



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
MESTRADO PROFISSIONAL EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL
INSTITUTO DE QUÍMICA

GERALDO MAGELA PEREIRA

DESCRIÇÃO DE CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS
A PARTIR DA DÉCADA DE 50, EM ÂMBITO MUNDIAL

Niterói

2017

GERALDO MAGELA PEREIRA

**DESCRIÇÃO DE CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS
A PARTIR DA DÉCADA DE 50, EM ÂMBITO MUNDIAL**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Mestrado Profissional em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Defesa e Segurança Civil. Área de concentração: Planejamento e Gestão de Eventos Críticos. Linha de Pesquisa: Desastres Mistos.

Orientador:

Professor Antônio Ferreira da Hora, D.Sc.

Niterói

2017

GERALDO MAGELA PEREIRA

**DESCRIÇÃO DE CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS
A PARTIR DA DÉCADA DE 50, EM ÂMBITO MUNDIAL**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Mestrado Profissional em Defesa e Segurança Civil da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção de grau de Mestre em Defesa e Segurança Civil. Área de concentração: Planejamento e Gestão de Eventos Críticos. Linha de Pesquisa: Desastres Mistos.

Aprovada em

Banca Examinadora

Prof. Dr. Antonio Ferreira da Hora.
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. José Rodrigo de Moraes.
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Alberto Sayão.
Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio de Janeiro

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Cristine, as minhas filhas Ligia e Marina pelo apoio constante e aos meus pais Geraldo e Luiza, *in memoriam*, que muito zelaram pela minha educação.

Ao meu orientador Antônio da Hora pelo estímulo e atencioso comprometimento na realização e elaboração de minha tese de mestrado, demonstrando uma incrível dimensão de orientador e orientação.

A minha Professora Mônica da Hora que durante esses dois anos sempre esteve pronta para me ajudar de forma competente e atenciosa.

Aos meus demais mestres e amigos que participaram direta ou indiretamente na conclusão dessa etapa de minha vida acadêmica, entre tantos outros.

Muito obrigado!

RESUMO

As barragens são construídas desde a antiguidade e sua engenharia é parte vital da história da civilização. Sem dúvida, foram as primeiras estruturas feitas pelo homem com o objetivo de criar reservatórios visando, principalmente, armazenar água para abastecimento da população. Com o passar do tempo, verificou-se que os reservatórios armazenam também grandes volumes de energia potencial que em caso de ruptura será liberada subitamente e poderá ocasionar desastres. As rupturas de barragens sempre causam danos de porte à infraestrutura e para as populações ribeirinhas a jusante que excedem a capacidade dessas comunidades de reconstruir com recursos próprios. Além de danos ao meio ambiente, ocasionam, frequentemente, perdas de vidas humanas. Após uma série de rupturas catastróficas a partir da década de 50, diversos países começaram a adotar medidas visando à segurança de suas barragens. Nos Estados Unidos, somente em 1976, após a ruptura da barragem de Teton (Idaho), o governo iniciou estudos para dar suporte ao planejamento e à implantação de um sistema de segurança de suas barragens. Esses estudos permitiram concluir-se que 59% dos acidentes são devido a causas geotécnicas, 23% a causas hidrológicas e 12% a construção deficiente. No presente trabalho apresentam-se resumos de alguns acidentes famosos com barragens para ilustrar o problema e para ressaltar o fato de que somente observando os critérios de projeto e as boas práticas construtivas consolidadas mundialmente conseguir-se-á reduzir ainda mais riscos dessas ocorrências.

Palavras-chave: barragens, acidentes, causas, critérios de projeto, práticas construtivas.

ABSTRACT

Dams have been built since antiquity and their engineering is a vital part of the history of civilization. Undoubtedly, were the first man-made structures to create the reservoirs mainly for water supply. Over time it has been found that the reservoir store also large volumes of potential energy that in case of rupture will be suddenly released and could cause disasters. Dam breaks always cause significant damage to the infrastructure and to the downstream riparian populations. These damages normally exceed the capacity of these communities to rebuilt with their own resources. Besides damages to the environmental, accidents often cause loss of human lives. After a series of catastrophic ruptures in the 1950s, several countries began to adopt measures aiming the safety of their dams. In the USA only in 1976 after the Teton dam break (Idaho) the government has begun studies to support the planning and implementation of a dam safety system. These studies led to the conclusion that 59% of the accidents are due to geotechnical causes, 23% to hydrological causes and 12% to poor construction. The present work summarizes some famous dam accidents to illustrate the problem and to emphasize that only observing the design criteria and the good constructive practices we will be able to further reduce even more the risks of these occurrences.

Keywords: dam, accidents, causes, design criteria, construction practices

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Orós. Mapa de localização do açude	12
Figura 2 – Orós. Vista aérea	12
Figura 2A – Orós. Vertedouro operando	12
Figura 3 – Orós. Seção da barragem	13
Figura 4 – Orós. Planta do vertedouro	13
Figura 5 – Orós. Perfil e foto do vertedouro	14
Figura 6 – Orós. Seção da barragem	15
Figura 7 – Orós. Galgamento da barragem	15
Figura 8 – Orós. Área do vertedouro após o galgamento	16
Figura 9 – Açude e cidade de Orós	16
Figura 10 – Barragens de Euclides da Cunha e Limoeiro. Reservatórios	17
Figura 11 – Euclides da Cunha. Ruptura	18
Figura 12 – Limoeiro. Ruptura	18
Figura 13 – Euclides da Cunha. Reconstruída	18
Figura 14 – Limoeiro. Reconstruída	18
Figura 15 – Algodões. Mapa de localização da barragem	19
Figura 16 – Barragem de Algodões. escoamento proveniente do vertedouro lateral atacando e erodindo o talude da estrada de acesso à barragem, a jusante do muro de encosto da barragem	20
Figura 16A – Barragem de Algodões. Erosão a jusante do muro de encosto	20
Figura 17 – Algodões. Vertedouro. Queda de placa de concreto	20
Figura 18 – Canal do vertedouro lateral e muro de encosto da barragem	20
Figura 19 – Escorregamento do talude do canal	20
Figura 20 – Algodões. Barragem rompida	20
Figura 21 – Barragem Camará. Mapa de localização	21
Figura 22 – Camará rompida. Imagem do reservatório	21
Figura 23 – Camará. Vistas da marca do NA e da ruptura	22
Figura 24 – Camará. Detalhe 1 da junta-falha	23
Figura 25 – Camará. Detalhe 2 da junta falha	23

Figura 26 – Camará. Vista de jusante da reconstrução	24
Figura 27 – Camará. Vista de montante da barragem	24
Figura 28 – Camará. Vista da barragem	25
Figura 29 – Camará. Vista do vertedouro	25
Figura 30 – El Guapo. Localização da barragem	26
Figura 31 – El Guapo. Barragem e reservatório	26
Figura 32 – El Guapo. Escoamento extravasando os muros da calha	27
Figura 33 – El Guapo. Ruptura da barragem	27
Figura 34 – El Guapo. Reconstruída	27
Figura 34A – El Guapo. Vertedouro operando	27
Figura 35 – Banqiao. Mapa de localização da barragem	28
Figura 36 – Banqiao. Barragem rompida	29
Figura 36A – Banqiao. Comporta rompida	29
Figura 37 – Banqiao. Planta da barragem reconstruída	29
Figura 38 – Teton. Mapa de localização da barragem	30
Figura 39 – Barragem de Teton: sequência de ruptura	31
Figura 39A - Ilustração esquemática da ruptura da barragem de Teton	31
Figura 40 – Barragem de Teton-Seção na ombreira	32
Figura 41 – Malpasset. Mapa de localização da barragem	33
Figura 42 – Malpasset - Vista de jusante da barragem antes e após a ruptura	34
Figura 43 – Malpasset. Barragem rompida	34
Figura 44 – Malpasset. Descarregador de fundo	34
Figura 45 – Barragem de Malpasset: corte longitudinal	35
Figura 46 – Barragem de Malpasset: seção transversal	35
Figura 47 – Vajont. Mapa de localização da barragem	36
Figura 48 – Vajont. Área impactada pelo deslizamento	36
Figura 49 – Barragem de Vajont durante o enchimento	38
Figura 50 – Barragem de Vajont após o deslizamento	38
Figura 51 – Longarone antes do acidente	38
Figura 52 – Longarone arrasada	38
Figura 53 – Longarone 40 anos depois (2003)	38
Figura 54 – Longarone em 2003	38

Figura 55 – Glashütte. Mapa de Localização da barragem	39
Figura 56 – Barragem Glashütte - Planta e Seção Longitudinal	39
Figura 57 – Barragem Glashütte sendo galgada e rompida. Detalhe do bueiro à direita	40
Figura 58 – Vertedouro em degraus	40
Figura 59 – Glashütte - Danos na cidade	40
Figura 60 – Barragem Glashütte reconstruída. Observar vertedouro tulipa	40
Figura 61 – Vertedouro de emergência em primeiro plano, vertedouro de serviço e barragem ao fundo	42
Figura 62 – Vista superior do incidente	43
Figura 63 – Danos no vertedouro de serviço	43
Figura 64 – Calha quebrada	43
Figura 65 – Vertedouro de emergência funcionando. Erosão na esquerda hidráulica no pé da soleira com possibilidade de regredir para montante e colapsar o vertedouro	43
Figura 66 – Porque a Barragem de Oroville não iria colapsar	44
Figura 67 – Vertedouro de Serviço. Laje da calha quebrada (90m x 150m x 15m). Detalhes A, B e C.	45
Figura 68 – Vertedouro de emergência. Reparos emergenciais, com blocos de rocha	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição percentual das barragens segundo a causa de ruptura	3
Tabela 2 – Classificação das barragens quanto à ruptura	7
Tabela 3 – Revisão recomendada dos cálculos e do PAE	7
Tabela 4 – Inclinação dos taludes versus Materiais versus Altura da barragem	8
Tabela 5 – Dez Casos de Rupturas de Barragem	11

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABMS	Associação Brasileira de Mecânica dos Solos
ANA	Agência Nacional de Águas
ASCE	American Society of Civil Engineers
CAGEPA	Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CBDB/NRSP	Comitê Brasileiro de Barragens/Núcleo Regional da São Paulo
CBDB/CNB	Comitê Brasileiro de Barragens/Cadastro Nacional de Barragens
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CCV	Concreto Convencional
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CHERP	Centrais Hidroelétricas do Rio Pardo
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
DHE	Division of Hydraulic Engineering
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPOH	Departamento de Projetos de Obras Hídricas
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil
ENGEVIX	Engevix Engenharia
EUA	Estados Unidos da América
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas
HIDROESB	Laboratório Hidrotécnico Saturnino de Brito
IAHR	International Association for Hydro-Environment Engineering and Resources
ITAIPU	Itaipu Binacional
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
CEHPAR	Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza
LBS	Large Brazilian Spillways
MDB	Main Brazilian Dams
MIN	Ministério da Integração Nacional
NIT	Norwegian Institute of Technology

PAE	Plano de Ação de Emergência
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
THEMAG	Themag Engenharia
UGPO	MIN-Secretaria de Infraestrutura Nacional, Pro-Água/Semi-Árido
USA	United States of America
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
USCOLD	United States Committee on Large Dams
UFPR	Universidade Federal do Paraná

GLOSSÁRIO

Anfibolito	Rocha metamórfica na qual domina o anfibólio (hornblenda) associado a um feldspato básico e a micas, podendo ainda possuir quartzo. É uma rocha pesada e de coloração muito escura (GUERRA, 1980)
Anisotropia	Característica de alguns materiais ou rochas cujas propriedades se alteram ou se modificam dependendo das direções em que são medidas
Barragem	Qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (Definição contida na Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragem)
Bentonita	Argila coloidal, do tipo montemorilonita, produzida por devitrificação e alteração de cinzas ou tufos vulcânicos, muito absorvente
Borda-livre	Folga entre a elevação do nível d'água máximo maximorum do reservatório e elevação da crista da barragem
Carga cíclica	Carga advinda de um terremoto
Carga hidráulica	Altura de água; por exemplo – sobre a crista do vertedouro
Cavitação	Fenômeno hidráulico no qual o escoamento em alta velocidade (> 35 m/s) por qualquer razão sofre uma queda brusca e persistente de pressão até -6,0 m, se vaporiza formando cavidades de vapor que implodem ao adentrar numa zona de alta pressão imediatamente a jusante liberando grandes quantidades de energia e danificando a superfície de contorno (seja concreto ou aço)
Cheia	Vazão de projeto do vertedouro estimada pela equipe de hidrologia; essa vazão é associada a um tempo de recorrência / probabilidade
Cisalhamento	Ação de cisalhar, de cortar ou de causar deformação; corte. Tipo de tensão mecânica gerada pela aplicação, num mesmo objeto, de forças em sentidos contrários, mas com a mesma direção, causando tensão tangencial de corte
Comporta	Equipamento móvel usado para barrar o fluxo; barragem móvel
Crista	Topo/elevação da estrutura; por exemplo – crista da barragem
<i>Cutoff</i>	Trincheira escavada sob a barragem e preenchida com material impermeável para vedação
Deslizamento	Escorregamento de uma massa de material terroso (solo e rocha)
Diáclase	Fratura, fenda ou junta, falha (GUERRA, 1980)

Diaclasada	Fraturada
Drenagem	Facilitar a saída da água que infiltrou pela barragem ou fundação, para aliviar a pressão da água, chamada pressão neutra
Enrocamento	Bloco de pedra de tamanho variado; barragem de pedras
Falha	Ruptura e desnivelamento na continuidade das camadas que apresentam certo grau de rigidez por ocasião de movimento tectônicos. Na frente da falha se verifica, quase sempre, a existência de um desnível relativo as diferentes camadas. Existem diversos tipos de falhas - ver Figura 46 (GUERRA, 1980))
Foliação	Termo relacionado com estruturas planares não só para rochas metamórficas como também para rochas magmáticas devido ao arranjo paralelo dos minerais; bandamento; gnaissificação; acamamento
Galgamento	é o processo de inundação e ruptura da barragem por excesso de água que excedeu a capacidade de vazão do vertedouro e preencheu a borda-livre do reservatório
Isotropia	Característica de alguns materiais ou rochas cujas propriedades se mantêm iguais em todas as direções em que são medidas
Jusante	O lado depois do eixo da barragem; o lado oposto ao reservatório
Lineação	Idem a foliação
Materiais deletérios	Que destrói ou danifica; materiais deletérios – minerais solúveis como gipsita podem ser removidos e deixar canais ou causar recalque devido à perda de volume; erosão de argila dispersiva pode causar percolação de água; decomposição de madeira ou outra matéria orgânica pode deixar vazios e causar trincas
Montante	O lado antes do eixo da barragem; o lado do reservatório
Ombreira	Morro onde a barragem se encosta (ombro)
Percolação	Fluxo de água pelo maciço ou pela fundação da barragem
Recalque	Assentamento da fundação; rebaixamento do solo de fundação
Recorrência	Tempo de recorrência, período de recorrência, tempo de retorno, é o intervalo médio de anos em que pode ocorrer ou ser superado um dado evento: $Tr = 1/F = 1/P$, em que F = frequência; P = probabilidade teórica
Reservatório	Caixa de água criada pela barragem
Ruptura	Rompimento; quebra

Segurança de barragem	Condição que vise manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente (Definição contida na Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragem)
Selada	Impermeabilizada
Sítio	Local da barragem
Subsidência	Afundamento; descida
Talude	Inclinação na superfície lateral de um aterro; rampa; declive
Vedação	Impermeabilização
Vertedouro	Extravasador da barragem
Xistosidade	Idem foliação

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 RELEVÂNCIA	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
2-CAUSAS DE RUPTURAS DE BARRAGENS-REVISÃO	4
3-CASOS SELECIONADOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS.....	10
3.1 AÇUDE DE ORÓS	11
3.2 BARRAGENS DE EUCLIDES DA CUNHA E LIMOEIRO.....	17
3.3 BARRAGEM DE ALGODÕES I.....	18
3.4 BARRAGEM CAMARÁ	21
3.5 BARRAGEM DE EL GUAPO	26
3.6 BARRAGEM DE BANQIAO.....	28
3.7 BARRAGEM DE TETON.....	30
3.8 BARRAGEM DE MALPASSET	33
3.9 BARRAGEM DE VAJONT	36
3.10 BARRAGEM DE GLASHÜTTE	39
3.11 O INCIDENTE DE OROVILLE	40
4-CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
APÊNDICE A.....	50
APÊNDICE B.....	52

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As barragens são estruturas que vêm contribuindo de maneira efetiva ao longo dos anos para o progresso da humanidade. No Brasil, segundo o CBDB/CNB (2015), existem 1.400 barragens, aproximadamente.

As barragens criam reservatórios que possibilitam o armazenamento de água para usos múltiplos: abastecimento humano, dessedentação de animais, irrigação e geração de energia. Além disso, os reservatórios possibilitam o controle de cheias e a regularização das vazões, funções essas de extrema importância. Nas fases de projeto, construção e operação das barragens, visando aumentar a segurança dessas estruturas, são observadas diretrizes, normas técnicas e critérios de projeto reconhecidos mundialmente. As revisões periódicas da segurança são de extrema importância para a gestão dos riscos.

No Brasil, ELETROBRÁS/CBDB (2003) consolidaram essas diretrizes no documento “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas”. Trata-se de documento abrangente e detalhado que aborda os critérios hidrológicos e os dimensionamentos hidráulicos; trata dos ensaios para caracterizar os materiais para o concreto; das ações de projeto e das condições de carregamento; as barragens e estruturas de concreto, incluindo a segurança global; as barragens de terra e enrocamento; as juntas; as escavações e o tratamento das fundações; a instrumentação das obras; e, em anexo, o estudo de ruptura da barragem, incluindo o PAE (Plano de Ações Emergenciais). Cabe também destacar o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens e o Manual do Fiscalizador de Segurança de Barragens, ambos elaborados por ANA (2016). As revisões periódicas desses critérios, da ELETROBRÁS ou da ANA, são de extrema importância para gestão dos riscos advindos da possibilidade de ocorrência de acidentes.

Atualmente, além desses critérios, devem ser obrigatoriamente observados os requisitos prescritos nas leis:

- Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010); e,
- Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (BRASIL, 2012).

Destaca-se que, apesar da baixa probabilidade de ruptura de uma barragem de 0,2% (SERAFIM, 1981), os registros sobre acidentes e tragédias provocadas por rupturas de barragens vêm atraindo mundialmente a atenção da comunidade técnica no sentido de reduzir, ainda mais, os riscos dessas ocorrências.

A partir da década de 50, após uma série de rupturas catastróficas, diversos países começaram a se preocupar e inseriram em suas agendas o tema Segurança de Barragens. Após a ruptura da barragem de Teton em 1976 o governo americano ordenou que o USBR investigasse o assunto. Em 1983, JANSEN, R. B., do USBR, o resultado das investigações foi publicado no livro “*Dams and Public Safety*”, o qual contém a descrição de 41 casos de rupturas de barragens em diversos países, incluindo o caso de Orós no Brasil. A pesquisa constatou que 59% dos acidentes/desastres são causados por causas geológico-geotécnicas, incluindo problemas variados nas fundações; outros 23% são causados por galgamentos das barragens advindos de cheias excepcionais subavaliadas; outros 12% são causados por construção deficiente. Os demais 6% são devidos a atos de guerra, problemas operacionais e fenômenos naturais – terremotos. Esses acidentes são preocupantes porque, além de danos de porte para a infraestrutura e o meio ambiente, provocam, frequentemente, perdas de vidas humanas.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo enfatizar a importância da observação dos critérios de projeto de barragens, consagrados mundialmente, por todas as empresas dedicadas a esse ramo de atividade, a saber: empresas projetistas, empresas construtoras e empresas proprietárias de barragens, visando reduzir ainda mais os riscos de ocorrência de acidentes com essas estruturas. Esses critérios constam do Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas elaborado pela ELETROBRÁS, com apoio de algumas concessionárias, do CBDB (2003), de algumas empresas projetistas e de consultores independentes. Para ilustrar o problema, este trabalho apresenta 11 casos famosos de acidentes com barragens, no Brasil e no exterior, extraídos da bibliografia especializada, os quais são reconhecidos pela comunidade técnica como casos de estudo obrigatório para a evolução no estado da arte no tema de projeto de barragens, enfatizando as lições aprendidas com cada um deles. Esses acidentes ressaltam a importância da integração das equipes de segurança e defesa civil com as comunidades possíveis de serem afetadas por esses desastres nos municípios que apresentam áreas potenciais de risco. Essa integração deve ser constantemente monitorada e atualizada.

1.3 RELEVÂNCIA

A observação das normas e critérios de projeto e das boas práticas de construção das barragens é relevante porque proporciona a redução dos riscos de ocorrência de acidentes/desastres, beneficiando a preservação da segurança das populações ribeirinhas que vivem a jusante dessas barragens e reduzindo as perdas de vidas humanas.

A redução da ocorrência de acidentes contribui para minimizar os trabalhos das equipes de defesa civil e do corpo de bombeiros das Prefeituras, Estados, União e das demais instituições públicas e não governamentais, bem como da sociedade, que atuam no socorro e amparo das vítimas desses desastres e na reconstrução das áreas atingidas.

Adicionalmente, cabe registrar e lembrar que as atividades do Plano de Ação de Emergência (PAE), previstas na Lei 12.334, representam também segurança para as barragens e comunidades ribeirinhas. Essa lei, em seu Art. 2º, Inciso II define Segurança de Barragem como: “Condição que vise manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente”.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi organizado e está apresentado na forma de cinco capítulos.

O Capítulo I, INTRODUÇÃO, apresenta a caracterização e a situação do problema, os objetivos e a importância do estudo.

O Capítulo II, CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES, aborda o tema e a estatística das causas de rupturas de barragem, incluindo as condições adversas em aterros de barragens, e apresenta a classificação das barragens da ELETROBRÁS/CBDB quanto à ruptura, fazendo referência aos Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas também da ELETROBRÁS, obras nas quais as barragens são as estruturas principais.

O Capítulo III, CASOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS, apresenta resumos de alguns acidentes importantes, extraídos da bibliografia, os quais fizeram com que diversos países inserissem em suas agendas o assunto segurança de barragens.

O Capítulo IV, CONSIDERAÇÕES FINAIS, ressalta a importância da observação dos critérios de projeto consagrados mundialmente e das boas práticas construtivas nos projetos e obras das barragens visando reduzir, ainda mais, os riscos de ocorrência desses acidentes.

O Capítulo V apresenta as REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS utilizadas na elaboração do trabalho.

O artigo apresentado no XXXVII *International Sodebras Congress* encontra-se no Apêndice A.

CAPÍTULO II

CAUSAS DE RUPTURAS DE BARRAGENS - REVISÃO¹

Uma barragem ao longo de sua vida útil pode ser afetada por diversos fenômenos naturais tais como cheias, deslizamentos e terremotos, bem como por fenômenos físicos tais como deterioração da fundação e dos materiais utilizados na construção.

Ao longo do tempo a estrutura pode assumir características anisotrópicas. Pressões internas e caminhos de percolação podem se desenvolver. Normalmente, as mudanças são lentas e não são prontamente identificadas por um exame visual.

O monitoramento contínuo do desempenho normalmente assegurará a detecção de falhas que possam conduzir a uma ruptura. Essa atividade de monitoramento deve ser feita por equipe experiente, que conheça os sinais de perigo.

O conhecimento das forças que causam a deterioração é adquirido a partir de análises elaboradas pelos *boards* de consultores após os acidentes. Ressalva-se, no entanto, que esses *boards* não podem prever sempre todas as fraquezas potenciais, nem tampouco os descuidos que as obras possam ter sofrido.

Quanto mais conhecimento é acumulado, mais são encontrados casos de desempenho insatisfatório das barragens de sítio para sítio. As lições são valiosas.

As causas mais frequentes de rupturas de barragem estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição percentual das barragens segundo a causa de ruptura

Causa da ruptura	Natureza do problema	Percentual
Problemas nas fundações	Geológico-geotécnico	40
Vertedouros inadequados	Hidrológica	23
Construção deficiente	Construtiva	12
Recalques diferenciais	Geotécnica	10
Pressões neutras elevadas	Geotécnica	5
Atos de guerra	Político/Social	3
Deslizamento de taludes	Geotécnica	2
Materiais deficientes	Geotécnica	2
Operação inadequada	Operacional	2
Terremotos	Natural	1

Fonte: USBR, 1983.

¹ O capítulo foi adaptado de CRUZ (1996) e USBR (1983).

A análise dos dados apresentados na Tabela 1 permite concluir que 59% dos acidentes são devidos a problemas geológico-geotécnicos nas fundações e 23% a vertedouros inadequados – na realidade ocorrência de cheias que ultrapassaram a capacidade de vazão dos vertedouros e, como consequência, provocaram a elevação dos níveis dos reservatórios e o galgamentos das barragens (cheias subestimadas nos estudos hidrológicos).

Esses acidentes provocam perdas expressivas de vidas humanas e de caráter econômico, social e ambiental, que excedem a capacidade das comunidades afetadas de se recompor com seus próprios recursos.

Deficiências da fundação podem estar relacionadas às condições naturais das fundações, heterogêneas, ou ao seu tratamento durante a construção.

Recalques diferenciais, deslizamentos, altas pressões piezométricas, percolação descontrolada são evidências comuns de perigo. Trincas na barragem, mesmo pequenas, podem também ser um indicativo de um problema de fundação.

Barragens de concreto podem resistir um galgamento sem sofrer danos, pelo menos, por um período limitado de tempo. A chave para a segurança pode ser a habilidade da fundação de resistir ao impacto de um transbordamento, ao invés da resistência da barragem propriamente, a qual é comumente mais do que adequada.

A segurança de barragens em arco é altamente dependente da resistência das ombreiras. A ruptura pode resultar de fraqueza na rocha proveniente de saturação ou deterioração, ou de carregamentos excessivos de cheias, ou da resistência ao cisalhamento da ombreira sob pressões hidrostáticas, como ocorreu em Malpasset na França. Entretanto, barragens em arco são capazes, por natureza, de resistir ao galgamento por cheias como demonstra o caso de Vajont na Itália.

A erosão potencial da fundação por si própria deve ser considerada. Juntas ou falhas preenchidas com argila ou silte não podem ser facilmente removidas por lavagem e, portanto, pode impedir uma vedação eficaz. A percolação pode, gradualmente, remover e transportar esses materiais para jusante, conseqüentemente alargar a junta-falha e ameaçar a integridade da barragem.

Subsidência do terreno causada por bombeamento do subsolo pode causar recalque da fundação e deformação da barragem. Isso também pode ser provocado por ciclos de carregamento e umedecimento. Areias finas e siltes com baixas densidades e baixo teor de umidade são sensíveis a este fenômeno. A conseqüente trinca da barragem pode criar uma condição perigosa, especialmente em barragens de terra de solos com baixa coesão.

Recalques diferenciais em superfícies irregulares rochosas tem sido um problema comum e podem resultar em trincas do aterro. O tratamento da superfície rochosa inclui a remoção de projeções/saliências e preenchimento com concreto projetado.

Rupturas das fundações podem ocorrer por saturação e consequente lavagem ou deslizamento do material. A erosão da fundação pode progredir lentamente, mas deslizamentos podem ocorrer subitamente.

Fundações com resistência ao cisalhamento baixa ou com juntas de material fraco, como argila e bentonita, podem ser vulneráveis ao deslizamento. Juntas de material permeável também podem contribuir para o deslizamento se a percolação por elas não for controlada para impedir subpressão.

Zonas de cisalhamento têm causado problemas frequentes em sítios de barragens e, portanto, precisam ser examinadas minuciosamente. Dois tipos comuns que têm apresentado problemas são: planos de acamamento em rochas sedimentares; e zonas de foliação ou xistosidade em rochas metamórficas, como folhelhos e xistos.

Um trabalho metódico precisa ser feito para identificar e avaliar as foliações potencialmente perigosas, as quais podem ser enganosamente finas. Por causa de sua inerente fraqueza, a recuperação na sondagem pode ser difícil.

Onde essas formações representam ameaças significativas para a barragem ou reservatório, podem ser necessárias, justificadas, escavações exploratórias tipo trincheiras, túneis ou poços.

Uma vez conhecidas as dimensões, orientações e materiais das zonas de cisalhamento, os projetos de engenharia preventiva podem requerer drenagem, injeções de consolidação do maciço, e/ou contrafortes, para reduzir o risco potencial de deslizamento. Drenos verticais ou horizontais, ou de pé, devem reduzir as pressões de água nas zonas de cisalhamento.

As características de deformação dos materiais da barragem não são previsíveis precisamente e os efeitos do tempo e de uma construção deficiente podem também ser incertos. As condições dos materiais podem variar consideravelmente num aterro antigo. Podem existir áreas de baixa resistência, com superfícies pequenas ou grandes. A localização dessas zonas de fraqueza é a chave para a avaliação dessas barragens.

A instabilidade de um aterro pode ser causada por materiais deletérios usados na construção. Minerais solúveis, como gipsita, podem ser levados e deixar canais ou causar recalque devido à perda de volume. Erosão de argila dispersiva pode resultar em percolação de água com baixo teor de sal. Decomposição de madeira ou outra matéria orgânica pode deixar vazios num aterro e causar trincas de recalque.

Condições adversas, bem conhecidas em aterros e que merecem atenção, são:

- Fundações seladas deficientemente;
- Trincas na zona do núcleo e trincas nas zonas de interface;
- Fundações em rochas solúveis;
- Deterioração de membranas estruturais impermeáveis;
- *Cutoffs* de fundação inadequados;
- Desidratação de aterro argiloso;
- Taludes íngremes vulneráveis a deslizamentos;
- Fundações com blocos de rocha suscetíveis a recalques diferenciais;
- Contatos ineficazes entre estruturas contíguas e nas ombreiras;
- Estratos de aterros permeáveis; e,
- Vulnerabilidade a cargas cíclicas durante um terremoto.

Aterros de barragens podem ser danificados a um grau perigoso por distorções em pontos críticos. Após o lançamento dos materiais, se o aterro for mal compactado, ou se o teor de umidade estiver muito baixo, recalques excessivos ou irregulares podem acontecer, especialmente se saturado rapidamente em consequência do primeiro enchimento do reservatório.

Recalques diferenciais podem ser mais severos em ombreiras muito inclinadas e em estruturas enterradas onde é difícil uma compactação efetiva. Em tais locais, o aterro pode trincar ou sofrer uma baixa súbita em arco, abrindo caminhos de percolação que podem ser perigosos. Por essa razão, muitas rupturas ocorreram ao longo de tubulações de descargas de fundo.

Os materiais usados no aterro em contato com o maciço rochoso de fundação, ou concreto em ombreiras, devem possuir propriedades plásticas as quais o permitirão acomodação se algum movimento ocorrer. Nas ombreiras, durante o primeiro enchimento, a saturação dos materiais granulares no espaldar de montante pode resultar em recalques substanciais.

A crista da barragem tende a desenvolver tensões de tração próximo da ombreira e aumentar a compressão nas seções centrais. Neste estágio crítico, o aterro pode se suscetível a trincas transversais.

As deformações de um aterro, ou de sua fundação, podem ter consequências adversas especiais nas estruturas ou contíguas à barragem, tais como: *cutoffs* de concreto finos nas ombreiras podem ser quebrados ou cisalhados; condutos através do aterro podem ser sujeitos à tensão que tende a puxar as juntas; torres verticais dentro do aterro podem ser dobradas e inclinadas.

As barragens de enrocamento lançado foram construídas por muito tempo e prestaram bons serviços, apesar de apresentarem recalques apreciáveis que podem trincar o núcleo.

Enrocamentos compactados com rolos pesados construídos com ângulos mais suaves que o ângulo de repouso do material tem uma resistência inerente à ruptura maior e uma deformabilidade menor que a de um enrocamento lançado e lavado com talude natural.

Por conta dessas dificuldades com as primeiras barragens de enrocamento, desde os anos 60 foram feitas importantes mudanças neste tipo de barragem. Melhorias no zoneamento e na compactação, bem como nos detalhes das fundações, produziram aterros com deformações muito menores e com maiores alturas.

Oportuno registrar que o Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS/CBDB, 2003) apresenta uma classificação das barragens quanto às consequências de uma ruptura hipotética, mostrada na Tabela 2, na qual são considerados os seguintes fatores: populações a jusante, danos materiais, danos ao meio ambiente e danos à infraestrutura da região.

Tabela 2 – Classificação das barragens quanto à ruptura.

Consequências da Ruptura	Perda de Vidas	Danos Econômicos, Sociais e Ambientais
Muito Alta	Significativa	Excessivo
Alta	Alguma	Substancial
Baixa	Nenhuma	Moderado
Muito Baixa	Nenhuma	Mínimo

Fonte: ELETROBRÁS/CBDB, 2003. ANEXO A.

O manual da ELETROBRÁS apresenta também as causas da ruptura e a metodologia de cálculo da brecha e aborda a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), recomendando que os cálculos e o plano devam ser revisados conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Revisão recomendada dos cálculos e do PAE

Consequência da Ruptura	Período entre Reavaliações
Muito Alta	5 anos
Alta	7 anos
Baixa	10 anos
Muito Baixa	10 anos

Fonte: ELETROBRÁS/CBDB, 2003. ANEXO A.

Da mesma forma, cabe fazer referência às Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCH, ELETROBRÁS (2000). Nessas diretrizes podem-se encontrar os critérios de projetos para as pequenas barragens de terra e de enrocamento, bem como para o vertedouro. Desse documento, extraiu-se a Tabela 4 que define os taludes das barragens em função dos materiais e da altura da barragem.

Tabela 4 – Inclinação dos taludes x Material da barragem x Altura da barragem (*)

Material do corpo da barragem	Talude	Altura da barragem H (m) (**)	
		$H \leq 5,0$	$5,0 < H \leq 10,0$
Solos argilosos	Montante	2,00	2,75
	Jusante	1,75	2,25
Solos arenosos	Montante	2,25	3,00
	Jusante	2,00	2,25
Areias e cascalhos	Montante	2,75	3,00
	Jusante	2,25	2,50
Pedras de mão (enrocamento)	Montante	1,35	1,50
	Jusante	1,30	1,40

Fonte: ELETROBRÁS, 2000. Capítulo 7.

(*) Valores usuais considerando-se que o material de fundação não condiciona a estabilidade do talude (casos nos quais as fundações são mais resistentes que os maciços compactados das barragens).

(**) Para barragens com altura > 10 m podem ser usadas às mesmas inclinações dos taludes para as barragens de terra, desde que a estabilidade da barragem seja verificada. Para as barragens de enrocamento convencionais os taludes devem ter, no mínimo, uma inclinação de 1(V):1,65(H).

CAPÍTULO III

CASOS SELECIONADOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS

Foi somente a partir das décadas de 60 e 70 que diversos países começaram a estudar e planejar medidas que pudessem aumentar a segurança de suas barragens, após algumas rupturas catastróficas relacionadas na Tabela 5 a seguir (Nota: esse trabalho não inclui as barragens de rejeitos).

Em 2 de dezembro de 1959, rompeu a Barragem de concreto de Malpasset, no rio Reyran, a 12 km da cidade de Fréjus (sudeste da França), por deformação da fundação margem esquerda. A tragédia destruiu as pequenas vilas de Malpasset e Bozon e causou a morte de 423 pessoas, segundo a ASCE (1976) e o USBR (1983).

Na noite de 25 de março de 1960, a barragem de Orós, no rio Jaguaribe, Ceará, foi galgada e rompida durante a construção (CBDB/MBD 2000 e CBDB/LBS 2002).

Em 8 de agosto de 1975, rompeu a Barragem de terra de Banqiao, no rio Ru, em Zhumadian na Província de Henan, China, rompeu por galgamento, provocando a morte de 26.000 pessoas. Outras 145.000 pessoas morreram de epidemias e fome. Estima-se que 11 milhões de pessoas perderam suas casas (DAI QING, 1998).

Em 5 de junho de 1976, rompeu a Barragem de terra de Teton, com 100 m de altura, construída pelo USBR, no rio Teton, Rexburg, Idaho (EUA), por erosão tubular regressiva (*piping*), durante o primeiro enchimento. O acidente provocou a morte de 11 pessoas e um prejuízo de 1,5-2,0 bilhões de dólares. A partir desse acidente, o governo americano deu então início a um detalhado programa de segurança de suas barragens.

Em 19 de janeiro de 1977, romperam-se as barragens de terra de Euclides da Cunha e Limoeiro, no rio Pardo, na região das cidades de Caconde, São José do Rio Pardo e Mococa, a oeste do Estado de São Paulo, Brasil (CBDB/MBD, 1982).

Em 16 de dezembro de 1999, rompeu a Barragem de terra de El Guapo, no rio de mesmo nome, na Venezuela, a 150 km de Caracas, por insuficiência de capacidade de vazão do vertedouro, o que provocou o galgamento da barragem (USACE, 2014).

Em 12 de agosto de 2002, rompeu a Barragem de Glashütte, na localidade de mesmo nome perto da cidade de Dresden, Alemanha, no rio Briesnitz, por galgamento (BORNSCHEIN e POHL, 2003).

Em 19 de junho de 2004, rompeu a Barragem Camará, no rio Mamanguape, no município de Alagoa Grande, no Estado da Paraíba, por uma descontinuidade notável na fundação da barragem na ombreira esquerda (SAMPAIO, 2014).

Em 27 de maio de 2009, rompeu a Barragem Algodões, no rio Piranji, na cidade de Cocal, no Estado do Ceará, por erosão do aterro a jusante do muro de encosto da barragem na margem direita (SAMPAIO, 2014).

Tabela 5 – Dez Casos de Rupturas de Barragem

Barragem	País	Rio	Data
Malpasset	França	Reyran	02/12/1959
Orós	Brasil	Jaguaribe	25/03/1960
Banqiao	China	Ru	08/08/1975
Teton	Estados Unidos	Teton	05/06/1976
Euclides da Cunha e Limoeiro	Brasil	Pardo	19/01/1977
El Guapo	Venezuela	El Guapo	16/12/1999
Glashütte	Alemanha	Briesnitz	02/08/2002
Camará	Brasil	Mamanguape	19/06/2004
Algodões	Brasil	Piranji	27/05/2009

O processo de conscientização das empresas proprietárias de barragens no Brasil a respeito da segurança foi longo e persiste até os dias de hoje. Atualmente, essas empresas, principalmente as de energia, já dispõem de Planos de Operação e Manutenção bastante detalhados, para as situações normais e emergenciais de operação.

Destaca-se que somente em 1999, foi editado o Guia Básico de Segurança de Barragens pelo CBDB/Núcleo Regional de São Paulo. Em 2002, o Ministério da Integração Nacional (MIN) publicou o seu Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Registra-se ainda que o DNPM tem suas diretrizes de Segurança de Barragens, as quais estão disponíveis na página oficial www.dnpm.gov.br, além do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração.

Apresenta-se a seguir os casos de acidentes com barragens relacionados na Tabela 5. Adicionalmente, apresenta-se também o caso do incidente de Oroville. Esses casos foram escolhidos em função da relevância dos desastres e da disponibilidade de dados na bibliografia. Por oportuno, apresenta-se no Anexo A uma lista detalhada de barragens que romperam desde o final do século XIX (Tabela 6).

3.1 AÇUDE DE ORÓS

A barragem de Orós, 54 m de altura, foi projetada e construída pelo DNOCS no rio Jaguaribe, Ceará (Figura 1). A crista tem 10 m de largura, 620 m de comprimento e eixo semicircular com raio de 150 m (Figura 2). A barragem foi galgada e rompida durante a construção na noite de 25/03/1960 (CBDB/MBD 2000 e CBDB/LBS 2002).

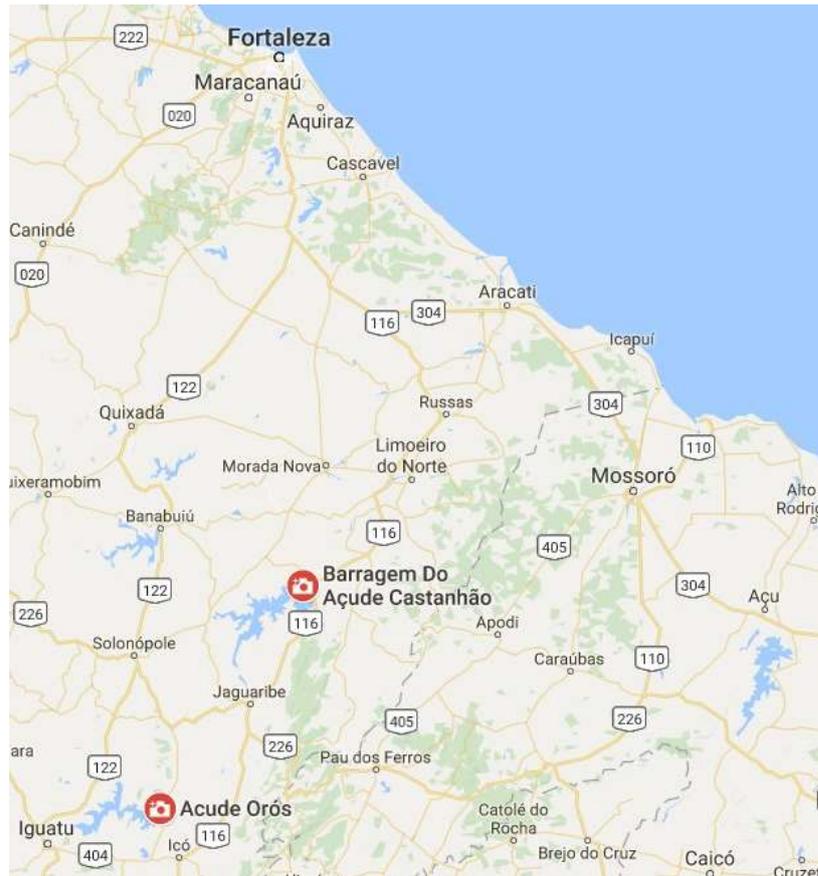


Figura 1 – Orós. Mapa de localização do açude.
Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.



Figura 2. Orós. Vista aérea.



Figura 2A. Orós. Vertedouro operando.

Fonte: CBDB/MBD, 2000.

A seção da barragem (Figura 3) é de enrocamento com núcleo argiloso compactado, 100 m de base (1H:1V), transições de cascalho arenoso (1V:2H) e enrocamento (1V:2,5H).

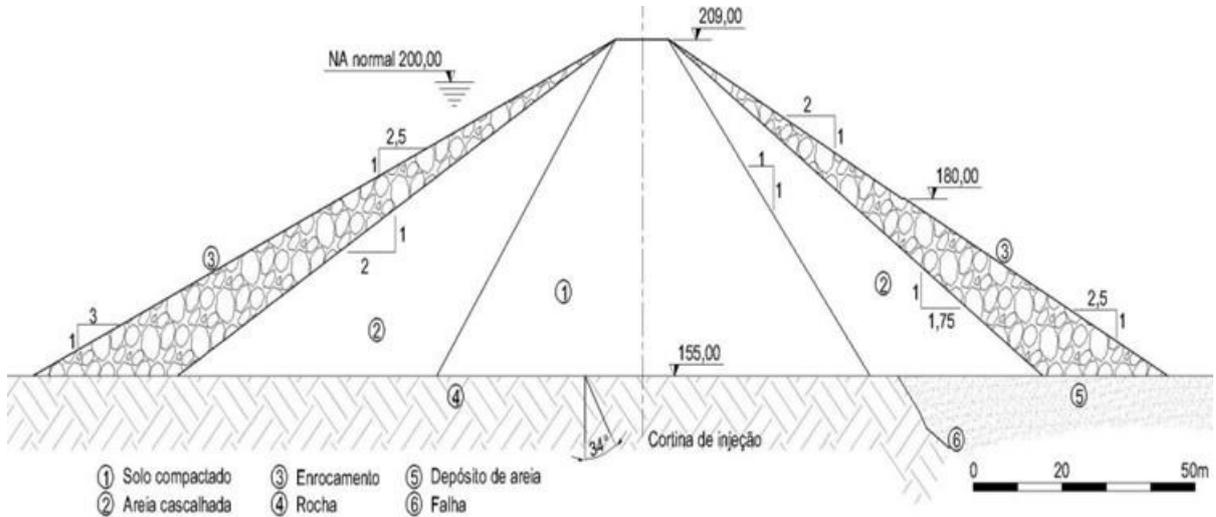


Figura 3 – Orós. Seção da Barragem. Fonte: CBDB/MBD, 2000.

O vertedouro (Figuras 4 e 5) foi dimensionado para uma vazão de $4.400 \text{ m}^3/\text{s}$ para o NA igual a 207 m e crista na El. 200,50 m nos vão centrais e El. 199,50 m nos vão laterais. A capacidade última foi estimada em $5.200 \text{ m}^3/\text{s}$ para o NA igual a 207,80 m. A largura líquida da crista foi estimada em 146 m.

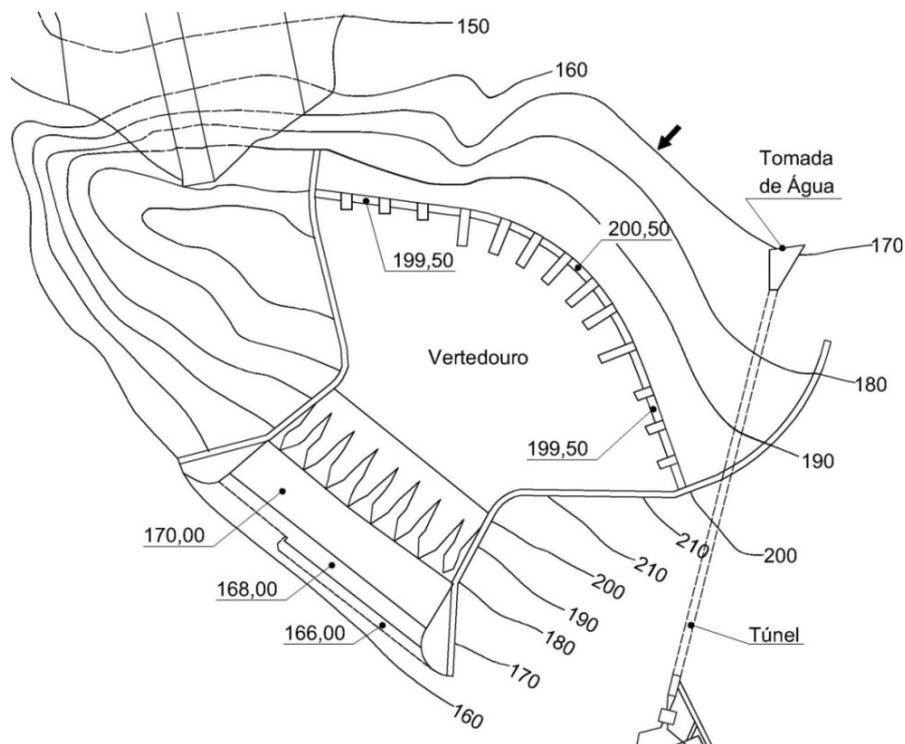


Figura 4 – Orós. Planta do Vertedouro. Fonte: CBDB/LBS, 2002.

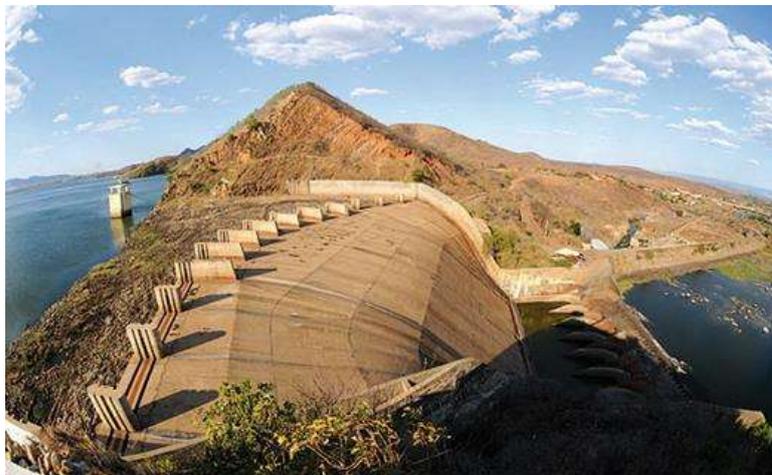
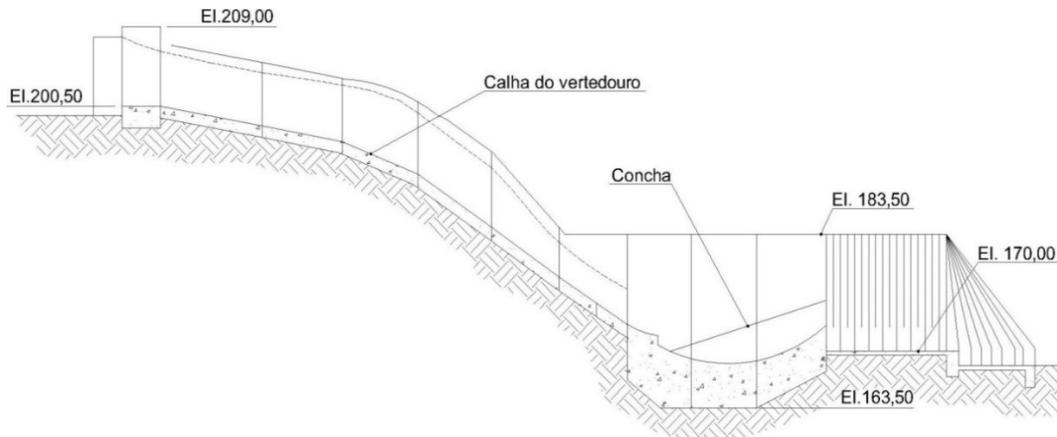


Figura 5 – Orós. Perfil e Foto do Vertedouro. Fonte: CBDB/LBS, 2002.

Segundo CBDB/MBD (2000), as escavações da barragem estavam concluídas em outubro de 1958 e estavam prontas para receber o aterro. O cronograma previa que a barragem estaria operativa no período de chuvas de 1960 e a cheia deveria passar pelo vertedouro na elevação 200,00 m. As chuvas, que chegaram tarde e fracas no início de 1960, intensificaram-se em março de tal maneira que prejudicaram a execução do aterro. A crista da barragem atingiu a cota 183,00 m, 17 m abaixo da crista do vertedouro. Em 12 de março, uma vazão de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ passou através do túnel de adução à futura casa de força. O NA do reservatório subiu para a elevação 180,00 m em 9 dias. Precipitações adicionais elevaram a vazão para $2.000\text{--}2.250 \text{ m}^3/\text{s}$, o que provocou a decisão de elevar-se a crista da barragem, trabalhando-se por 24 horas na construção do aterro. A barragem não tinha atingido a elevação 190,00 m (Figura 6) quando a água começou a galgar crista da crista na noite de 25/26 de março (Figura 7). Julgou-se ser mais efetivo controlar os danos, abrindo-se uma brecha no aterro para facilitar a passagem do pico da cheia que abriu o restante da brecha até a fundação da barragem.

A lâmina sobre a barragem foi de 0,30 m. Na brecha, a lâmina foi de 0,80 m. Foram removidos 765.000 m^3 do aterro, de um total já executado de $2.000.000 \text{ m}^3$, abrindo uma

brecha de 200 m de largura, aproximadamente. O volume de água armazenado, 730.000.000 m³, foi reduzido a 70.000.000 m³ em 24 horas. O pico da cheia após 12 horas foi de 9.600 m³/s. Cem mil pessoas foram evacuadas do vale do rio Jaguaribe pelo exército.

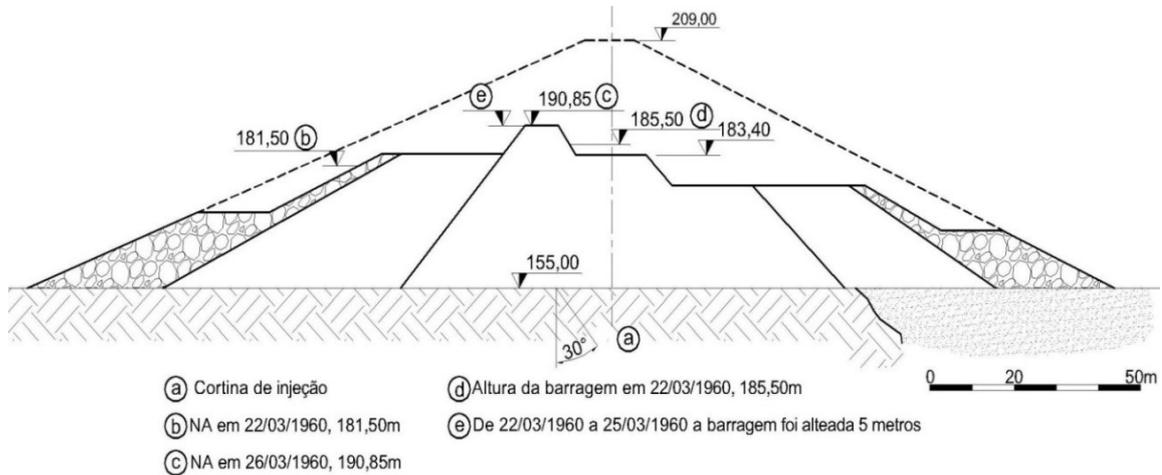


Figura 6 – Orós. Seção da Barragem. Fonte: CBDB/MBD, 2000.



Figura 7 – Orós. Galgamento da Barragem. Fonte: CBDB/MBD, 2000.

Assim que passou a cheia, a barragem foi reconstruída e inaugurada em 11 de janeiro de 1961, com o sangradouro escavado ainda sem ser revestido de concreto (CBDB, 2011). A área do vertedouro era protegida por uma enscadeira. Segundo o CBDB (2011), uma autoridade federal, em visita ao local em época que o reservatório estava cheio, mandou abrir a enscadeira, o que provocou o funcionamento do vertedouro. A vazão que passou, 400 m³/s, provocou grande erosão no maciço fraturado (Figura 8). Observar que a construção do vertedouro já tinha começado. Segundo o CBDB/LBS (2002) e (2011), o projeto de vertedouro foi contratado à HIDROESB em 1962 e a sua construção foi feita pelo DNOCS, entre 1963 e 1966. As escavações do vertedouro foram iniciadas em 1963 e concluídas no primeiro semestre de 1964, no início do período de chuvas. A estrutura de concreto da crista estava em construção.



Figura 8 – Orós.
Área do vertedouro após galgamento
Fonte: CBDB/MBD, 2000.

Deve-se registrar que esse fato de se construir o vertedouro (sangradouro) só depois de terminada a construção da barragem não é usual. Ainda mais para uma barragem de 54 m de altura, implantada em um vale densamente povoado. A Figura 9 mostra o município de Orós, a jusante da barragem, criado em 1957 e que tem 22 mil habitantes.



Figura 9 – Açude de Orós.
Fonte: GOOGLE EARTH, 2017.

Lição aprendida: Projeto e cronograma de obra em descompasso; problema rotineiro no Brasil. A obra foi iniciada em 1958 e deveria ficar pronta em 1960. Por falta de recursos a execução da barragem atrasou. Chuvas não previstas originaram uma vazão excepcional que galgou a barragem em construção em 25/03/1960. Após a cheia, a obra foi retomada e inaugurada, apressadamente por motivos políticos, em janeiro de 1961 com o vertedouro incompleto protegido por uma ensecadeira. Segundo o CBDB (2011), uma autoridade federal, em visita ao local em época que o reservatório estava cheio, mandou abrir a ensecadeira o que provocou o funcionamento do vertedouro. A vazão de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ vertida provocou grande erosão no maciço a jusante (Figura 8). Após esse incidente, em 1962 foi contratado pelo DNOCS o projeto detalhado do vertedouro, incluído estudos em modelo reduzido, o qual foi construído pelo próprio DNOCS entre 1963 e 1966 (CBDB/LBS, 2002 e 2011).

3.2 BARRAGENS DE EUCLIDES DA CUNHA E LIMOEIRO

Em 19 de janeiro de 1977 ocorreu na região das cidades de Caconde, São José do Rio Pardo e Mococa, a oeste do Estado de São Paulo, uma tromba d'água que superou a chuva mais intensa até então ocorrida, que era de 230 mm em 24 horas (CBDB/MBD, 1982).

O centro dessa tempestade atingiu o pequeno reservatório (1,0 km²) da barragem de Euclides da Cunha (Figura 10), da companhia Centrais Hidroelétricas do Rio Pardo (CHERP).



Figura 10 - Barragens de Euclides da Cunha e Limoeiro. Reservatórios.
Fonte: GOOGLE EARTH, 2017.

A barragem de terra, com crista na elevação 671,50 m e 56 m de altura, foi construída pela CHERP entre os anos de 1958 e 1960. O volume total do reservatório é de $13,4 \times 10^6$ m³.

O vertedouro foi dimensionado para a vazão de 2.080 m³/s, com o reservatório no NA máximo *maximorum* - elevação 668,95 m. Nessa condição, a borda-livre era de 2,55 m.

Foram dimensionadas duas comportas, com largura de 12,50 m e altura de 12,07 m. A soleira do vertedouro foi posicionada na elevação 656,43 m. Para passar vazão de projeto o NA máximo operacional deveria estar na elevação 665,00 m. Nessa situação a borda livre era de 6,50 m.

O pico da cheia atingiu 3.100 m³/s, quase 50% maior que a cheia de projeto. O nível d'água do reservatório elevou-se rapidamente galgou em 1,2 metros a barragem, que rompeu 4 horas depois (Figura 11).

A onda de cheia resultante se propagou com velocidade de 20 km/h até o reservatório da usina de Limoeiro (Armando Salles de Oliveira), situada 12 km a jusante (Figura 10), galgou a barragem de 35 m de altura que rompeu após 20 minutos (Figura 12).



Figura 11 – Euclides da Cunha. Ruptura.
Fonte: CARVALHO, 2015.



Figura 12 – Limoeiro. Ruptura.
Fonte: CARVALHO, 2015.

As Figuras 13 e 14 ilustram as barragens reconstruídas.

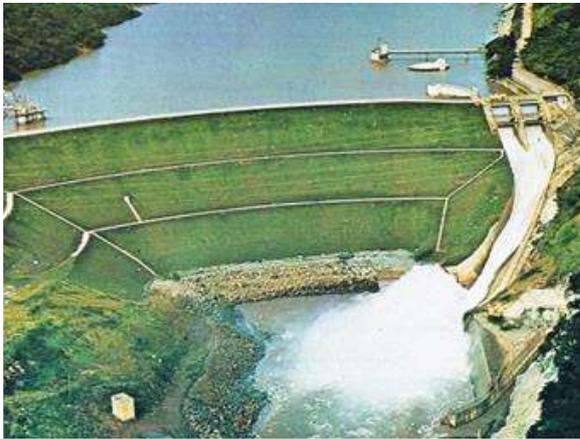


Figura 13 – Euclides da Cunha reconstruída.
Fonte: CBDB, 1982.



Figura 14 – Limoeiro reconstruída.
Fonte: CBDB, 1982.

A onda de cheia resultante se propagou com velocidade de 20 km/h até o reservatório da usina de Limoeiro (Armando Salles de Oliveira), situada 12 km a jusante (Figura 10), galgou a barragem de 35 m de altura que rompeu após 20 minutos (Figura 12).

Lição aprendida: O período extremamente chuvoso provocou uma cheia excepcional que excedeu a capacidade de vazão do vertedouro de Euclides da Cunha. O nível do reservatório subiu rapidamente, a barragem de terra foi galgada e rompeu. A ruptura gerou uma onda cheia que se propagou até a barragem de Limoeiro, 12 km a jusante, que foi também galgada e rompida em 20 minutos. Pode-se inferir que os estudos hidrológicos não previram, ou não consideraram, a possibilidade de ocorrência desse evento extremo. Lição: em se tratando de projetos de obras hidráulicas, essa probabilidade sempre existe.

3.3 BARRAGEM DE ALGODÕES I

A barragem Algodões I foi construída pelo DNOCS no rio Piranji, afluente do rio Parnaíba, entre 1996 e março/2004, para abastecimento da cidade de Cocal, no Estado do Piauí (Figura 15). O rio passa ao norte da cidade de Cocal. A barragem rompeu em 27 de maio de 2009 (SAMPAIO, 2014).

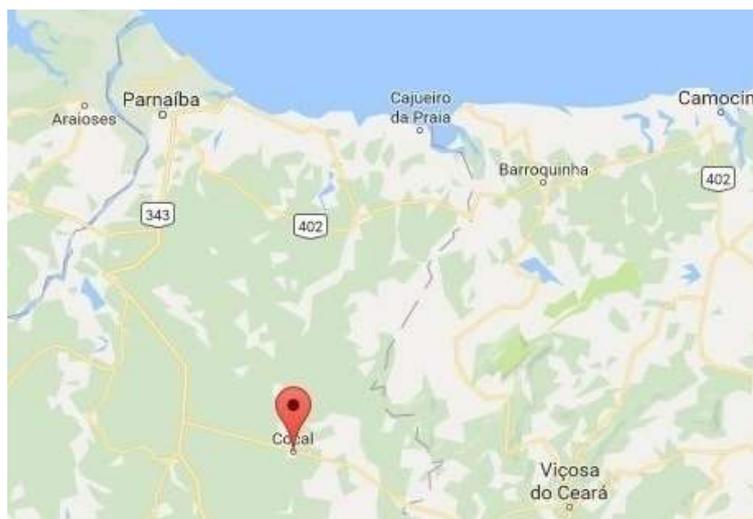


Figura 15 – Algodões. Mapa de localização da barragem. Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

O local da barragem é composto por arenitos da formação Serra Grande, aflorante, principalmente, na ombreira direita, com grande quantidade de tálus. Na execução do aterro foi utilizado colúvio e solo residual silto-argiloso. O arranjo da obra é mostrado nas figuras a seguir. As características das estruturas são:

- Barragem de terra, seção homogênea, com 378 m de comprimento, altura máxima de 47 m, talude de montante 4 a 2,5 H : 1,0 V, talude de jusante 2,0 H : 1,0 V.
- Tomada de água em galeria com 220 m de comprimento e diâmetro de 900 mm, com válvula dispersora e vazão regularizada de 1,6 m³/s.
- Vertedouro lateral com 120 m de comprimento, carga de 2,47 m, para uma vazão máxima de 718 m³/s (TR = 100 anos).

Após o início da operação do vertedouro, o talude a jusante do muro foi atacado pelo escoamento. A erosão regrediu e atingiu as placas de concreto do muro de encosto da barragem. O processo evoluiu, erodiu a estrada na margem direita impedindo o acesso. As chuvas se intensificaram. O aumento dos vertimentos acentuou o processo erosivo provocando a ruptura da barragem em 27 de maio de 2009. Durante a obra e até a ruptura da barragem, o canal do vertedouro sempre se mostrou instável (Figuras 16 a 20, extraídas de SAMPAIO, 2014).



Figura 16 – Barragem de Algodões.
Escoamento proveniente do vertedouro lateral atacando e erodindo o talude da estrada de acesso à barragem, a jusante do muro de encosto da barragem.



Figura 16 A – Barragem de Algodões.
Erosão a jusante do muro de encosto.



Figura 17 – Algodões - Vertedouro.
Queda de placa de concreto.



Figura 18 - Canal do vertedouro lateral e muro de encosto da barragem.



Figura 19 – Escorregamento do talude do canal.



Figura 20 – Algodões. Barragem rompida.
Fonte: SAMPAIO, 2014.

Lição aprendida: Os projetos das obras hidráulicas devem ser apoiados por estudos/ensaios em modelo reduzido, para realizar os ensaios do vertedouro e dissipação de energia do escoamento e pesquisar os processos erosivos a jusante. O projeto de Algodões não teve esse apoio. O escoamento proveniente do canal do vertedouro lateral atacou o talude do aterro a jusante do muro de encosto da barragem na ombreira direita provocando a ruptura (ver fotos 16, 16A e 20).

3.4 BARRAGEM CAMARÁ

A barragem Camará foi construída pela Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba (CAGEPA), entre maio de 2000 e dezembro de 2002, no rio Mamanguape, para abastecimento da cidade de Alagoa Grande, Paraíba (Figura 21).



Figura 21 – Barragem Camará. Mapa de localização. Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

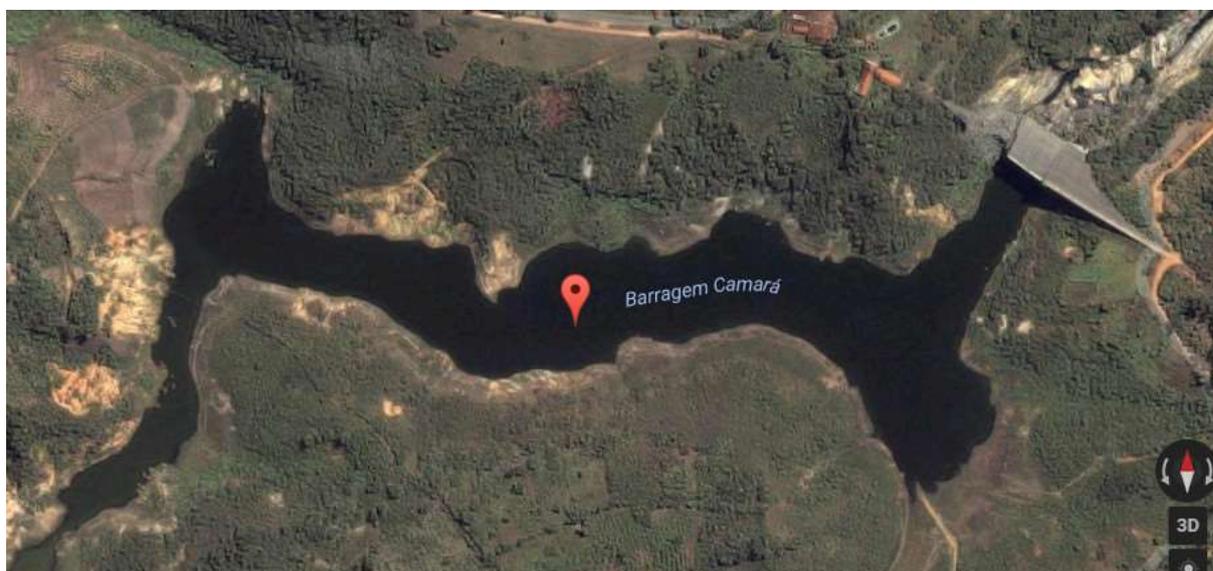


Figura 22 – Camará rompida. Imagem do reservatório. Fonte: GOOGLE EARTH, 2017.

A ruptura se deu por deslizamento de blocos de rocha de uma descontinuidade na ombreira esquerda em 19 de junho de 2004, um ano e meio após a construção, ainda durante o enchimento. O nível d'água do reservatório não chegou a atingir a crista do vertedouro (Figura 23, Detalhe A).

Essa descontinuidade, apesar do porte (Figuras 24 e 25), não foi identificada no projeto e a barragem, inexplicavelmente, foi apoiada em cima dela. Obviamente, ela deveria ter sido totalmente removida para possibilitar assentar a barragem no maciço rochoso de excelente qualidade logo abaixo da descontinuidade, como pode ser visto nos Detalhes B da Figura 23.

A cidade de Alagoa Grande e outras três próximas sofreram danos de porte, 4 pessoas foram dadas como mortas e mais de três mil pessoas ficaram desabrigadas.



Detalhe A - Marca do Nível d'Água do reservatório



Detalhes B – Vistas da ruptura. Fonte: BARBOSA et al., 2004; PAIVA JÚNIOR, 2006.
Figura 23 – Camará. Marca do NA do reservatório e vistas da ruptura.



Figura 24 – Camará. Detalhe 1 da junta-falha.
Fonte: BARBOSA et al., 2004; PAIVA JÚNIOR, 2006.



Figura 25 – Camará. Detalhe 2 da junta-falha.
Fonte: BARBOSA et al., 2004; PAIVA JÚNIOR, 2006.

A nova barragem (Figuras 26 a 29), reconstruída no período de 2012 a 2016, foi inaugurada em 26/09/2016. Suas principais características são:

- Barragem de gravidade em concreto compactado a rolo (CCR);
- H = 50 m; L = 296 m; espessura da crista = 5,5 m;
- Largura do sangradouro = 39 m; carga hidráulica máxima vertente = 2,3 m;
- Vazão estimada=270 m³/s;
- Volume do reservatório = 26,5 milhões de m³.



Figura 26 – Camará. Vista de jusante da reconstrução
Fonte: BARBOSA et al, 2004; PAIVA JUNIOR, 2006.



Figura 27 – Camará. Vista de montante da barragem.
Fonte: BARBOSA et al, 2004; PAIVA JUNIOR, 2006.



Figura 28 – Vista jusante da barragem.
Fonte: BARBOSA et al, 2004; PAIVA JUNIOR, 2006.

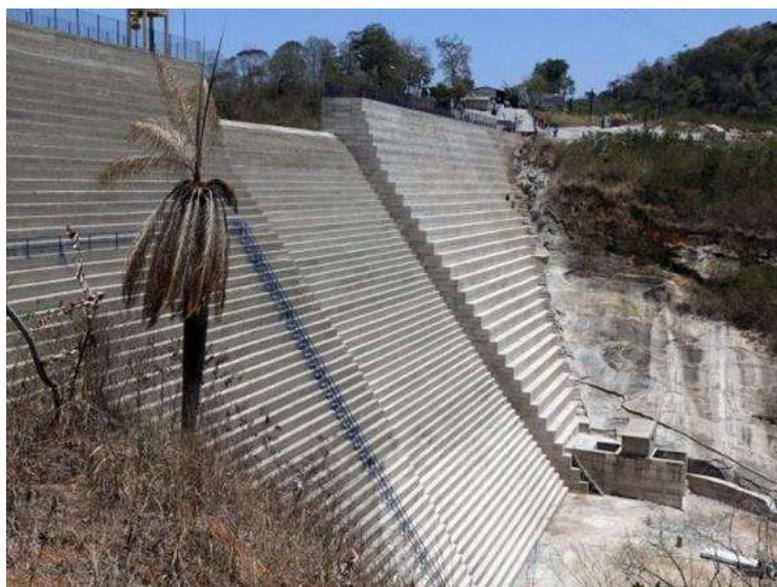


Figura 29 – Camará. Vista do vertedouro.
Fonte: BARBOSA et al, 2004; PAIVA JUNIOR, 2006.

Lição aprendida: Não se deve apoiar uma barragem em cima de descontinuidade como a existente na fundação da barragem na ombreira esquerda, cujos detalhes são mostrados nas Figuras 24 e 25. O tratamento mais indicado nesse caso, na opinião do autor, seria remoção total da descontinuidade. Com a pressão d'água do reservatório parcialmente cheio, como mostra a marca do nível d'água na Figura 23 - Detalhe A, iniciou-se um processo de infiltração que provocou a erosão da descontinuidade e, conseqüentemente, a ruptura da barragem.

3.5 BARRAGEM DE EL GUAPO

A barragem de El Guapo (Figuras 30 e 31), no rio El Guapo, município de Barlovento, Estado de Miranda, na Venezuela, a 150 km de Caracas, foi construída com objetivos de: controle de cheias, irrigação e abastecimento de água (415.000 pessoas).



Figura 30 – El Guapo. Localização da barragem. Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.



Figura 31 – El Guapo. Barragem e reservatório. Fonte: USACE, 2014.

A sua ruptura ocorreu em 16/12/1999 durante a construção por galgamento, em função de insuficiência de capacidade de vazão do vertedouro, da ordem de $102 \text{ m}^3/\text{s}$.

A reconstrução foi realizada entre 2005 e 2006. O novo empreendimento tem as seguintes características: barragem com 60 m de altura; comprimento da crista: 524 m; capacidade do novo vertedouro: $2.700 \text{ m}^3/\text{s}$. A nova cheia de projeto é 27 vezes maior que a original. As Figuras 32 a 34 ilustram o rompimento e a reconstrução da barragem.

Principais quantitativos dos serviços de reconstrução: 30.000 m^3 de CCV; 350.000 m^3 de CCR e 350.000 m^3 de aterro compactado.



Figura 32. El Guapo: Escoamento extravasando os muros da calha
Fonte: USACE, 2014.



Figura 33 – El Guapo. Ruptura da barragem
Fonte: USACE, 2014.

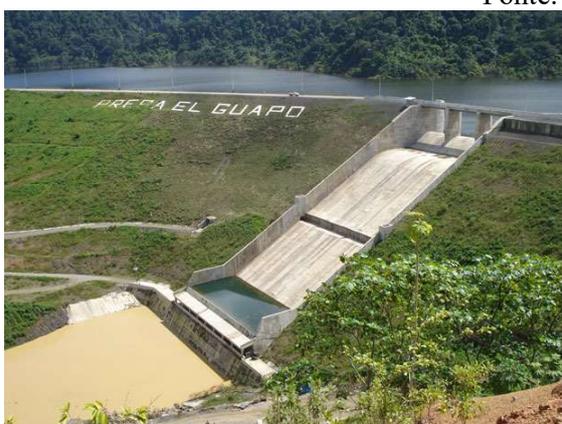


Figura 34 – El Guapo. Reconstruída. Figura 34 A – El Guapo. Vertedouro operando.
Fonte: INGENIERÍA GEOTECNICA PREGO, 2017.

Lição aprendida: outro caso de chuvas em excesso que implicou uma cheia excepcional que excedeu a capacidade de vazão do vertedouro. A barragem foi galgada e rompeu.

3.6 BARRAGEM DE BANQIAO

Cabe destacar o caso da barragem de Banqiao, localizada no rio Ru, na cidade de Zhumadian, Província de Henan, na China (Figura 35).



Figura 35 – Banqiao. Mapa de localização da barragem.
Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

Essa barragem de terra, com 24,5 m de altura, foi construída de abril de 1951 a junho de 1952 para controle de cheia e geração de energia. No projeto foi considerada a segurança da obra para uma cheia com tempo de recorrência de 1.000 anos e a capacidade do vertedouro era de 1.742 m³/s. Após a cheia de 1954 a barragem foi elevada em 3,0 m.

Em 8 de agosto de 1975, a barragem rompeu por galgamento, quando a cheia, provocada pelo furacão Nina, atingiu 13.000 m³/s, Figuras 36 e 36A. Rompeu também a barragem de Shimantan e dezenas de outras na mesma bacia (DAI QING, 1998).

A ruptura provocou a morte de 26.000 pessoas. Outras 145.000 pessoas morreram de epidemias e fome. Estima-se que 11 milhões de pessoas perderam suas casas (DAI QING, 1998).



Figura 36 – Banqiao. Barragem Rompida.
Fonte: INTERNATIONALRIVERS.ORG.



Figura 36A – Banqiao. Comporta rompida.
Fonte: ALCHETRON.COM.

A barragem foi reconstruída (1993) com 50,5 m de altura e cheia de projeto do vertedouro de 15.000 m³/s, quase dez vezes maior que a do projeto original (Figura 37).



Figura 37 – Banqiao. Planta da barragem reconstruída
Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

Lição aprendida:

No projeto foi considerada a segurança da obra para uma cheia com tempo de recorrência de 1.000 anos e a capacidade do vertedouro era de 1.742 m³/s (TR=1.000 anos). Foi registrada uma cheia de 13.000 m³/s que provocou a elevação do nível d'água do reservatório, bem como o galgamento e a ruptura da barragem. Registra-se que os critérios da ELETROBRÁS preconizam que o projeto do vertedouro deve ser feito para uma vazão decamilenar, correspondente a um TR=10.000 anos.

3.7 BARRAGEM DE TETON

A barragem de Teton foi construída pelo USBR, no rio Teton, afluente do rio Snake, Rexburg, Idaho, EUA (Figura 38), para controle de cheias e irrigação. A barragem era de terra e possuía 100 m de altura. A barragem rompeu por erosão tubular (*piping*), durante o primeiro enchimento, no dia 05/06/1976. A ruptura provocou a morte de 11 pessoas e causou um prejuízo de 1,5-2,0 bilhões de dólares.

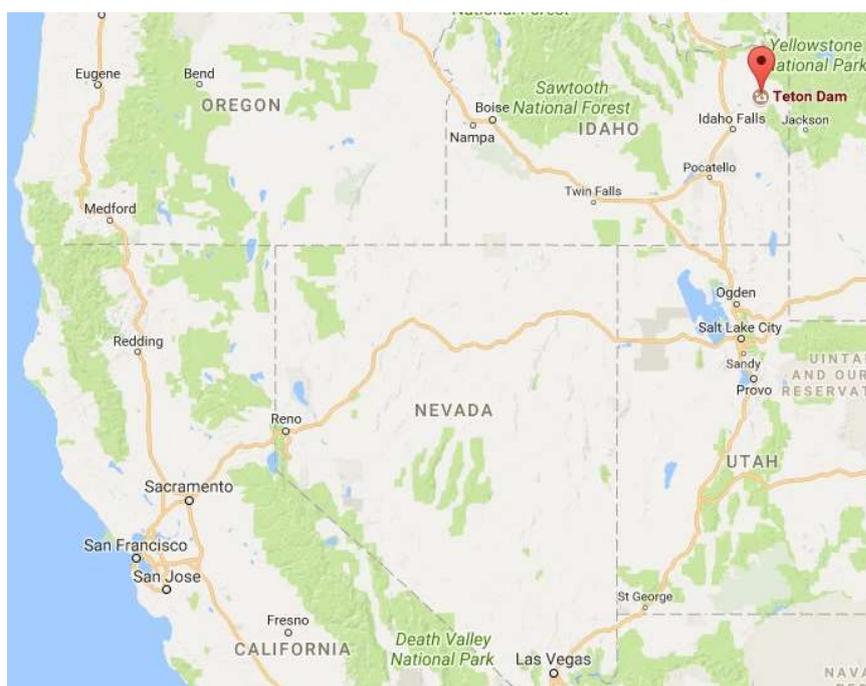


Figura 38 – Teton. Mapa de localização da barragem.
Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

Na manhã de 5 de junho apareceu uma fuga d'água no talude de jusante na ombreira direita. O alarme foi dado, mas a erosão interna crescente colapsou a barragem. Perto do meio-dia a barragem ruiu (Figura 39). À noite, todo o reservatório estava vazio. As cidades de *Idaho Falls* e *American Falls Dam* foram bastante danificadas.

Na ombreira direita havia sido escavada uma trincheira de largura estreita e paredes abruptas (Figura 40). A rocha no local estava fortemente fraturada e as discontinuidades junto dessa trincheira se encontravam abertas e sem tratamento. O material vedante usado no núcleo e na trincheira da barragem, um silte argiloso de origem eólica, foi lançado diretamente contra a rocha, sem colocação de qualquer transição.

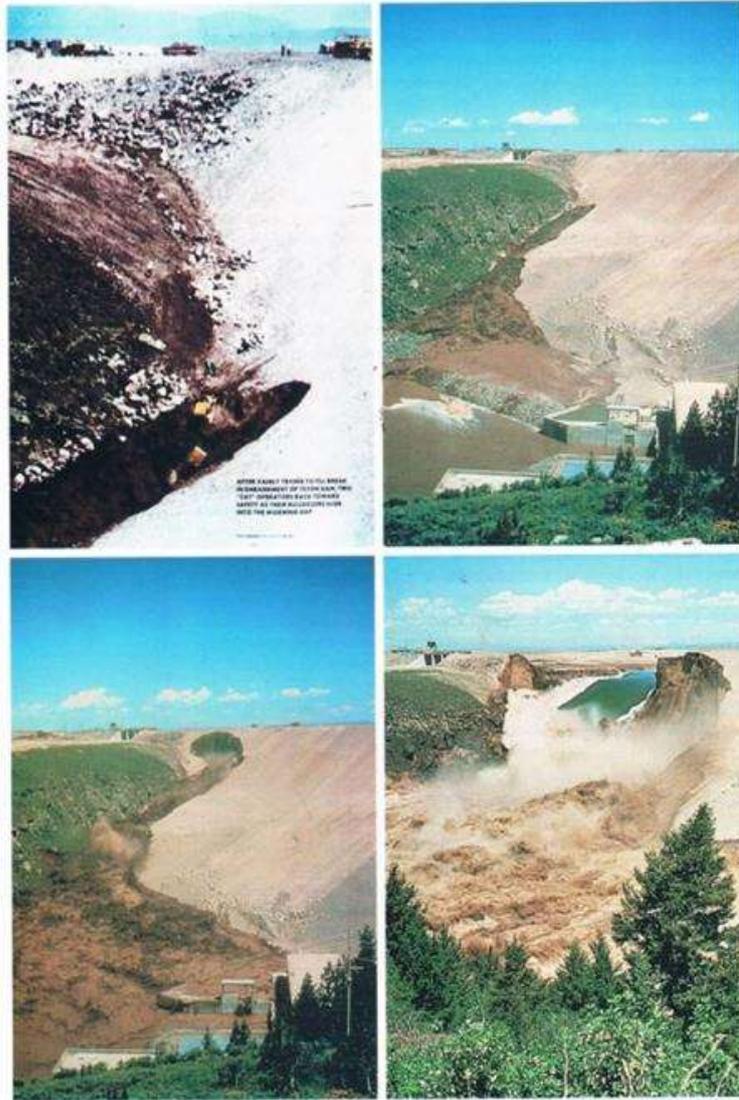


Figura 39 – Barragem de Teton: sequência de ruptura. Fonte: NIT (1992).

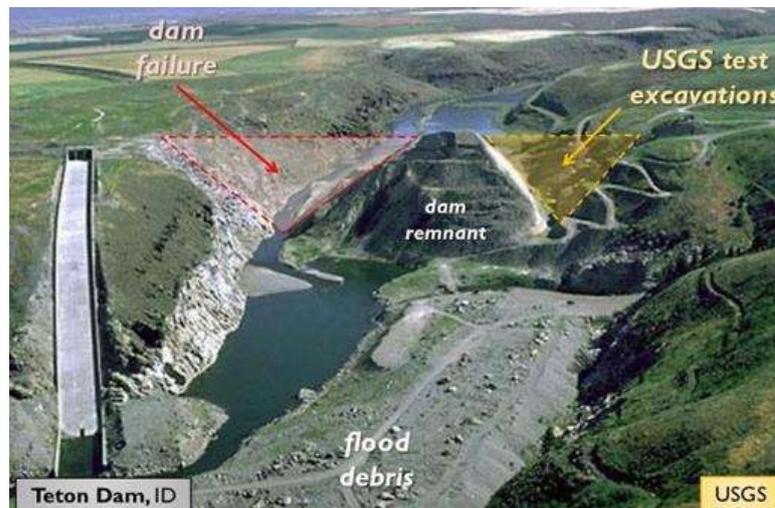


Figura 39 A – Ilustração Esquemática da Ruptura da Barragem de Teton – USGS.

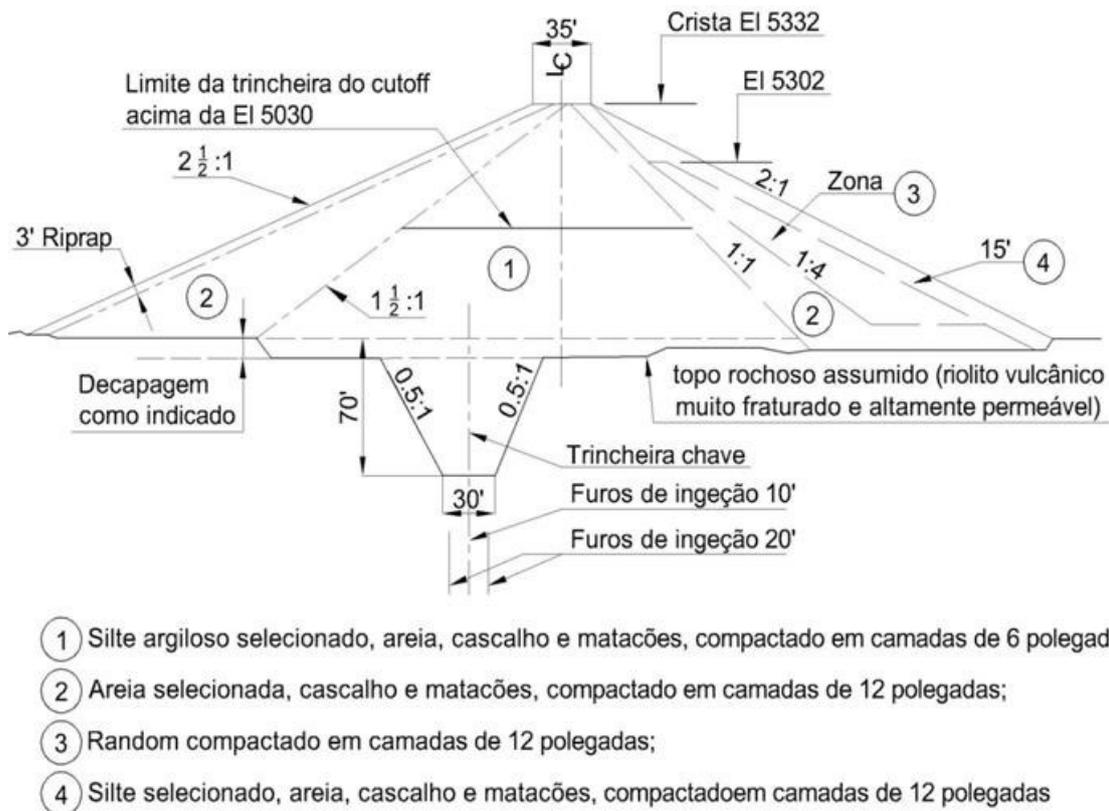


Figura 40 – Barragem de Teton-Seção na ombreira.

Fonte: USCOLD (1988).

Segundo PECK (1980), os grupos de investigação, o *Independent Panel* e o *Interagency Review Group* concluíram que, independentemente de qual tenha sido o ponto fraco que existiu no local de concentração inicial do fluxo, o projeto era falho, pois permitia a conjugação de diversos fatores desfavoráveis: Materiais de núcleo altamente erodíveis; Rocha fortemente fraturada sem concreto dental ou tratamento superficial; Ausência de zonas de transição entre núcleo e rocha; Condições desfavoráveis de tensões associadas à largura estreita da trincheira; Condição potencial de fugas de água através de cortina de injeções.

Lição aprendida: A justaposição do material fino e erodível do núcleo com a fundação altamente fraturada foi fatal (PECK, 1980). A partir deste acidente o USBR elaborou, implantou e passou a cumprir rigoroso programa de segurança de barragens. Cada estrutura passou a ser inspecionada periodicamente, no que diz respeito à estabilidade, às falhas internas e à deterioração física.

3.8 BARRAGEM DE MALPASSET

A barragem de Malpasset foi construída no rio Reyran, a 12 km da cidade de Fréjus, região sudeste da França (Figura 41), entre 1952 e 1954 com a finalidade de irrigação e abastecimento. A barragem era de concreto em arco, dupla curvatura, com 65 m de altura, 223 m de comprimento na crista.

A ruptura ocorreu em 02/12/1959 por deformação da fundação. A tragédia devastou o trecho de 11 km do rio até o Mediterrâneo, destruindo as pequenas vilas de Malpasset e Bozon e causando a morte de 423 pessoas (USBR, 1983 e GINNOCHIO, 2012).

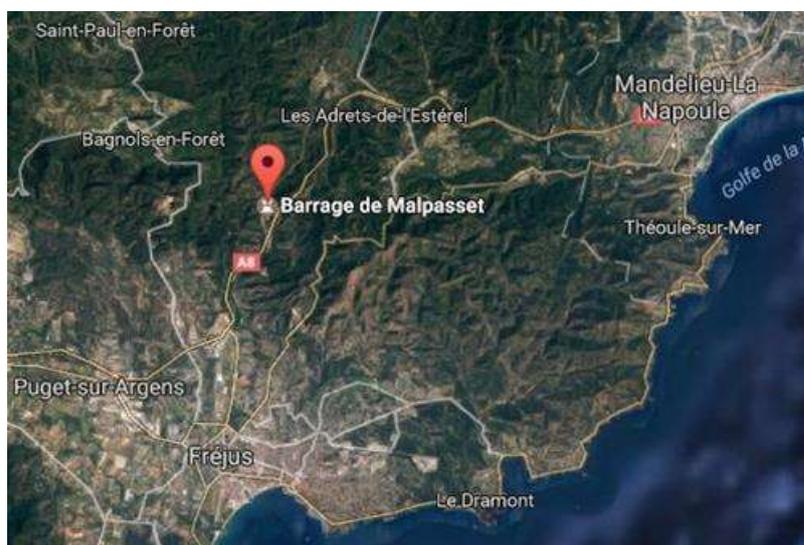


Figura 41 – Malpasset. Mapa de localização da barragem.

Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

Os estudos geológicos e hidrológicos realizados em 1946 consideraram o local adequado, embora com a oposição de alguns consultores.

As investigações foram limitadas devido aos recursos escassos. A fundação rochosa, rocha metamórfica-gnaiss, parecia ser impermeável. A ombreira direita constituía-se de gnaiss são; na ombreira esquerda, o gnaiss era heterogêneo com xistosidade e foi necessário construir um muro ala de concreto para melhor interação da fundação com a barragem em arco (Figuras 42 a 44).

Fissuras foram observadas na base da barragem, a jusante, mas não foram investigadas. Duas semanas depois da identificação das fissuras, a barragem ruiu.

A ruptura foi rápida e provocou um desastre. Nenhuma barragem desse tipo tinha ruído anteriormente, o que levou à realização de numerosos estudos.

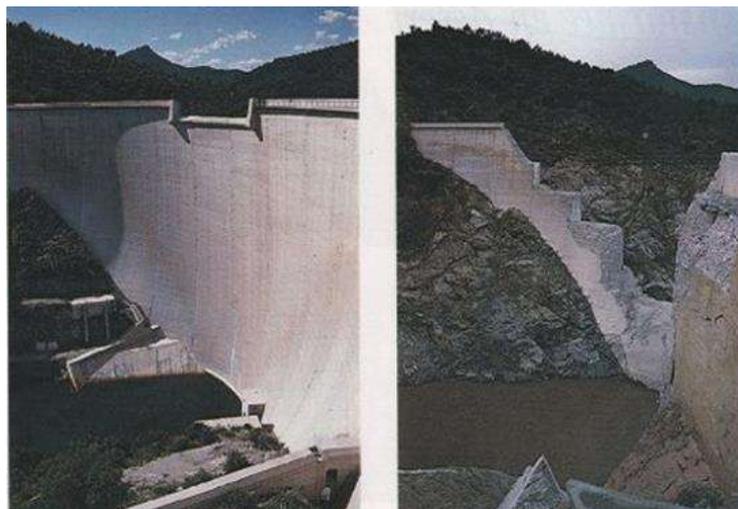


Figura 42 – Malpasset - Vista de jusante da barragem antes e após a ruptura.
Fonte: MAGELA, 2015; Damfailures.org.

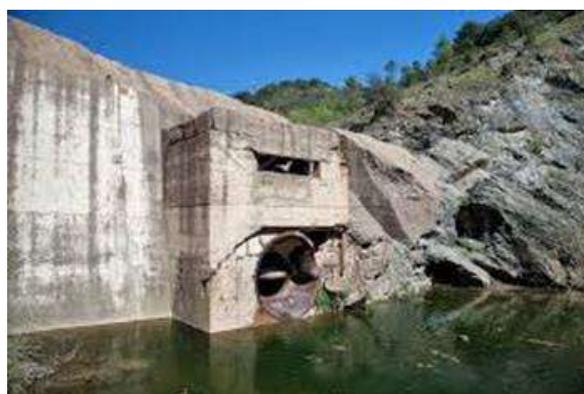


Figura 43–Malpasset. Barragem rompida. Figura 44–Malpasset. Descarregador de fundo.
Fontes: MAGELA, 2015; Damfailures.org

Segundo USBR/JANSEN (1983) concluiu-se que:

- A barragem foi construída em cima de dois acidentes geológicos F e F' (Figuras 45 e 46), esse último uma falha inclinada 45° com a vertical foi identificada a jusante da barragem, a qual não tinha sido reconhecida na fase de projeto;
- A chuva intensa fez subir rapidamente o nível das águas do reservatório, mais de 5 m, o que contribuiu para aumentar a subpressão sob a barragem no primeiro enchimento do reservatório;
- O mecanismo de ruptura foi desencadeado na ombreira esquerda; o aumento da subpressão provocou o escorregamento do diedro de rocha pela superfície de baixa resistência da falha F', com a conseqüente abertura do maciço de fundação, levando ao escoamento súbito da água do reservatório e a ruptura.

Ainda segundo o USBR/JANSEN (1983), colocou-se muita ênfase ao cálculo estrutural da barragem, otimizando sua forma e a distribuição de tensões, mas negligenciou-se o

reconhecimento e a caracterização geológico-geotécnica da fundação e dos mecanismos de sua deterioração que poderiam conduzir à instabilidade da estrutura.

USBR/JANSEN destacou ainda que o projeto não previu nenhum dispositivo de drenagem da fundação porque a projetista considerava que a subpressão não teria qualquer consequência na estabilidade da barragem, mesmo em se tratando de uma barragem em arco bastante esbelta.

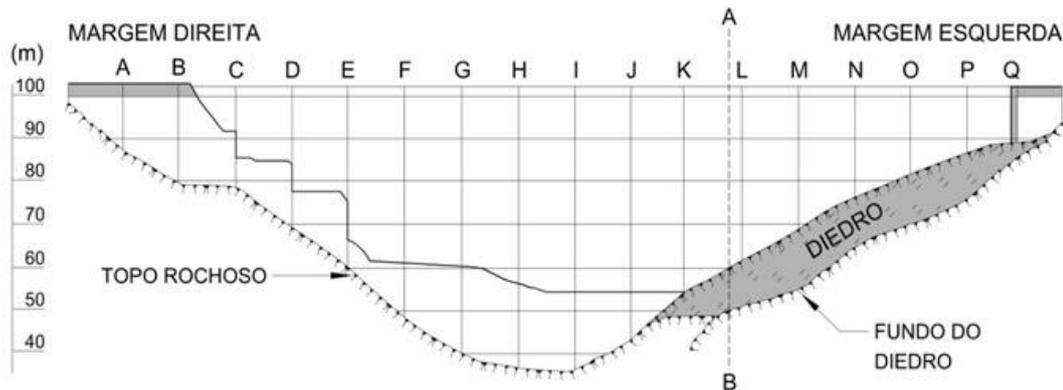


Figura 45 – Barragem de Malpasset: corte longitudinal. Fonte: MAGELA, 2015.

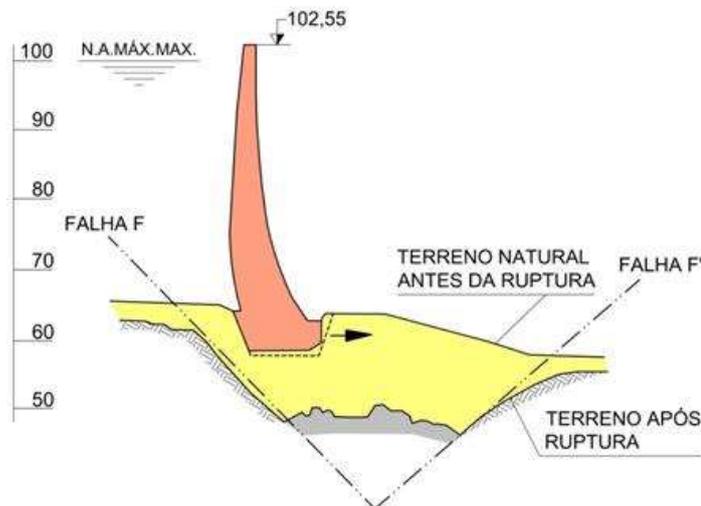


Figura 46 – Barragem de Malpasset: seção transversal. Fonte: MAGELA, 2015.

Lição aprendida: Colocou-se muita ênfase ao cálculo estrutural da barragem, mas negligenciou-se o reconhecimento e a caracterização geológico-geotécnica da fundação e dos mecanismos de sua deterioração que poderiam conduzir à instabilidade da estrutura. O “DIEDRO” de rocha mostrado na Figura 45 não foi identificado no projeto. O deslocamento desse bloco de rocha provocou a deformação e ruptura da barragem.

Apenas para fins de registro, destaca-se que não se previu qualquer dispositivo de drenagem para a barragem - o que **não evitaria** a ruptura. A projetista considerava que a subpressão não teria qualquer consequência na estabilidade da barragem, mesmo em se tratando de uma barragem em arco bastante esbelta.

3.9 BARRAGEM DE VAJONT

A barragem de Vajont está localizada ao sul da Cortina d'Ampezo e ao norte da cidade de Belluno, no rio Vajont, em um sítio em vale “V” estreito e profundo nos Alpes Italianos, a 100 km de Veneza (Figura 47). A barragem é de concreto em arco, comprimento de 1.850 m, altura de 266 m. Na época, era a barragem mais alta do mundo. O reservatório tinha uma capacidade de $115 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Figura 47 – Barragem de Vajont. Mapa de localização.
Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

Em 9 de outubro de 1963, durante o enchimento do reservatório, uma massa gigantesca de solo e rocha, com volume superior a 240 milhões de m^3 , escorregou, a uma velocidade de 30 m/s, na vertente esquerda, para dentro do reservatório (USBR, 1983).

A onda gerada, de mais de 100 m de altura, galgou a barragem e varreu o vale a jusante, destruindo a cidade de Longarone e causando a morte de mais de 2.600 pessoas (USBR, 1983). Notavelmente, a barragem resistiu ao choque. A ponte sobre o vertedouro foi levada rio abaixo.

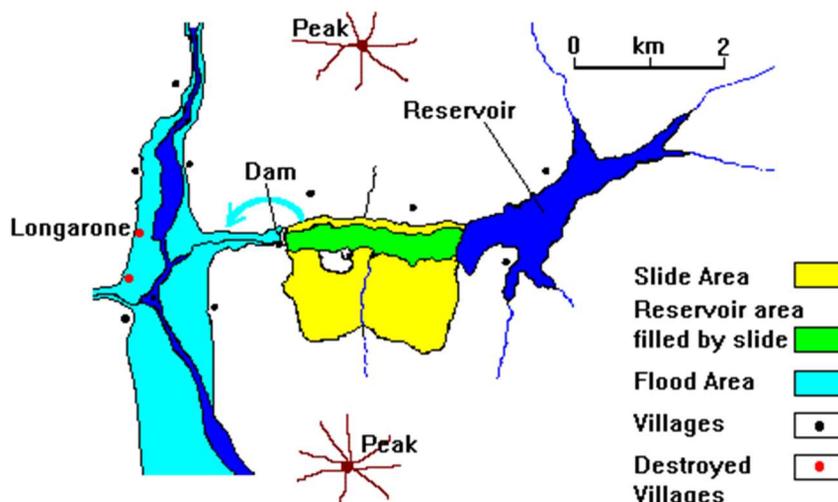


Figura 48 – Barragem de Vajont. Área impactada pelo deslizamento.

Fonte: mannaismayaadventure.com

Antes da conclusão da barragem, alguns técnicos que trabalharam no projeto estavam preocupados com a instabilidade do encontro esquerdo (USBR, 1983). Reconhecimentos efetuados em 1958 e 1959 identificaram cicatrizes de escorregamentos antigos na ombreira direita. Tudo isso significava uma séria desvantagem para a locação do reservatório. O sítio, um vale V profundo, estava posicionado numa formação sedimentar composta primariamente por calcários com leitos de argilitos e marga (calcário argiloso), material com baixa resistência ao cisalhamento e sujeito a dissolução em contato com a água do subsolo. Isto conduz a extensas cavidades e tubos, bem como a juntas alargadas e planos de acamamento. Segundo o USBR (1983) um movimento lento estava em progresso por muitos anos antes do desastre.

O primeiro enchimento, ainda antes do fechamento da barragem (concluída em setembro de 1960), foi iniciado em fevereiro de 1960. Em março, os projetistas reconheceram que uma grande massa do terreno se apresentava instável na margem esquerda (USBR, 1983).

Em 4 de novembro de 1960, quando o reservatório estava na Elevação 130,00 metros, ocorreu um deslizamento de 690.000 m³ no talude esquerdo próximo a barragem. Trincas na escarpa eram visíveis e delimitavam a massa de solo que estava em movimento numa grande escala grande. Foi decidido manobrar com o nível de enchimento do reservatório ao mesmo tempo em que se executavam as galerias drenantes na encosta instabilizada. Uma rede de controle do movimento foi estabelecida ao longo de 4,0 km para montante. Movimentos de tempos em tempos eram frequentes até 1963 (USBR, 1983).

Entre abril e maio de 1963, o nível do reservatório subiu rapidamente. Decidiu-se realizar um esvaziamento do reservatório. Em setembro, em função das fortes chuvas, o movimento acelerou. Em 9 de outubro a encosta deslizou. As Figuras 49 a 54 (HOEK, 2007) ilustram a barragem e a cidade de Longarone, localizada a jusante antes e após o desastre.

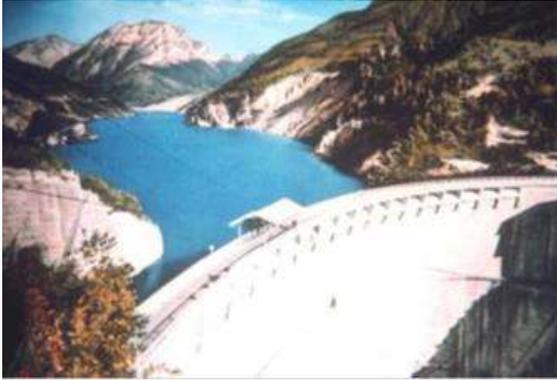


Figura 49 - Barragem de Vajont durante o enchimento.

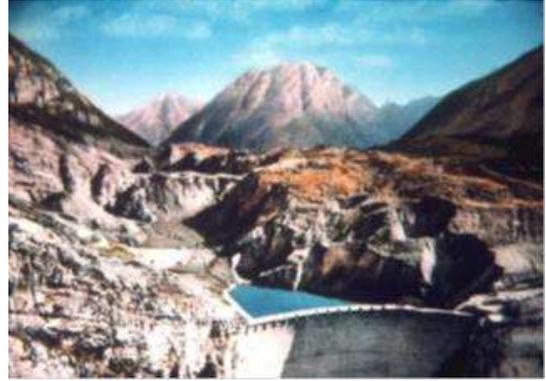


Figura 50 - Barragem de Vajont após o deslizamento.



Figura 51 - Longarone antes do acidente.



Figura 52 - Longarone arrasada.

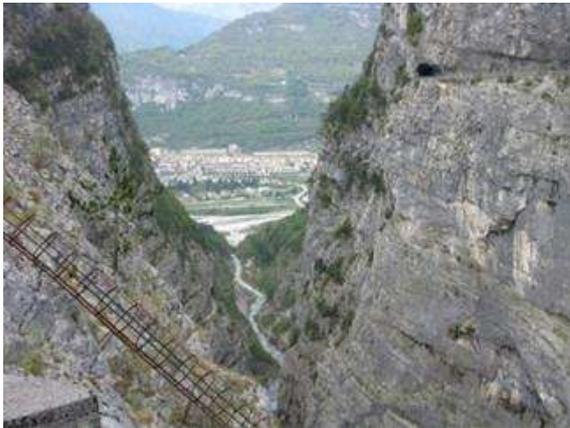


Figura 53 - Longarone em 2003.



Figura 54 - Longarone em 2003.

Fonte: HOEK, 2007.

Lição aprendida: Nos sítios de barragens que tenham ombreiras muito íngremes deve-se pesquisar e estudar em detalhes a estabilidade dos taludes das encostas.

3.10 BARRAGEM DE GLASHÜTTE

A barragem de terra de Glashütte, $H = 8,7$ m, foi construída no rio Briesnitz (bacia do rio Elba) entre 1951 e 1953, para abastecimento da cidade de mesmo, Alemanha (BORNSCHEIN e POHL, 2003).



Figura 55 – Barragem Glashütte.
Mapa de Localização.
Fonte: GOOGLE MAPS, 2017.

O vertedouro sem controle, $Q = 5,0$ m³/s, foi projetado em degraus (altura = 1,0 m e comprimento = 5,5 m). Adicionalmente, foi projetado um descarregador de fundo, também sem controle, para $Q = 7,0$ m³/s. Portanto, a capacidade de descarga máxima era de 12 m³/s.

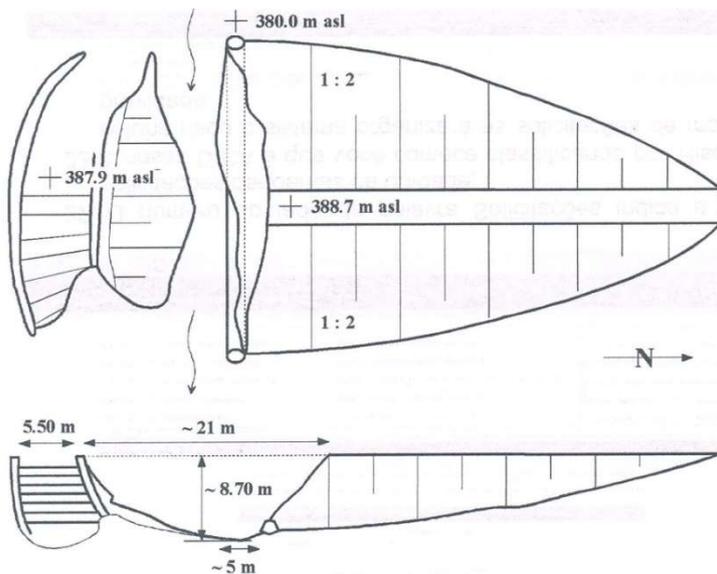


Fig. 56 – Barragem Glashütte.
Planta e Seção.
Fonte: BORNSCHEIN e POHL, 2003.

Em 12 de agosto de 2002 ocorreram chuvas intensas na região. O pico de vazão atingiu 120 m³/s, segundo BORNSCHEIN e POHL (2003), dez vezes maior que a capacidade de

descarga projetada. A barragem foi galgada e rompeu (as Figuras 57 a 60 ilustram o desastre e a reconstrução - Fonte: BORNSCHEIN E POHL, 2003).



Figura 57 - Barragem Glashütte sendo galgada e rompida. Detalhe do bueiro à direita.



Figura 58 – Vertedouro em degraus.



Figura 59 – Glashütte - Danos na cidade.



Figura 60 - Barragem Glashütte reconstruída. Observar vertedouro tulipa.
Fonte: BORNSCHEIN E POHL, 2003.

Lição aprendida: Mais um acidente no qual chuvas em excesso implicaram em cheia excepcional que excedeu a capacidade de vazão do vertedouro. A barragem foi galgada e rompeu.

3.11 O INCIDENTE DE OROVILLE

A UHE Oroville (675 MW instalados), no rio Feather, do Departamento de Recursos de Água da Califórnia – DWR, foi inaugurada em 1967 com objetivos de abastecimento de água, geração de energia, controle de cheias e recreação. Situa-se a 120 km ao norte de Sacramento e a 8 km a leste da cidade de Oroville. A descarga máxima registrada no local foi de $7.530\text{m}^3/\text{s}$ (KOLLGARD e CHADWICK, 1988).

O maciço rochoso no local é predominantemente um anfíbolito, com abundantes veios de calcita, quartzo, epidoto, asbestos e pirita. É duro, denso, cinza-esverdeado a preto, granulação fina à grossa, moderadamente a fortemente fraturado, e cortado transversalmente por zonas de cisalhamento e xistosidade com mergulho acentuado. Três conjuntos predominantes de juntas conferem um fraturamento à rocha, mas as juntas individuais são relativamente estreitas. Duas zonas de cisalhamento maiores existem embaixo da barragem no meio da altura na ombreira. Ambas mergulham fortemente e atacam o eixo da barragem normal. A profundidade do intemperismo é substancial, variando de zero na margem do rio a afloramentos menores nas ombreiras, até 30 m nas zonas de cisalhamento.

A usina possui uma casa de força subterrânea, na margem esquerda, com 3 turbinas Francis ($487\text{ m}^3/\text{s}$) e 3 turbinas-bomba modificadas ($158\text{ m}^3/\text{s}$).

A barragem, em aterro zoneado, tem 235 m de altura, crista na elevação 281,00 m e NA máx. *maximorum* na elevação 274,30 m. A borda livre de 6,70 m contempla o controle de cheias.

O aproveitamento possui dois vertedouros na ombreira direita (Figura 61), com capacidade total de vazão de $17.815\text{ m}^3/\text{s}$ (deca milenar):

- Um vertedouro de serviço, principal, separado da barragem por um espinhaço, para controle das cheias, com oito comportas de $5,2 \times 10\text{m}$ e capacidade para $4.255\text{ m}^3/\text{s}$ ($C=2$ e $H=14\text{m}$), com um rápido de 950m até a restituição à jusante – no entorno da elevação 167,60m; portanto, com 106,70m de desnível; pode-se inferir que, no final do rápido, a velocidade do escoamento será da ordem de 45m/s, ou seja, muito elevada; não foram previstas calhas aeradoras no projeto do rápido porque, nessa época, os estudos desses dispositivos estavam apenas começando;
- Um vertedouro de emergência, em soleira livre com 527,3m de extensão, englobando o estacionamento na ombreira direita (soleira espessa) e capacidade de $13.560\text{ m}^3/\text{s}$ (para uma carga de 6m e $C=1,75$), sem laje de proteção do maciço à jusante; portanto, admitiu-se conviver com a erosão em caso de funcionamento dessa estrutura.

Cabe citar que, em 2005, avaliou-se a construção de uma calha de concreto à jusante do vertedouro de emergência, na encosta até o rio. Por razões de custo, esta laje não foi implantada. Até então, o vertedouro de emergência nunca tinha funcionado em 50 anos de existência.



Figura 61 – Vertedouro de emergência em primeiro plano, vertedouro de serviço e barragem ao fundo Fonte: MAGELA, 2017.

Depois de muitos anos de seca, em 2 de fevereiro de 2017, ocorreu uma cheia de $2.800\text{m}^3/\text{s}$ e ambos os vertedouros funcionaram. Ocorreu a quebra da laje do vertedouro de serviço e erosão à jusante do vertedouro de emergência (Figuras 62 a 65). A sequência do incidente foi a seguinte:

- ocorrência de deslocamento na laje de fundo da calha do vertedouro de serviço, possivelmente por cavitação; o escoamento em alta velocidade pode ter atacado alguma irregularidade de junta ou trinca na laje, iniciando-se um processo erosivo; o vertedouro foi fechado para avaliação de sua recuperação e o nível do reservatório foi subindo em função de fortes chuvas na bacia a montante; os engenheiros do DWR concluíram que seria impossível a recuperação da calha do vertedouro;
- diante da previsão de mais precipitação, decidiu-se extravasar a cheia pelo vertedouro de emergência; em poucas horas ocorreu erosão na esquerda hidráulica, no pé da soleira, com possibilidade de romper esse vertedouro segundo a DWR e tornar a situação descontrolada. Na opinião do autor, se isso acontecesse apenas o NA do reservatório seria rebaixado até a cota elevada do terreno;
- tais fatos levaram à decisão de evacuar cerca de 200 mil habitantes no vale a jusante e de retomar a operação do vertedouro de serviço, que, embora danificado, era necessário para rebaixar o reservatório, com redução do vertimento pela soleira livre;

– o reinício do vertimento pela calha principal de serviço agravou os danos, com propensão da evolução progredir para jusante, mas ainda muito distante da barragem em função do espinhaço existe entre as duas estruturas; em poucos dias a situação foi controlada.



Figura 62 – Vista superior do incidente.
Fonte: MAGELA, 2017.



Figura 63 – Danos no vertedouro de serviço
Fonte: MAGELA, 2017.

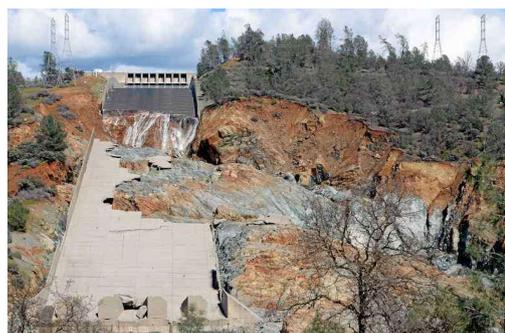


Figura 63 - Calha quebrada

Fonte: MAGELA, 2017.



Figura 65 – Vertedouro de emergência funcionando. Erosão na esquerda hidráulica no pé da soleira com possibilidade de regredir para montante e colapsar o vertedouro.

Fonte: MAGELA, 2017.

A Figura 66 é intitulada: “Porque a barragem de Teton não iria colapsar”. Nela encontram-se argumentos sobre a não existência de possibilidade de ruptura da barragem em decorrência desse incidente, com os quais o autor concorda.



Figura 66 – Porque a Barragem de Oroville não iria colapsar.
Fonte: MAGELA, 2017.

Tradução e interpretação das legendas da figura:

- Para as vazões que ocorreram, o nível d'água nunca atingiria a crista da barragem, a qual está 6m acima da crista do vertedouro de emergência;
- Se o nível d'água continuasse a subir, o excesso escoaria pelo vertedouro de emergência e a erosão se estenderia pela ombreira abaixo em direção ao rio;
- Se o vertedouro de emergência rompesse a erosão na crista seria limitada pela cota de fundação da soleira, que era elevada (a soleira é baixa); o espinhaço que separa o vertedouro da barragem preveniria o dano na barragem.

Explorando um pouco mais o incidente, pode-se supor que o dano inicial na laje de fundo do vertedouro de serviço tenha sido provocado por cavitação, como aconteceu no vertedouro da barragem Shahid Abbaspour (antiga Karun 1), no rio Karun, Irã, apresentado por Magela (2017). Como citado anteriormente, a velocidade do escoamento no final do rápido seria da ordem de 45m/s, ou seja, muito elevada. Qualquer irregularidade, trinca, transversal ao escoamento, provocaria o início do processo de cavitação. No vertedouro de Guri (Venezuela) também aconteceu um grande acidente por cavitação no bordo de lançamento do jato, como apresentado por Magela (2015 e 2017).

Cabe citar que, em 2013, ocorreram trincas na laje da calha do vertedouro de serviço de Oroville que foram reparadas (Figuras 66 e 67). Anteriormente, em 1975, em um episódio de

abalo sísmico na Califórnia, a barragem resistiu com pouco danos ao tremor de 5,7 graus na escala Richter (ASCE, 1976).



Detalhe A



Detalhe B



Detalhe C

Figura 67 – Vertedouro de Serviço. Laje da calha quebrada (90m x 150m x 15m).
Detalhes A, B e C Fonte: MAGELA, 2017.



Figura 68 – Vertedouro de emergência. Reparos emergenciais, com blocos de rocha.
Detalhes A e B. Fonte: MAGELA, 2017.

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se nesse TCC a descrição de casos de rupturas de barragens a partir da década de 50 em âmbito mundial. Com base em dados coletados na pesquisa bibliográfica, o trabalho relaciona as causas de rupturas de barragens.

Foi mostrado que 59% dos acidentes são devidos a causas geológico-geotécnicas, 23% a causas hidrológicas e 12% a construção deficiente, o que totaliza 94% dos casos, quase a totalidade dos acidentes. Os outros 6% são devidos a atos de guerra (3%), operação inadequada (2%) e terremotos (1%).

O trabalho mostra também que, além dos danos materiais ao meio ambiente e perdas econômicas, sempre ocorrem perdas de vidas humanas. Por essa razão, as questões relativas à Segurança das Barragens são mandatórias.

Por outro lado, destacou-se que somente há 40 anos diversos países começaram a se mobilizar efetivamente para as questões relativas à Segurança das Barragens, mas que a situação evoluiu ao longo dessas últimas quatro décadas. No Brasil, atualmente, já se tem:

- Critérios de Projeto das Barragens, consagrados mundialmente, constantes do Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas, das quais a barragens são parte integrante, elaborado e consolidado pela ELETROBRÁS/CBDB em 2003
- Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a PNSB-Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010); e,
- Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que estabelece a PNPDEC-Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (BRASIL, 2012).

Considerações importantes devem ser observadas de forma a atender aos requisitos da legislação, tanto nas fases de projeto quanto nas de construção e de operação das barragens, as quais devem ser abordadas para a integração entre equipes responsáveis por projetos e acompanhamento da segurança, equipes de defesa civil e as comunidades potencialmente afetadas por esses desastres.

Em função do exposto e visando reduzir ainda mais os casos e as estatísticas de acidentes, pode-se concluir e recomendar:

- que os projetos devem ser elaborados por equipes com experiência comprovada em trabalhos dessa natureza, observando-se rigorosamente os Critérios de Projeto das Barragens

constantes do Manual de Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas (ELETROBRÁS/CBDB, 2003);

- não se deve economizar no planejamento dos estudos básicos previstos nesse manual e nem nos levantamentos e investigações hidrológicas e geológico-geotécnicas de campo, das fundações e dos materiais naturais de construção; essas investigações devem ser realizadas, obrigatoriamente, da forma mais detalhada possível;

- da mesma forma, não se deve economizar nos levantamentos hidrométricos e medições diversas do rio, para conhecer seu comportamento em detalhes; não se deve nunca esquecer que a água é um rude adversário;

- os estudos básicos tradicionais, de geologia, geotecnia e hidrologia devem ser realizados em profundidade.

Acredita-se que assim procedendo às probabilidades de erros, acidentes e desastres, serão ainda mais reduzidas.

CAPÍTULO V

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA. Guia para a Elaboração de Projetos de Barragens. Manual do Empreendedor, Volume V, Versão Preliminar – fevereiro de 2015.
- ASCE. The Evaluation of Dam Safety. The Malpasset Dam. Jean Bellier. Asilomar Conference Grounds. Pacific Grove, California. (1976).
- BARBOSA, N. P. et al. Barragem de Camará. Universidade Federal da Paraíba. Centro de Tecnologia. João Pessoa (2004).
- BORNSCHEIN, A., POHL, R. Dam Break During the Flood in Saxony/Germany in August 2002. Proc. XXX IAHR Congress. Thessaloniki, Greece. (2003).
- BRASIL. Lei 12.334, 20/12/2010. Política Nacional de Segurança de Barragens. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm. Acesso em julho de 2017.
- BRASIL. Lei 12.608, 10/04/2012. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112608.htm. Acesso em julho de 2017.
- CBDB/CNB. Cadastro Nacional de Barragens (2015).
- CBDB/MBD. Design, Construction and Performance. Comitê de Publicações. (1982).
- CBDB /NRSP. Guia Básico de Segurança de Barragens. Comitê de Publicações. (1999).
- CBDB/MBD, Design, Construction and Performance. Comitê de Publicações. (2000).
- CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos. Materiais de Cosntrução. Projeto. FAPESP. Oficina de Textos. São Paulo (1996).
- DAI QING. The River Dragon Has Come. M. E. Sharp. New York (1998).
- ELETROBRÁS/CBDB Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas. Centro de Memória da Eletricidade no Brasil. (2003).
- ELETROBRÁS. Diretrizes para Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. Centro de Memória da Eletricidade no Brasil. (2000).
- French Ministry for Sustainable Development – DGPR/SRT/BARPI, No 23607. Release of 50 million m³ of Water at the Vajont Dam October 9, 1963. Erto e Casso (PN). Italy. File last updated: November, (2010).
- GINOCCHIO, R., VIOLLET, P. L. L'Énergie Hydraulique. Editions Tec & Doc. (2012).
- GUERRA, A. T. Dicionário Geológico-Geomorfológico. IBGE (1980).

- GUIDICINI, G. Onde Foi Parar o Senso Crítico. ABMS, Tradução n. 4, (1982), Where Has All the Judgment Gone? The Fifth Laurits Bjerrum Lecture. PECK, R. (Maio/ 1980)
- INGENERÍA GEOTÉCNICA PREGO. Caracas, Venezuela (2017).
- HOEK, E. Rock Engineering. A. A. Balkema Publishers. Rotterdam, Netherlands. (2007).
- JANSEN, R. B. Dams and Public Safety. USBR-United States Bureau of Reclamation (1983).
- KJAENSLI, B. VALSTAD, T. HÖEG, K. Hydropower Development. Volume No 10. Rockfill Dams - Design and Construction. Norwegian Institute of Technology/Division of Hydraulic Engineering. (1992).
- KOLLGAARD, E. B., CHADWICK, W. L. Development of Dam Engineering in the Unites States. 16º ICOLD, San Francisco (1988).
- MAGELA, G. P. Projeto de Usinas Hidrelétricas Passo a Passo. Oficina de Textos. São Paulo. (2015).
- MAGELA, G. P. Projeto de Vertedouros Passo a Passo. Planeta Azul. Rio de Janeiro. (2017).
- PAIVA JÚNIOR, H. B. Efeito do Rompimento da Barragem de Camará na Área Urbana de Alagoa Grande/PB. Dissertação de Mestrado apresentada à Univ. Federal da Paraíba. (2006).
- PECK, R. Where Has All the Judgment Gone? The Fifth Laurits Bjerrum Lecture (Maio/ 1980).
- SAMPAIO, M. V. N. Segurança de Barragens de Terra: Um Relato da Experiência do Piauí. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará. (2014).
- SERAFIM, J. L. Safety of Dams Judged from Failures. Water Power & Dam Construction, December (1981).
- USACE. Hydraulic Design Criteria. Corps of Engineers. Waterways Experiment Station (1959).
- USACE Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis. Corps of Engineers. Waterways Experiment Station (2014).
- USBR-United States Bureau of Reclamation. Design of Small Dams (1974).
- USBR-United States Bureau of Reclamation. Dams and Public Safety (1983).

APÊNDICE A

Tabela detalhada de rupturas de barragens

Tabela 6 – Rupturas de barragem (USBR, 1983; McCULLY, 2001; Inclusões do Autor).

Barragem	N	País	Tipo	Término	Ruptura	Vítimas	Causa	Recons
South Fork	1	EUA	T/Enroc.	1839	1889	2.209	G	N
El Habra ⁹	2	Argélia	Alvenaria	1872	1881	209	CE	(⁹)
Walnut Grove	3	EUA	Enroc.	-	1890	150	G	1930
Khadakwasla	4	Índia	Alvenaria	1879	1961	>1.000	G	1966
Bouzey	5	França	Alvenaria	1881	1895	150	CE	1938
Lower Otay	6	EUA	Enroc.	1897	1916	30	G	1921
Lawn Lake	7	EUA	Terra	1903	1982	0	P	-
Austin	8	EUA	Gravidade	1910	1911	80	F	N
Tighra	9	Índia	Alvenaria	1913	1917	>1.000	E	1929
Eigiau e Coedty ⁵	10	P. Gales	Gravidade	1913	1925	16	F	(⁵)
Möhne	11	Alemanha	Gravidade	1913	1943	1.200	B	1950
Bila Desna ⁹	12	Czechosl.	Terra	1915	1916	65	P	(⁹)
Laurel Run	13	EUA	Terra	1919	1977	70	G	Park
Gleno	14	Itália	Arco	1923	1923	600	CE	N
A Sella Zerbino	15	Itália	Gravidade	1923	1935	100	CE	N
St. Francis	16	EUA	Gravidade	1926	1928	450	F	N
San Fernando ⁸	17	EUA	AH-Terra	1930	71-94	0	LI	(⁸)
Canyon Lake ²	18	EUA	Terra	1938	1972	242	G	2016
Frias	19	Argentina	Enroc.	1940	1970	102	G	1973
Pampulha	20	Brasil	TFC	1943	1954	0	P	1958
Whitewater	21	EUA	Terra	1943	1972	0	G	(⁴)
Babi Yar	22	Ucrânia	Terra	1950	1961	145	G	1968 ³
Baldwin Hills ⁷	23	EUA	Enroc.	1951	1963	0	F	Park
Banqiao ¹	24	China	Terra	1952	1975	>26.000	G	1993
Glashütte	25	Alemanha	Terra	1953	2002	0	G	2009
Malpasset	26	França	Arco	1954	1959	421	F	N
Vega de Tera	27	Espanha	Contraforte	1957	1959	144	CE	N
Orós	28	Brasil	T/Enroc.	1960	1960	1.000	G	1961
Vajont ¹⁰	29	Itália	Arco	1960	1963	2.600	DT	(¹⁰)
E. Cunha	30	Brasil	Terra	1960	1977	0	G	1979
Limoeiro	31	Brasil	Terra	1960	1977	0	G	1979
Panshet	32	Índia	Terra	1961	1961	>1.000	G	1972
Nanaksagar	33	Índia	Terra	1962	1967	100	P	ND
Taum Sauk	34	EUA	Enroc	1963	2005	0	VC	2009
Fontenelle ⁶	35	EUA	Terra	1964	1965	0	P	68/80
Sempor	36	Java	Enroc.	1967	1967	200	G	1978
Walter Bouldin	37	EUA	Terra	1967	1975	0	P	1980
Machhu II	38	Índia	Alv/Terra	1972	1979	>1.300	G	2003
Teton	39	EUA	Terra	1975	1976	11	P	N
El Guapo	40	Venezuela	Terra	1978	1999	D	G	2006
Big Bay	41	EUA	Terra	1991	2004	0	P	-
Camará	42	Brasil	CCR	2002	2004	4	F	2016
Algodões I	43	Brasil	Terra	2004	2009	9	E	NA
Hadlock	44	EUA	Terra	2005	2005	0		2005
Espora	45	Brasil	Terra	2006	2008	0	CE	(⁹)
Apertadinho	46	Brasil	Terra	2006	2008	0	F/E	(⁹)
Inxu	47	Brasil	Terra	2015	2015	3	P	

Legenda: TFC=terra com face de concreto; D=desconhecido; G=galgamento; P=Piping; F=fundação; LI=liquefação; E=erosão; CE=colapso estrutural; B=bombardeio; DT=deslizamento de talude; VC=várias causas; ND=não disponível; N=não será reconstruída; NA=não reconstruída ainda.

1-Considerando-se Shimantan e outras que romperam na mesma cheia esse número atinge 230.000.

2-A ruptura da barragem foi parte da tragédia de Rapid City. O total de mortos foi devido a inundação.

3-Data de término da barragem de Kiev. Imaginou-se que ela foi construída no sítio de Babi Yar.

4-A reconstrução deve ter sido em sequência dada a importância do reservatório para o sistema de abastecimento de Claremont (New Hampshire).

5-Coedty foi reconstruída. Eigiau foi abandonada.

6-A barragem de Fontenelle não rompeu no sentido de perda total do reservatório. A ação rápida dos operadores do USBR rebaixando o NA do reservatório evitou a ruptura.

7-Depois duas décadas o sítio foi transformado no Kenneth Hahn State Recreation Area.

8-A barragem, também chamada Van Norman, sofreu danos após terremotos em 1971 e 1994 mas não rompeu.

9-Pela imagem de satélite pode-se observar que a barragem foi reconstruída.

10-A barragem resistiu ao galgamento de uma onda gigantesca.

APÊNDICE B

Artigo apresentado no XXXVII International Sodebras Congress



CAUSAS DE RUPTURAS DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASOS

MAIN CAUSES OF DAM FAILURE: CASES STUDY

GERALDO MAGELA PEREIRA¹; ANTONIO FERREIRA DA HORA²

1 – ENGENHEIRO CIVIL, MESTRANDO EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL PELA
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

2 – PROFESSOR TITULAR DO MESTRADO PROFISSIONAL EM DEFESA E SEGURANÇA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
magela2909@gmail.com; dahora@vm.uff.br

Resumo – Este trabalho tem por objetivo apresentar um resumo das causas das rupturas das barragens e ressaltar a importância e a obrigatoriedade da observância dos métodos e critérios de projeto consagrados, visando à redução dos riscos de ocorrência desses acidentes. O trabalho apresenta também os resumos de três casos de acidentes extraídos da bibliografia disponível sobre o assunto. Essas rupturas sempre resultam em desastres para a região com danos significativos para o meio ambiente e para a população ribeirinha a jusante que excedem a capacidade dessas comunidades de combatê-los com recursos próprios. Esses acidentes também provocam, frequentemente, perdas de vidas humanas.

Palavras-chave: Barragens. Rupturas. Desastres. Critérios de projeto.

Abstract - This paper presents a resume of the dam breaks causes and emphasizes the importance of observing the recognized design methods and criteria for reducing the risks of such accidents. This paper presents also a resume of three cases of accidents extracted from the available bibliography. These dam collapses always result in disasters for the region, with significant damage to the environment and to the downstream riparian population that exceed the capacity of these communities to combat them with their own resources. These accidents also cause, frequently, loss of human life.

Keywords: Dam, Breaks. Disasters. Project criteria.

I. INTRODUÇÃO

As barragens são construídas desde a antiguidade e a engenharia das barragens é uma parte vital da história da civilização. Os reservatórios para abastecimento de água foram, sem dúvida, as primeiras estruturas realizadas pelo homem. Eles armazenam grandes volumes de energia que, se liberados subitamente, podem ocasionar desastre.

As rupturas sempre causam danos de porte à infraestrutura da região e para as populações ribeirinhas a jusante, que excedem a capacidade

dessas comunidades de combatê-los com recursos próprios, e podem ocasionar, além de danos ao meio ambiente, perdas materiais e de vidas humanas, a exemplo de Malpasset na França, Vajont na Itália, e Teton nos Estados Unidos da América (USBR, 1983).

Em 1952, Andre Coyne, projetista da barragem de Malpasset, localizada no rio Reyran, Fréjus (França), afirmou: “*de todas as obras da humanidade as barragens são as mais mortais*”. Sete anos depois, essa barragem rompeu pela fundação e provocou a devastação dos 11 km do rio até o Mar Mediterrâneo, destruindo três vilas e causando a morte de 423 pessoas (ASCE, 1976).

Em 1976, após a ruptura da barragem de Teton, no rio Teton, Rexburg, Idaho (EUA), que resultou em 11 mortes e danos significativos, materiais e financeiro, o governo iniciou a implantação do sistema de segurança de barragens (USBR, 1983; USBR, 2011).

Com base no exposto, o presente trabalho teve por objetivo apresentar a estatística das causas que provocam essas rupturas e destacar que a observância de critérios consagrados para os projetos dessas estruturas que implicam na redução de acidentes e desastres (CARVALHO, 2015). Os critérios de projeto das barragens do Setor Elétrico no Brasil podem ser consultados em ELETROBRAS/CBDB (2003) e ELETROBRAS (2000).

Além disso, buscou-se descrever três barragens com tipologias distintas de rompimento, selecionadas a partir de informações disponibilizadas:

- Barragem de Camará localizada no Estado da Paraíba, ruptura pelas fundações.
- Barragem de Glashütte localizada ao Sul de Dresden na Alemanha, ruptura por galgamento.
- Barragem de Algodões I localizada no Estado do Piauí, ruptura por erosão provocada pelo escoamento oriundo do canal de restituição do vertedouro.

II. ESTATÍSTICA DE ACIDENTES COM BARRAGENS

São muitos os casos de acidentes registrados na bibliografia mundial que resultaram em ruptura de barragem (USBR, 1983) e as causas mais frequentes estão apresentadas na Tabela 1.

O conhecimento da estatística dessas causas ressalta os métodos e critérios que devem ser focados e obedecidos no desenvolvimento de projetos, visando à minimização dos riscos de ruptura.

Da análise da Tabela 1, observa-se que 59% dos acidentes são devidos a causas geológico-geotécnicas (este valor resulta do somatório das causas de problemas nas fundações, recalques diferenciais, pressões neutras elevadas, deslizamentos de taludes e materiais deficientes) e 23% por conta de vertedouros inadequados, devido, principalmente, ao subdimensionamento das vazões de projeto.

Tabela 1 – Estatística das Causas de Ruptura de Barragens

Causa de ruptura	Percentual
Problemas nas fundações	40
Vertedouros inadequados	23
Construção deficiente	12
Recalques diferenciais	10
Pressões neutras elevadas	5
Atos de guerra	3
Deslizamento de taludes	2
Materiais deficientes	2
Operação inadequada	2
Terremotos	1

Fonte: USBR, 1983.

O conhecimento das fundações é obtido através da realização de programa detalhado de investigações geológico-geotécnicas (furos de

Anais do XXXVII International Sodebras Congress

sondagens, por exemplo), as quais devem ser programadas e executadas por equipe com experiência comprovada em projetos desta natureza, com base nas normas descritas em ABGE (2013). Ainda assim, a interpretação dos resultados das sondagens é complexa, uma vez que o especialista tem que inferir o que ocorre entre um furo e outro e a experiência mostra que os casos de interpretações errôneas são frequentes.

Da mesma forma, a estimativa das vazões extremas para projetos dos vertedouros deve ser feita por especialistas da área de hidrologia com experiência comprovada no assunto. Apesar de a metodologia ser amplamente disseminada, a estimativa das vazões extremas é uma tarefa complexa porque depende de outras variáveis que devem ser medidas em campo, como a precipitação pluviométrica e a descarga líquida.

III. HISTÓRICO DOS DESASTRES ORIUNDOS DE RUPTURAS DE BARRAGENS

3.1 – Barragem de Camará

A barragem Camará foi construída pela Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba (CAGEPA), entre 1996 e março de 2004, no rio Mamanguape, para abastecimento da cidade de Alagoa Grande, no interior do estado a oeste do João Pessoa (PB).

As suas principais características são: barragem de gravidade em concreto compactado a rolo; altura de 50 m; comprimento do coroamento igual a 296 m; largura da crista de 5,5 m; largura do sangradouro de 39 m; altura do sangradouro igual a 4 m; lâmina máxima vertente de 2,3 m, e capacidade de armazenamento igual a $26,5 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Em 28 de junho de 2004, a barragem rompeu pela fundação, por uma junta falha geológica significativa na ombreira esquerda (Figuras 1 e 2), a qual, inexplicavelmente, não foi identificada no projeto (BARBOSA *et al.*, 2004; PAIVA JÚNIOR, 2006).

O acidente afetou a cidade de Alagoa Grande e outras três cidades próximas. Quatro pessoas foram dadas como mortas e mais de três mil desabrigados. A nova barragem, reconstruída no período de 2012 a 2016, foi inaugurada em 26/09/2016.

As Figuras 3 e 4 ilustram a reconstrução da barragem.

Figura 1 – Vista de jusante da ruptura



Fonte: Barbosa *et al.*, 2004; Paiva Júnior, 2006.

Figura 2 – Detalhe da junta-falha na fundação



Fonte: Barbosa *et al.*, 2004; Paiva Júnior, 2006.

Figura 3 – Reconstrução da barragem



Fonte: Barbosa *et al.*, 2004; Paiva Júnior, 2006.

Figura 4 – Vista de jusante da barragem reconstruída



Fonte: Barbosa *et al.*, 2004; Paiva Júnior, 2006.

3.2 – Barragem de Glashütte

A barragem de Glashütte, no rio Briesnitz, afluente pela margem esquerda do rio Elba, foi Anais do XXXVII International Sodebras Congress

construída entre 1951 e 1953 com a finalidade de reservar água para abastecimento da cidade de Glashütte, ao sul de Dresden na Alemanha. A barragem era de terra, tinha seção homogênea com altura máxima de 8,7 m, podendo ser considerada como de pequeno porte. O vertedouro foi projetado para a vazão de 5,0 m³/s, sem controle, em degraus de pedra com 1,0 m de altura e largura de 5,5 m. Foi previsto um descarregador de fundo (bueiro) com capacidade de escoar mais 7,0 m³/s, também sem controle. A capacidade máxima de descarga (vertedouro + bueiro) era de 12 m³/s (BORNSCHEIN e POHL, 2003).

Em 12 de agosto de 2002, ocorreram chuvas intensas na região e o pico de vazão atingiu o valor de 120 m³/s, ou seja, dez vezes maior que a capacidade de descarga projetada. A barragem foi galgada e rompeu e não foram registradas perdas de vidas. As falhas ocorridas nos estudos hidrológicos, de avaliação da precipitação máxima provável e da cheia de projeto do vertedouro, foram relatadas por Bornschein e Pohl (2003).

As Figuras 5 a 8 mostram o acidente e a barragem reconstruída.

Figura 5 – Galgamento da barragem



Fonte: Bornschein e Pohl, 2003.

Figura 6 – Barragem rompida



Fonte: Bornschein e Pohl, 2003.

Figura 7 – Danos na cidade



Fonte: Bornschein e Pohl, 2003.

Figura 8 – Barragem reconstruída com vertedouro auxiliar do tipo tulipa



Fonte: Bornschein e Pohl, 2003.

3.3 – Barragem de Algodões I

A barragem Algodões I foi construída pelo Departamento Nacional de Obras contra as Secas (DNOCS), entre 1996 e 2004, no rio Piranji, na margem direita do trecho baixo do rio Parnaíba, para abastecimento da cidade de Cocal, Estado do Piauí.

Cinco anos depois da construção, em 27 de maio de 2009, a barragem rompeu por erosão das placas de concreto do muro de encosto da barragem. De acordo com Sampaio (2014), as principais características das estruturas são:

- Barragem de terra, seção homogênea, com 378 m de comprimento, altura máxima de 47 m, talude de montante 4 a 2,5 H:1,0 V, talude de jusante 2,0 H:1,0 V.
- Tomada de água em galeria com 220 m de comprimento e diâmetro de 900 mm, com válvula dispersora e vazão regularizada de 1,6 m³/s.
- Vertedouro lateral com 120 m de comprimento, carga de 2,47 m, para uma vazão máxima de 718 m³/s (TR = 100 anos).

O local da barragem é composto por arenitos da formação Serra Grande, aflorante, principalmente,

na ombreira direita, com grande quantidade de tálus. Na execução do aterro foi utilizado colúvio e solo residual silto-argiloso.

Após o início da operação do vertedor, o talude a jusante do muro foi atacado pelo escoamento e a erosão regrediu e atingiu as placas de concreto do muro de encosto da barragem.

Em maio de 2009, em virtude de fortes chuvas que resultaram no aumento dos vertimentos que, por sua vez, intensificaram os processos erosivos e culminaram na ruptura da barragem em 27 de maio de 2009. Durante a obra e até a ruptura da barragem, o canal do vertedor sempre se mostrou instável (SAMPAIO, 2014).

As Figuras 9 e 10 ilustram o acidente com a barragem.

Figura 9 – Vertedouro em operação com detalhe da erosão do talude a jusante do muro de encosto da barragem e queda de placa de concreto



Fonte: Sampaio, 2014.

Figura 10 – Barragem rompida



Fonte: Sampaio, 2014.

IV. CONCLUSÃO

Em função da análise dos dados sobre a barragem de Camará, pode-se concluir que houve um erro na ausência de caracterização da falha geológica na ombreira esquerda por onde ocorreu a ruptura. A falha era significativa e de porte, portanto facilmente identificável por especialista na área.

No que diz respeito à barragem de Glashütte, o rompimento foi devido aos erros cometidos nos estudos hidrológicos na estimativa da vazão máxima de projeto do vertedouro.

Já na barragem de Algodões I, a erosão que atacou o talude a jusante do muro de encosto da barragem e provocou a ruptura não foi prevista no projeto em virtude da ausência de estudos hidráulicos em modelo hidráulico reduzido, nos quais esses aspectos são investigados.

Diante do exposto, é essencial a observância dos métodos e critérios de projeto visando à redução dos riscos de ocorrência desses acidentes.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL - ABGE. **Manual de Sondagens**. Boletim nº 3, 5ª edição, São Paulo, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE. **The Evaluation of Dam Safety. The Malpasset Dam**. Jean Bellier. Asilomar Conference Grounds. California. 1976.

BARBOSA, N. P.; MENDONÇA, A. V.; SANTOS, C. A. G.; LIRA, B. B. **Barragem de Camará**. Relatório. Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia. João Pessoa, 92 p, 2004. Disponível em: <http://www.prpb.mpf.mp.br/news/1docs/Camara/relatorio_final_ufpb.pdf>. Acesso em 10 de jan. 2017.

BORNSCHEIN, A.; POHL, R. Dam Break During the Flood in Saxony, Germany, 08/2002. **Proc. of XXX Int. Ass. of Hydraulic Resources Congress**. Thessaloniki, Greece. 2003. 8 p.

CARVALHO, E. Relato do Tema 113, Segurança de Barragens e Avaliação de Riscos. In: **XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Foz do Iguaçu. 2015.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS/COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS - ELETROBRÁS/CBDB. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Manual. Rio de Janeiro. 2003.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS - ELETROBRAS. **Diretrizes para Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Manual. Rio de Janeiro. 2000.

PAIVA JÚNIOR, H. B. **Efeitos do Rompimento da Barragem de Camará na Área Urbana do Município de Alagoa Grande**. 2006. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2006.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION - USBR. **Dams and Public Safety**. A Water Resources Technical Publication. Denver, 1983. 332 p.

UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION – USBR. **Dam Safety Public Protection Guidelines**. A Risk Framework to Support Dam Safety Decision-Making. Denver, 2011. 38p.

SAMPAIO, M. V. N. **Segurança de Barragens de Terra: Um Relato da Experiência do Piauí**. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil de Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2014.

VI. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.