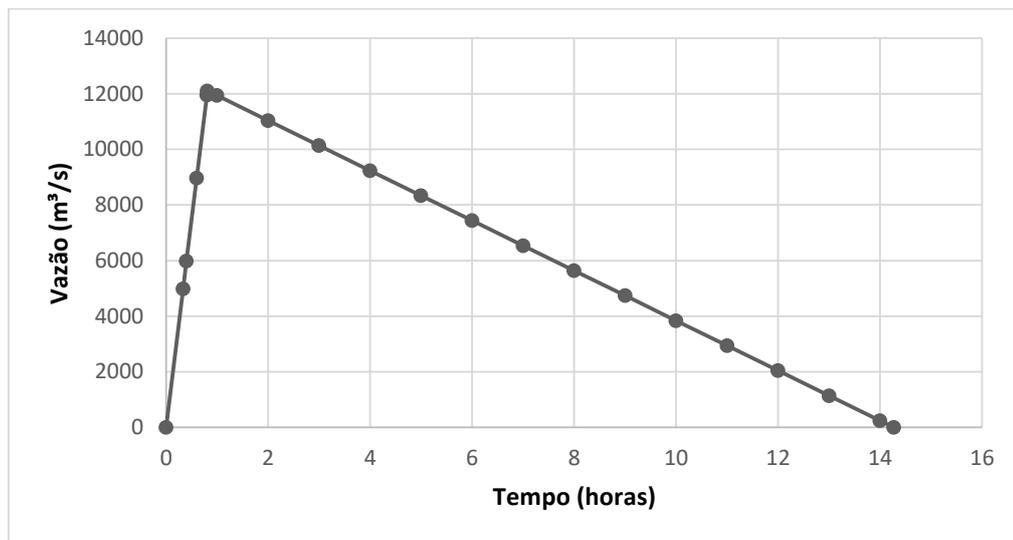
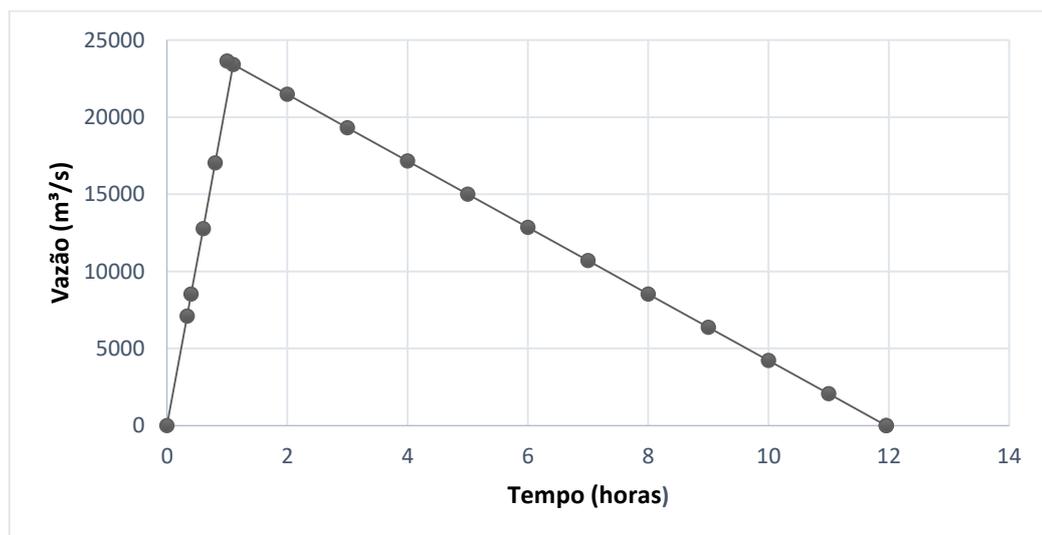


Figura 14 – Hidrograma hipotético de ruptura da barragem de Poço da Cruz



4.2 SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

As condições de contorno e coeficientes de rugosidade foram inseridas no modelo e as simulações hipotéticas no software HEC-RAS foram realizadas.

A cota máxima simulada pelo nível d'água varia ao longo do trecho. No centro da cidade de Tupanaci a elevação chegaria a 11,2m com a situação crítica ocorrendo cerca de 3 horas e 24 minutos após a ruptura da Barragem de Serrinha. O tempo de chegada da onda de cheia no município seria cerca de 3 horas após a ruptura. Para a cidade de Floresta a elevação chegaria a 11,9m com a situação crítica ocorrendo cerca de 19 horas e 48 minutos após a ruptura da barragem. O tempo de chegada da onda de cheia no município seria cerca de 19 horas após a ruptura. Para a cidade de Ibimirim, o tempo de chegada da onda de cheia no município seria cerca de 3 horas após a ruptura e atingiria uma profundidade máxima de 27m.

4.3 MANCHAS DE INUNDAÇÃO

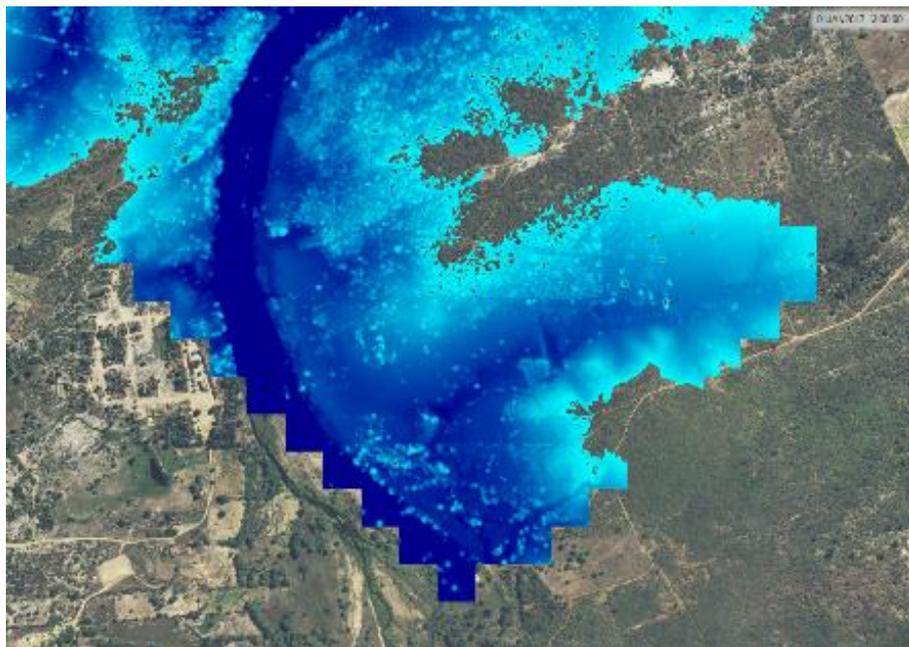
Como produto da modelagem, obtém-se as manchas de inundação com gradação de cores em função da profundidade da água. A partir disso, é possível identificar as áreas críticas de inundação na hipótese de rompimento da barragem. Com a simulação hidráulica, é possível ainda obter as velocidades e vazões de propagação da onda de cheia, permitindo conhecer o tempo de chegada da onda nos municípios situados a jusante da barragem.

As imagens abaixo mostram a sequência de momentos desde o início do rompimento para o distrito de Tupanaci.

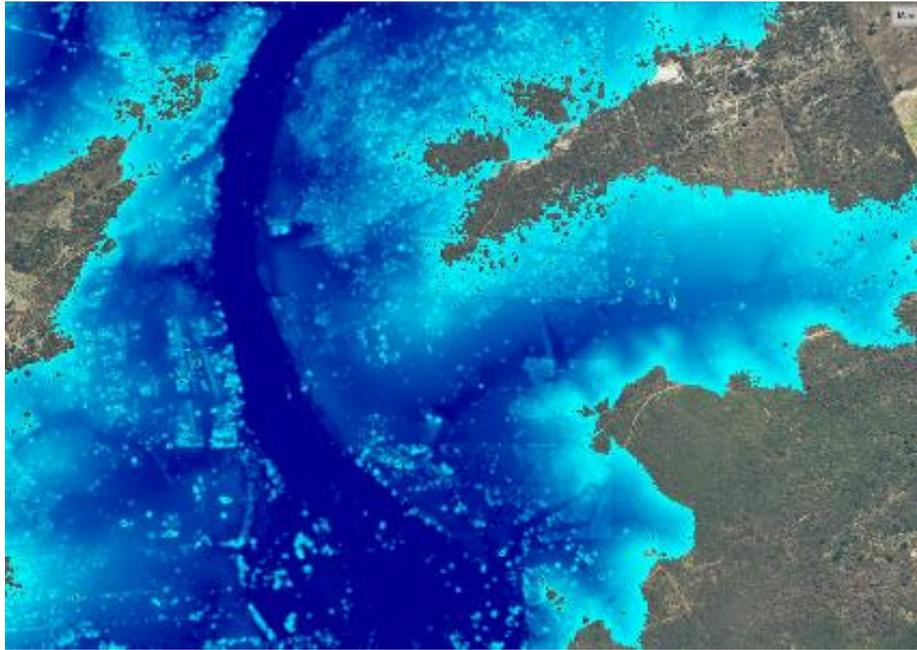
Figura 15 - Etapas de avanço da onda de cheia hipotética – Tupanaci



Início da Simulação
Dia 1 - Hora: 10:00



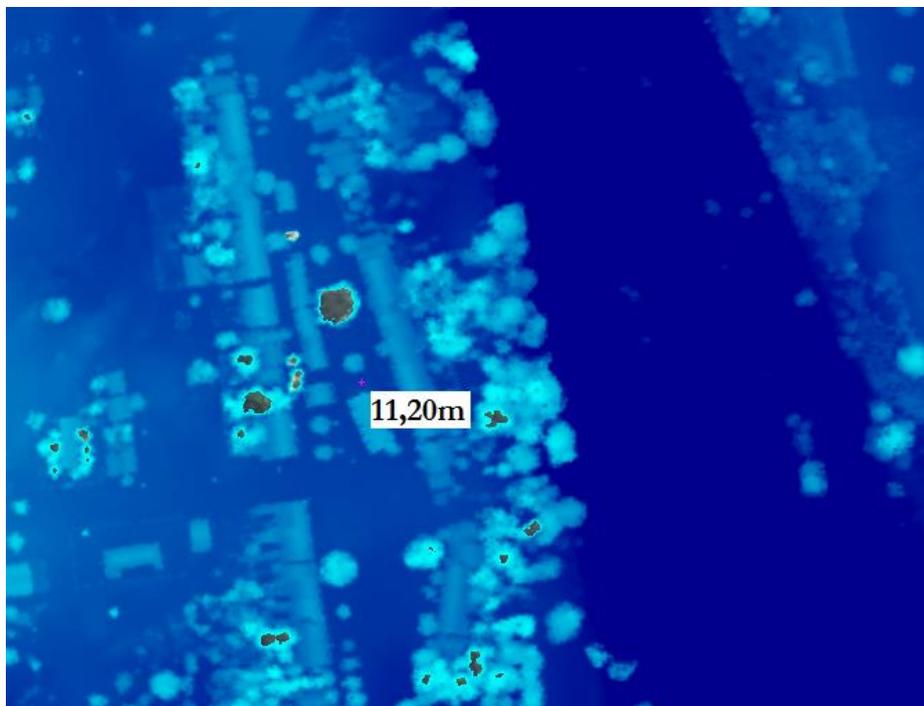
Momento em que a onda chega
Dia 1 - Hora: 13:00



Momento crítico
Dia 1 - Hora: 13:24

No distrito de Tupanaci a altura da água chegaria a 11,2m representado na Figura 16.

Figura 16 – Local de maior profundidade, centro de Tupanaci.

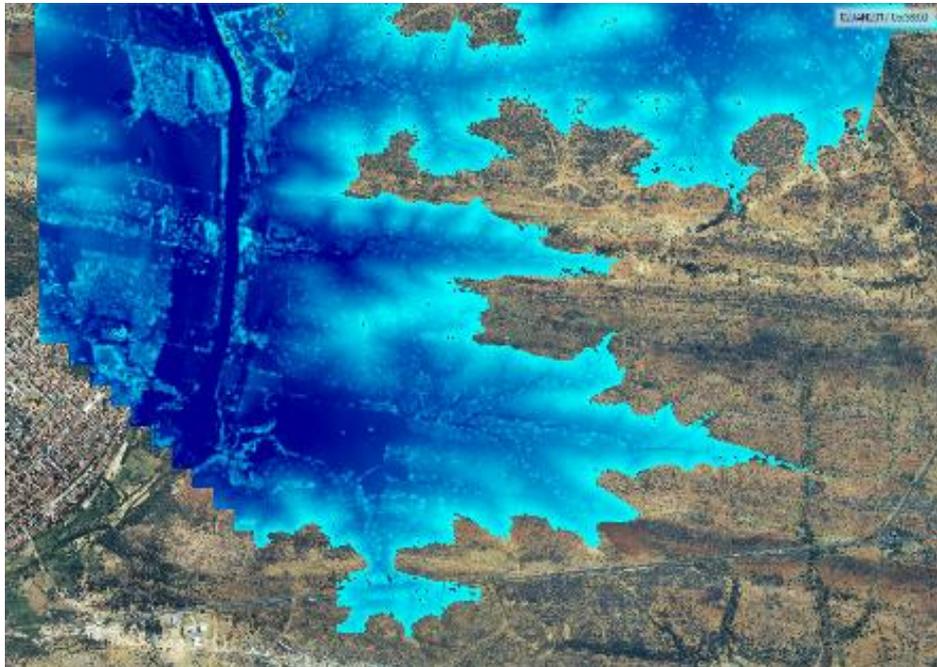


As imagens abaixo mostram a sequência de momentos de simulação desde o início do rompimento até atingir a cidade de Floresta.

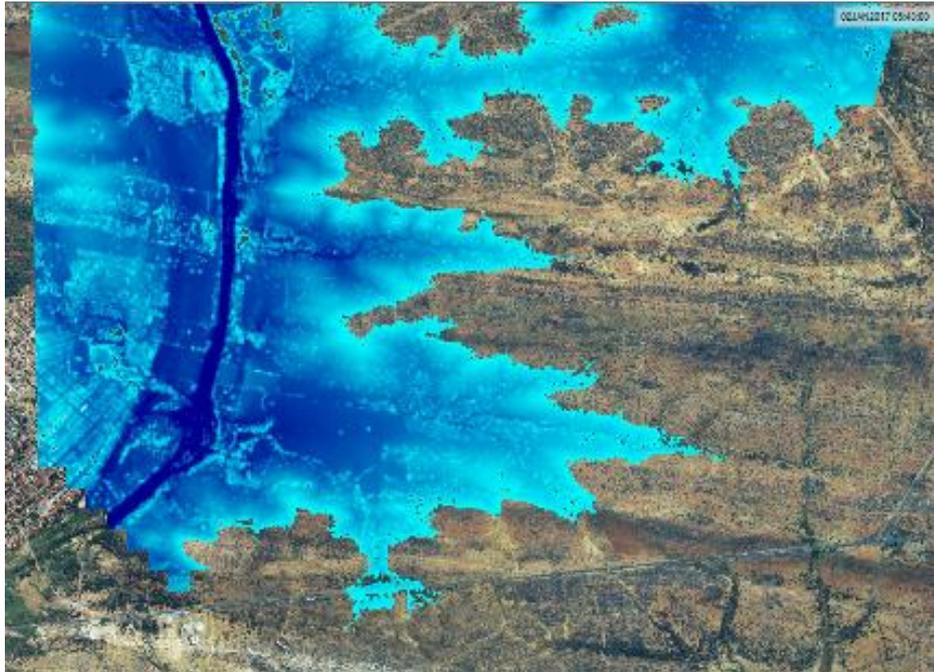
Figura 17 - Etapas de avanço da onda de cheia hipotética – Floresta



Início da Simulação
Dia 1- Hora: 10:00



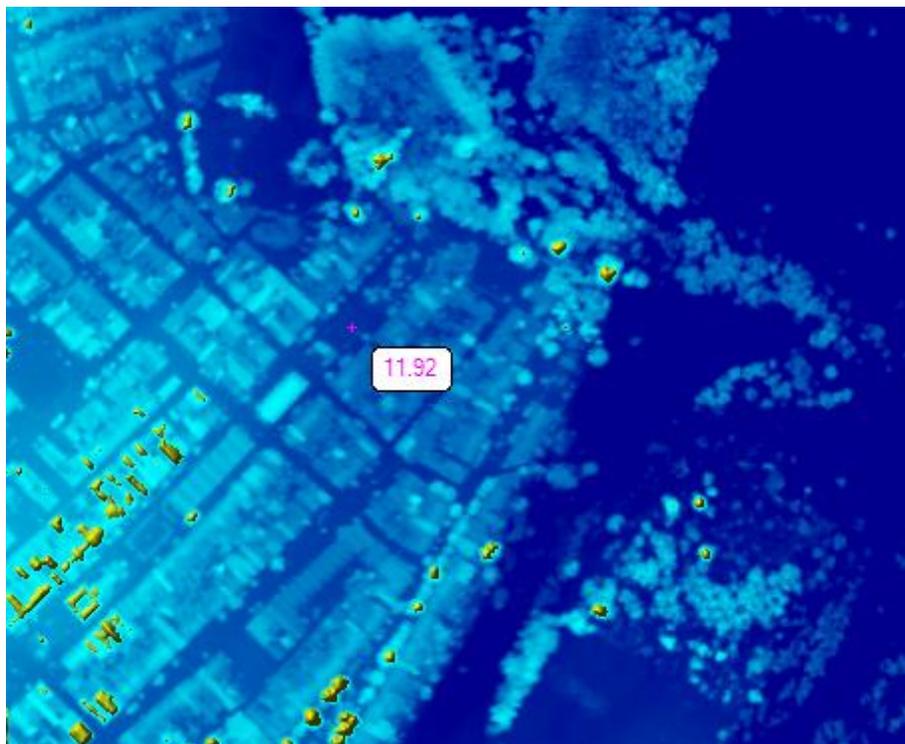
Momento em que a onda chega
Dia 2 - Hora: 05:36



Momento crítico
Dia 2 - Hora: após 05:48

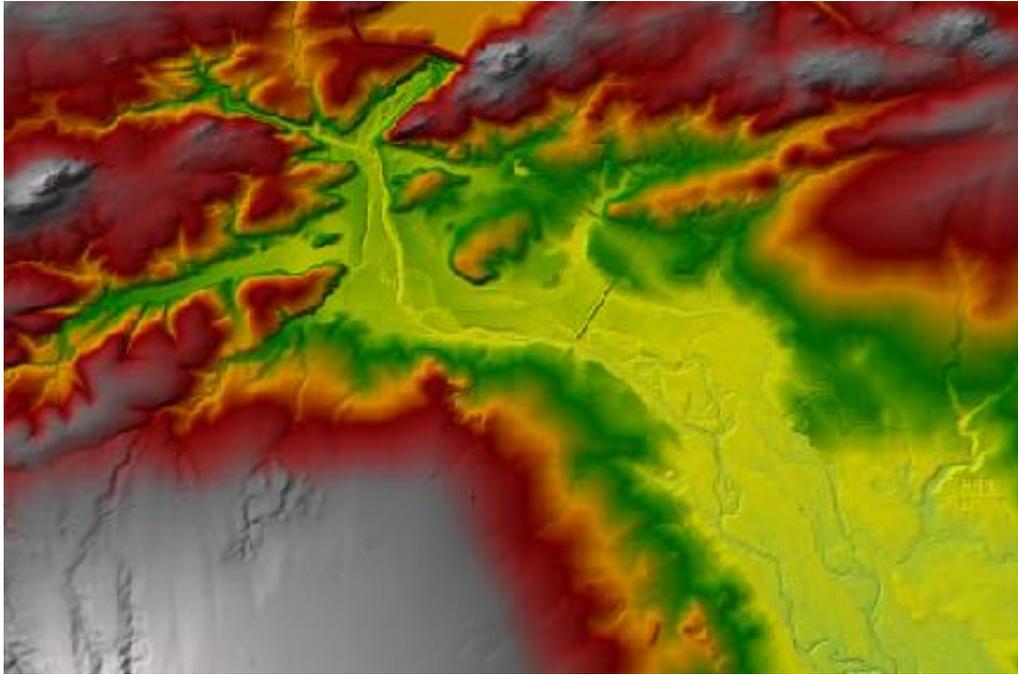
Em Floresta a altura da água chegaria a 11,9m, conforme a Figura 18 que representa a inundação simulada.

Figura 18 – Local de maior profundidade, Floresta

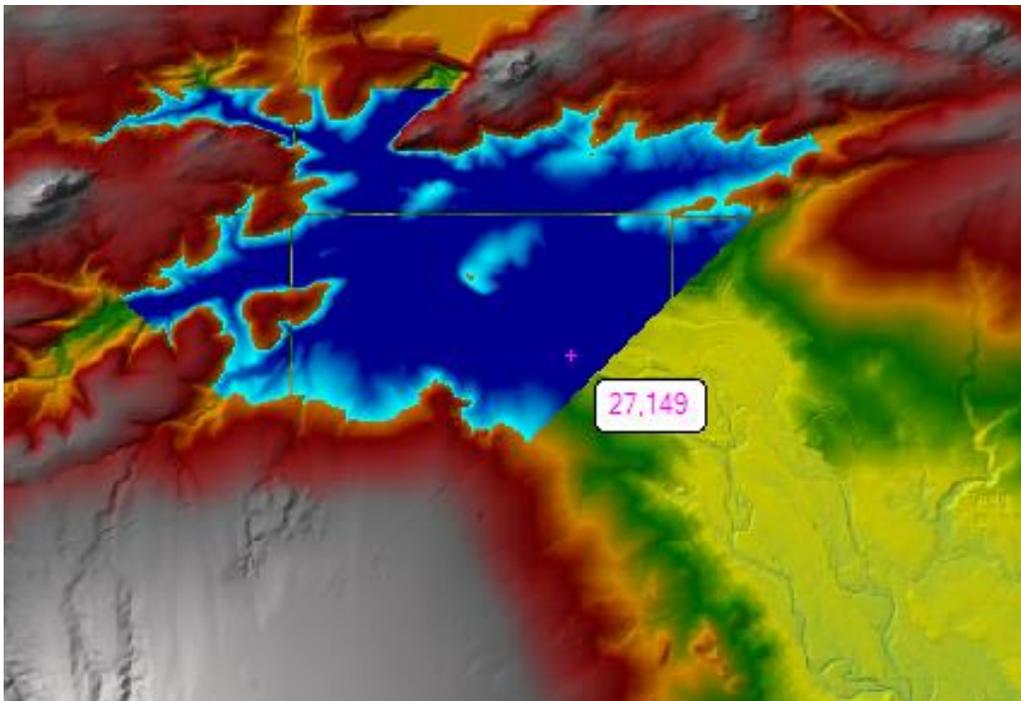


As imagens abaixo mostram a sequência de momentos desde o início de simulação do rompimento para o município de Ibimirim.

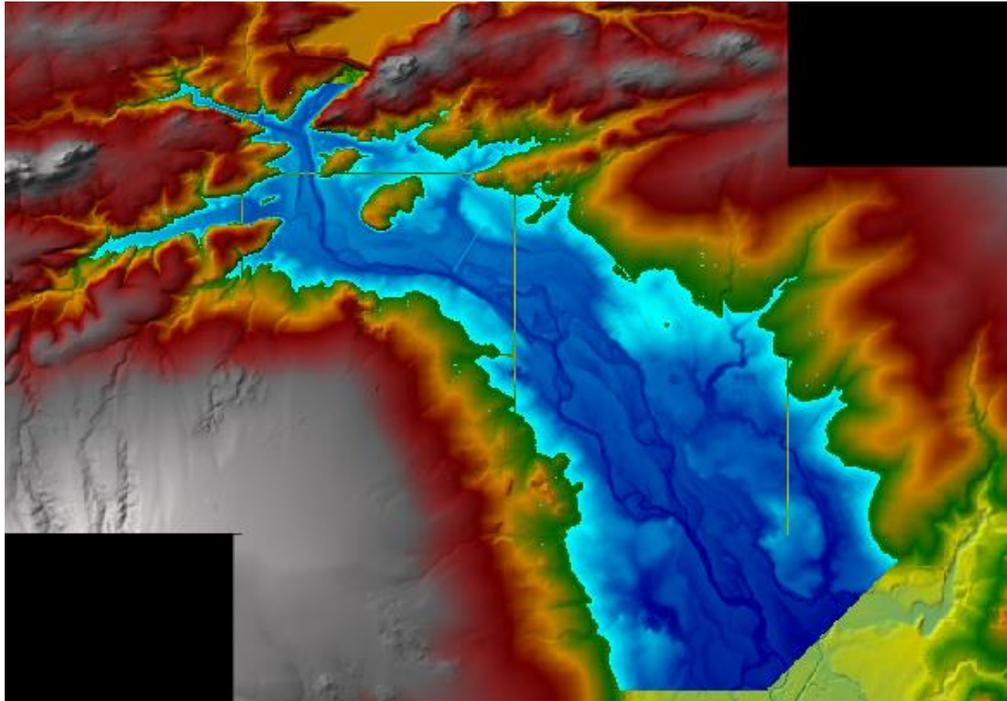
Figura 19 - Etapas de avanço da onda de cheia hipotética – Ibimirim



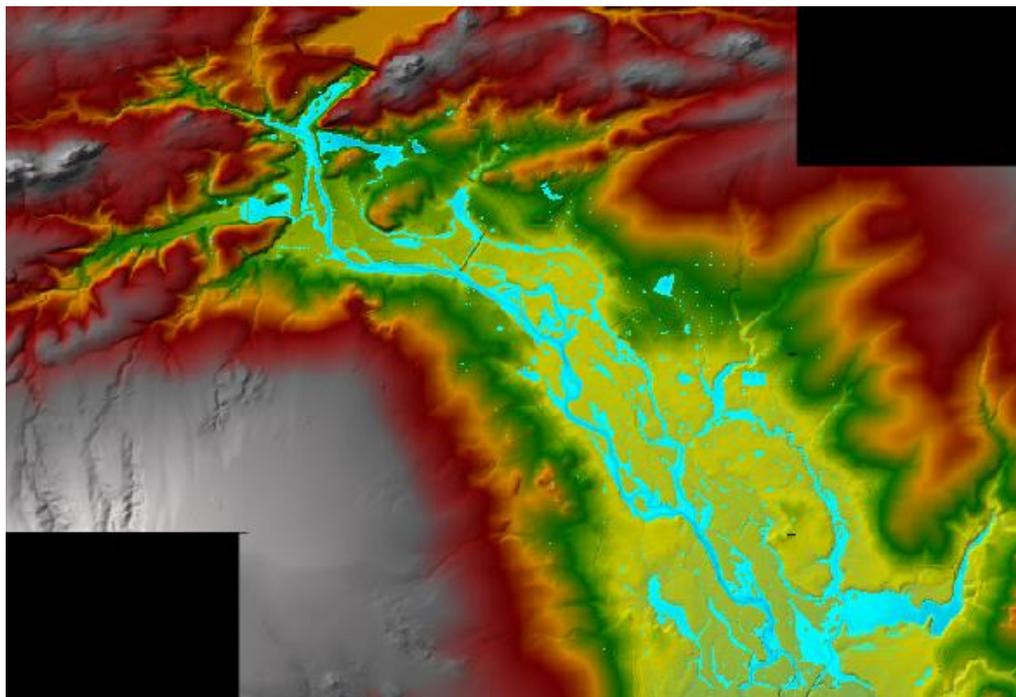
Início da Simulação
Dia 1- Hora: 00:00



Momento em que a onda chega
Dia 1- Hora: 03:00
Local de maior profundidade crítica



Momento em que a onda atinge toda a área de alagamento
Dia 1- Hora: 09:00



Momento em que a onda escoia quase totalmente
Dia 1- Hora: 21:00

5 CONCLUSÕES

Este trabalho tratou de alguns aspectos que envolvem o estudo do rompimento hipotético de barragens. Foram abordados assuntos como a gestão de riscos em barragens, a legislação brasileira no âmbito da segurança de barragens, a instituição da Política Nacional de Segurança de Barragens, os modos de ruptura mais comuns, como galgamento, *piping* e instabilidade de taludes, além dos parâmetros a serem considerados na avaliação das consequências de uma provável ruptura, a importância da elaboração do Plano de Ação Emergenciais da barragem, cuja responsabilidade, segundo o PNSB, é de responsabilidade do empreendedor da barragem e que deve conter o plano de evacuação da área atingida.

A metodologia utilizada provou ser suficiente para o alcance do objetivo assim como foi possível observar a aplicabilidade do modelo HEC-RAS acoplado com o modelo digital do terreno disponível através do Programa Pernambuco Tridimensional. Porém, para a simulação da onda de cheia utilizando o modelo HEC-RAS, ou outros programas embasados nas equações de Saint-Venant, encontra-se algumas limitações visto que essa equação não foi desenvolvida para escoamentos bruscamente variados, sendo necessário inúmeras considerações particulares. Este fenômeno, descrito pela variação brusca da vazão e da profundidade do nível de água, corresponde à criação de regiões de forte aceleração vertical, invalidando a hipótese da distribuição hidrostática de pressões. Sendo assim, há uma descontinuidade no escoamento e as hipóteses utilizadas para a dedução das equações de Saint-Venant são invalidadas, o que pode gerar resultados não confiáveis em algumas situações. Também foi de fundamental importância a obtenção do hidrograma de ruptura, obtido utilizando o método de Mascarenhas (1990).

Os resultados mostram a importância do gerenciamento das obras. De modo geral os governos dão pouca importância à manutenção das barragens e se faz necessário um gerenciamento efetivo visto que a passagem da onda de cheia poderia ocasionar diversos danos, tais como: inundação de propriedades e residências, prejuízos econômicos diretos e indiretos, impactos na fauna e na flora, além do potencial risco de perda de vidas humanas fazendo-se necessário um plano que possa retirar de forma organizada as pessoas das áreas de risco.

O modelo mostra um cenário catastrófico, tanto para Tupanaci como Floresta, tendo em vista a altura em que a lâmina d'água alcançaria as cidades (11,2m e 11,9m, respectivamente) cobrindo em sua quase totalidade as casas que ali se situam. Além disso, chama atenção o pouco tempo disponível (3 horas, apenas) para a total evacuação dos moradores de Tupanaci. Para o município de Ibimirim, a onda de cheia atingiria todo o município e a rodovia PE-360 em um

intervalo de apenas 3 horas após o início do rompimento e alcança uma profundidade máxima de 27,1 m.

Conclui-se, portanto que embora os resultados sejam hipotéticos e não devem ser encarados como exemplo real do que pode acontecer, espera-se uma alerta aos órgãos responsáveis da importância fundamental de constantes ações de manutenção na estrutura da barragem e as informações adquiridas servem de subsídio para o desenvolvimento do PAE devido a sua extrema importância a fim de garantir a segurança de todos.

Para trabalhos futuros recomenda-se a elaboração do Plano de Ação de Emergências para as cidades afetadas pela cheia, sendo de grande serventia para a população que habita ao longo do curso dos rios analisados. Esses mapas, além de indicar as zonas de risco, devem apontar as possíveis rotas de fuga, locais de abrigo e hospitais. Cabe também, para a quantificação do seguro e de possíveis indenizações, o cálculo monetário das consequências, o que pode exigir uma carga de trabalho maior que a da simulação da inundação em si. Nesse caso, faz-se necessário um banco de dados dos edifícios das cidades, associado a seu valor de mercado, juntamente com um mapa de ocupação territorial, classificando os bairros pela densidade demográfica.

REFERÊNCIAS

A HISTÓRIA das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI : cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens / [coordenador, supervisor, Flavio Miguez de Mello ; editor, Corrado Piasentin]. - Rio de Janeiro : CBDB, 2011.524 p.

AGÊNCIA Nacional de Águas – ANA (2018). **Coordenação de Marcos Regulatórios e Alocação de Água.** Disponível em: < <http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/regulacao/resolucoes-e-normativos/regras-especiais-de-uso-da-agua/alocacao-de-agua-pe> >. Acesso em 13/01/2018.

AGÊNCIA Nacional de Águas – ANA (2012). Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, R 06 – **Estudos de Ruptura de Barragens.** 113p.

AGÊNCIA Nacional de Águas – ANA (2012). **Resolução nº 91, 02 de abril de 2012.**

AGÊNCIA Nacional de Águas – ANA (2015). **Relatório de Segurança de Barragens 2014.** Brasília: Agência Nacional de Águas, 150p.

AGÊNCIA Nacional de Águas – ANA (2016). **Relatório de Segurança de Barragens 2015.** Brasília: Agência Nacional de Águas, 168p.

AGÊNCIA Nacional de Águas – ANA (2017). **Relatório de Segurança de Barragens 2016.** Brasília: Agência Nacional de Águas, 225p.

AGÊNCIA Pernambucana de Águas e Climas – APAC (2017). **Bacias Hidrográficas.** Rio Pajeú. Disponível em : < http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5&subpage_id=20 >. Acesso em 12/11/2017.

ASSIS, A.P., Hernandez, H.M. & Colmanetti, J .P. **Apostila de barragens.** Publicação G.AP-AA00 6/02. Brasília, DF 2006. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/5227851/apostila_barragens>. Acesso em 12/01/2018.

BLOG Pet Civil - UFJF, 2015. **Barragens : finalidade e estrutura.** Disponível em :< <https://blogdopetcivil.com/2015/11/09/barragens-finalidades-e-estrutura/> >. Acesso em 10/01/2018.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas- DNOCS (2004). **Notícias.** Publicado em 12/05/2014. Disponível em : < http://www.dnocs.gov.br/php/comunicacao/noticias.php?f_registro=3268&f_opcao=imprimir&p_view=short&f_header=1& > . Acesso em 29/01/2018.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas- DNOCS. **Relatório 2005.** Fortaleza: DNOCS (2006). Disponível em: <<http://www.dnocs.gov.br/mapa/acudes.php>>. Acesso em 10/01/2018.

BRASIL. Presidência da República. LEI Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

CONSELHO Nacional de Recursos Hídricos - CNRH. **Resolução nº 143, de 10 de julho de 2012**. Publicado no Diário Oficial da União em 04/09/2012.

COLLISCHONN, W; Tucci, C.E.M. **Análise do rompimento hipotético da barragem de Ernestina**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, volume 2, n.2, JUL/DEZ 1997, 191-206.

COMISSÃO Internacional de Grandes Barragens – CIGB, PR, 2008.

DOOGE, J. **Water and ethics: ethics of water-related disasters**. UNESCO, Saint-Denis, Paris, 2004, 29 p.

FONTENELLE, M.C.; Fontenelle, A.S.; Matos, Y.M.P.; Monteiro, F.F.; **Avaliações de risco em barragens : Estudo de caso da Barragem Malcozinhado no Nordeste Brasileiro**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, volume 14, nº 1, 25-42, jan/jun 2018.

FRANCO, C.A. **Segurança de Barragens: Aspectos Regulatórios**. Dissertação de mestrado, UFG, 2008.

GOVERNO da Paraíba, 2016. **Ricardo entrega obras da Barragem Nova Camará nesta sexta-feira**. Disponível em: < <http://paraiba.pb.gov.br/ricardo-entrega-obras-de-reconstrucao-da-barragem-nova-camara-nesta-sexta-feira/>>. Setembro/2016. Acesso em : 20/11/2017.

GUIA Básico de Segurança de Barragens – CBDB, SP, 2001.

INSTITUTO Brasileiro de Geografia e Estatísticas - IBGE. **Cidades**. População estimada do município de Tupanaci, 2010. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Tupanaci> > . Acesso em 15/01/2018.

INSTITUTO Brasileiro de Geografia e Estatísticas - IBGE. **Cidades**. População estimada do município de Floresta, 2017. Disponível em: < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/floresta/panorama>>. Acesso em 15/01/2018. Ibimirim - < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/ibimirim/panorama>>. Acesso em 20/01/2018.

ICOLD. **Dams and the World's Water – Na Educational Book that Explains how Dams Help to Manage the World's Water**. International Commission on Large Dams, Paris, 2007.

ICOLD. **Dam break flood analysis: review and recommendations** – Bulletin 111. International Commission on Large Dams, Paris, 1998.

LAURIANO, A. W. **Estudo de Ruptura da barragem de Funil: comparação entre os modelos FLDWAD e HEC-RAS**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG, Belo Horizonte, 2009, 251 p.

LOPES, L. M. N. (2016). **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais**. Sinapse Múltipla. 5(1), pp. 1-14.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação Matemática de Ondas Provocadas por Ruptura de Barragens**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1990, 291 p.

SÁ, G. (2014). **MEMÓRIA: Há 18 anos a Barragem de Serrinha era inaugurada em Serra Talhada**. Farol de Notícias, 2014. Disponível em: <<http://faroldenoticias.com.br/memoria-ha-18-anos-a-barragem-de-serrinha-era-inaugurada-em-serra-talhada/>>. Acesso em 15/05/2017.

MEDEIROS, C.H. de A.C. **How Risky can be a Risk Assessment Technique on Safety Dams Evaluation – A Critical Review**. In: *73rd Annual Meeting, ICOLD, Teerã, 2005*.

MENDES, L. O. (2016). **Avaliação dos Danos Potenciais em Comunidades Afetadas por Rompimento de Barragens**. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF – AA- 003/16. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93p.

MOECKE, G.C. **Análise do rompimento hipotético da barragem oeste do vale do Rio Itajaí**. Dissertação (Graduação) Universidade Federal de Santa Catarina.

OLIVEIRA, L.C; **Da montante à jusante : A água como elemento de conflitos em açudes do espaço Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú – Semi-árido de Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

PERNAMBUCO Tridimensional. Disponível em: < <http://www.pe3d.pe.gov.br/>>.

PERNAMBUCO. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Agência Estadual de Meio Ambiente -CPRH. **SIG Caburé, 2017**. Disponível em: < <http://sigcabure.cprh.pe.gov.br/index.jsp>>. Acesso em 15/05/2017.

REDE Globo: G1 no Mundo. **Risco de colapso em barragens na Califórnia provoca saída de mais de 188 mil pessoas**. Disponível em : < <https://g1.globo.com/mundo/noticia/mais-de-188-mil-sao-retirados-apos-problema-em-barragem-da-california.ghtml>>. Março de 2017. Acesso em 18/11/2017.

SÁ, M.G.R. *et al.* **Vazão na comporta da Barragem de Serrinha**. In : II Workshop Internacional: Sobre Água no Semiárido Brasileiro. Serra Talhada – PE.

SILVEIRA, J.F.; CARNEIRO, E.F.; PÍNFARE J.C. **O Grande Potencial Apresentado pela Análise de Risco de Usinas Hidrelétricas – A Experiência da CESP**. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belém – Pa, 2007.

SÓRIA, Miguel; **50 anos do acidente de Vajont, Itália (1963-2013)**. Disponível em : < http://www.cbdb.org.br/site_antigo_2013/img/45geral2.pdf >. Fevereiro/2013. Acesso em : 20/01/2018.

TOMAZ, P; **Curso de Manejo de águas pluviais – Capítulo 8 – Falhas em pequenas barragens**. 2013.

UEMURA, S. **Instrumentos de avaliação e gestão de impactos gerados por rupturas de barragens**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

U. S. Army Corps of Engineers - USACE. HEC–RAS. **River Analysis System Hydraulic User’s Manual**. Hydrologic Engineering Center (HEC), 2010.

ANEXO I
QUADRO PLARA CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS PARA DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS E REJEITOS

NOME DA BARRAGEM	
NOME DO EMPREENDEDOR	
DATA	

I1 - CATEGORIA DE RISCO:		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		0

Faixas de Classificação	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 60 ou EC* = 10 (*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	< = 35

(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

I2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO:		Pontos
Faixas de Classificação	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)	
	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	7 < DPA < 13
	BAIXO	< = 7

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:

	CATEGORIA DE RISCO	Alto / Médio / Baixo
--	---------------------------	----------------------

	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	Alto / Médio / Baixo
--	---------------------------------	----------------------

1.1 - QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)

1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS - CT

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)
Altura \leq 15m (0)	Comprimento \leq 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)
30m \leq Altura \leq 60m (4)	200 \leq Comprimento \leq 600m (2)	TR = 500 anos (5)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR Inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10)

$CT = \sum (a \text{ até } c)$	
--------------------------------	--

1.1 - QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)

2 - ESTADO DE CONSERVAÇÃO - EC

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (g)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)

$$EC = \sum (d \text{ até } g)$$

1.1 - QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)

3 - PLANO DE SEGURANÇA DA BARRAGEM - PS

Documentação de Projeto (h)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (i)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (j)	Plano de Ação Emergencial - PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (l)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto básico (5)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto conceitual (8)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)
Não há documentação de projeto (10)	-	-	-	Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8)

$$PS = \sum (h \text{ até } l)$$

1.2 - QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO DANO POTENCIAL ASSOCIADO - DPA (RESÍDUOS E REJEITOS)

Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socio-econômico (d)
Muito Pequeno < = 500 mil m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	MÉDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ (4)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8)	ALTO (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância socio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande > = 50 milhões m ³ (5)	-	MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I- Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10)	-

$$DPA = \sum (a \text{ até } d)$$

ANEXO II
QUADRO PARA CLASSIFICAÇÃO DAS BARRAGENS DE ACUMULAÇÃO DE
ÁGUA

NOME DA BARRAGEM:	
NOME DO EMPREENDEDOR:	
DATA:	

II.1 - CATEGORIA DE RISCO:		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		0

Faixas de Classificação	CATEGORIA DE RISCO		CRI
	ALTO		≥ 60 ou $EC^* \geq 8$ (*)
	MÉDIO		35 a 60
	BAIXO		≤ 35

(*) Pontuação (maior ou igual a 8) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

II.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO:		Pontos	
DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)			
Faixas de Classificação	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		DPA
	ALTO		≥ 16
	MÉDIO		$10 < DPA < 16$
	BAIXO		≤ 10

RESULTADO FINAL DA AVALIAÇÃO:		
CATEGORIA DE RISCO		Alto / Médio / Baixo
DANO POTENCIAL ASSOCIADO		Alto / Médio / Baixo

2.1 - QUADRO DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (ACUMULAÇÃO DE ÁGUA)

1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS – CT

Altura (a)	Comprimento (b)	Tipo de Barragem quanto ao material de construção (c)	Tipo de fundação (d)	Idade da Barragem (e)	Vazio de Projeto (f)
Altura \leq 15m (0)	comprimento \leq 200m (2)	Concreto convencional (1)	Rocha sã (1)	entre 30 e 50 anos (1)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (3)
15m < Altura < 30m (1)	Comprimento > 200m (3)	Alvenaria de pedra / concreto ciclópico / concreto rolado - CCR (2)	Rocha alterada dura com tratamento (2)	entre 10 e 30 anos (2)	Milenar (5)
30m \leq Altura \leq 60m (2)	-	Terra homogênea / enrocamento / terra enrocamento (3)	Rocha alterada sem tratamento / rocha alterada fraturada com tratamento (3)	entre 5 e 10 anos (3)	TR = 500 anos (8)
Altura > 60m (3)	-	-	Rocha alterada mole / saprolito / solo compacto (4)	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação (4)	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10)
-	-	-	Solo residual / aluvião (5)	-	-

CT = \sum (a ate f):