

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GRAZIELLE SMANIOTTO DORTA

**LEVANTAMENTO DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS GEOTÉCNICOS
ENVOLVIDOS NA RUPTURA DE BARRAGENS NO BRASIL**

ILHA SOLTEIRA – SP

2023



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

GRAZIELLE SMANIOTTO DORTA

**LEVANTAMENTO DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS GEOTÉCNICOS
ENVOLVIDOS NA RUPTURA DE BARRAGENS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia 23Civil

Orientador: Prof. Dr. Artur Pantoja Marques

ILHA SOLTEIRA – SP

2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

D719I Dorta, Grazielle Smaniotto.
Levantamento dos principais problemas geotécnicos envolvidos na ruptura de barragens no Brasil / Grazielle Smaniotto Dorta. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
87 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Artur Pantoja Marques

Inclui bibliografia

1. Ruptura. 2. Barragens. 3. Geotécnica. 4. Piping.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Setor Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

Grazielle Smaniotto Dorta

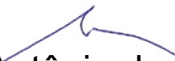
**LEVANTAMENTO DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS GEOTÉCNICOS
ENVOLVIDOS NA RUPTURA DE BARRAGENS NO BRASIL**


Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenharia Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Câmpus de Ilha Solteira.

Aprovada em 25/01/2023

Comissão Examinadora


Prof. Dr. Artur Pantoja Marques
UNESP/FE - Ilha Solteira (Orientador)


Prof. Dr. Marco Antônio de Moraes Alcântara
UNESP/FE Ilha Solteira (Examinador)


Profa. Dra. Claudia Scoton Antonio Marques
UNIFUNEC/Santa Fé do Sul (Examinadora)

Ilha Solteira
25 de janeiro de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais Silvana e Valdir Dorta que durante toda minha vida me proporcionaram apoio para que eu conseguisse alcançar meus sonhos e objetivos, bem como me deram condições de ter acesso à educação de qualidade.

Gostaria também de agradecer meus amigos, pelo suporte proporcionado durante a graduação, tanto no meio acadêmico quanto no meio social, e principalmente ao meu namorado Daniel Oliveira, pelo apoio fornecido em todos os momentos desde que nos conhecemos.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a UNESP de Ilha Solteira por me proporcionar grande aprendizado acadêmico e pessoal durante os anos de graduação, e ao meu orientador Artur Pantoja Marques por me auxiliar na elaboração deste trabalho.

RESUMO

As barragens são elementos de profunda importância na sociedade, podendo ter como finalidade o abastecimento humano, irrigação, o uso hidrelétrico, ou então para conter rejeitos de mineração. Apesar de apresentar várias vantagens, elas também podem ser perigosas, visto que em casos envolvendo rupturas, uma grande onda de cheia é gerada, podendo destruir não só as estruturas do barramento, como também inundar e destruir vilarejos a jusante, tendo potencial de ocasionar perdas de vidas humanas e animais. O presente trabalho teve como objetivo o levantamento das causas que provocaram eventos de ruptura, mais especificamente as causas geotécnicas. Para tal, foram analisados 164 relatos de acidentes e incidentes envolvendo barragens no Brasil, englobando eventos que datam de 1912 a 2020. Foi identificado que em 44% desses casos houveram rupturas parciais ou totais da estrutura e, que dentre as causas para as rupturas, 31% ocorreram devido a causas geotécnicas. No cenário brasileiro, a principal causa geotécnica identificada foi a erosão interna (piping). Quando comparado com um estudo que englobou uma gama de dados globais, observou-se que o piping também figurou como a principal causa geotécnica que pode ocasionar a ruptura de barragens. A partir da análise do estudo de caso realizado neste trabalho, notou-se que uma investigação aprofundada das características geotécnicas e geológicas do solo pode prevenir futuros acidentes ao barramento, assim como as ações de manutenção da barragem, que também tem seu papel importante para evitar possíveis sinistros.

ABSTRACT

Dams are elements of profound importance in society, and may be used for human supply, irrigation, hydroelectric use, or to contain mining tailings. Despite having several advantages, they can also be dangerous, since in cases involving ruptures, a large flood wave is generated, which can destroy not only the structures of the dam, but also flood and destroy villages downstream, having the potential to cause losses of human and animal lives. The present work aims to determine some of the causes that provoke rupture events, more specifically the geotechnical causes. To this end, 164 reports of accidents and incidents involving dams in Brazil were analyzed, encompassing events dating from 1912 to 2020. It was identified that in 44% of these cases there was a partial or total rupture of the structure and that, among the causes for ruptures, 31% occurred due to geotechnical causes. In the Brazilian scenario, the main geotechnical cause identified was internal erosion (piping). When compared with a study that encompassed a range of global data, it was observed that piping also figured as the main geotechnical cause that can cause dam failure. From the analysis of the case study carried out in this work, it was noted that a thorough investigation of the geotechnical and geological characteristics of the soil can prevent future accidents to the dam, as well as dam maintenance actions, which also have an important role to avoid possible accidents.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Regularização do regime hidrológico.....	16
Figura 2- Amortecimento de uma onda de enchente.	17
Figura 3- Esquema das barragens de terra.....	18
Figura 4- Esquema das barragens de enrocamento.	19
Figura 5- Esquema das barragens de concreto	20
Figura 6- Esquema das barragens mistas.....	21
Figura 7- Esquema do barramento.....	22
Figura 8- Alteamentos realizados posteriormente ao dique inicial	22
Figura 9- Estrutura inicial do barramento a montante.	23
Figura 10 - Barramentos a montante.....	23
Figura 11- Esquema de construção e alteamento pelo método da linha de centro...24	
Figura 12 – Esquema de erosão interna iniciada devido a um escoamento concentrado.....	27
Figura 13 - Esquema de erosão interna na fundação de uma barragem iniciada a partir de um processo de erosão regressiva	27
Figura 14 - Esquema de erosão interna iniciada a partir de um processo de erosão regressiva entre o maciço e a fundação de uma barragem	28
Figura 15 – Modos de ruptura ocasionados por erosão interna.	28
Figura 16 – Porcentagem de barragens que apresentaram ruptura total ou parcial. 43	
Figura 17 – Porcentagem de eventos de ruptura com causas geotécnicas.	45
Figura 18 – Proporção das principais causas de ruptura geotécnicas apresentadas.	46
Figura 19 – Percentual do tipo de causa de ruptura mais frequente em barragens de terra.....	51
Figura 20 – Percentual das causas geotécnicas que ocasionaram ruptura das barragens de terra.....	52
Figura 21 – Planta da barragem de Algodões I.....	53
Figura 22 – Queda da primeira placa de concreto	54
Figura 23 – Queda de toda estrutura de concreto.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Listagem de barragens envolvidas em acidentes e/ou incidentes e a ocorrência de rupturas totais e/ou parciais.....	34
Quadro 2 – Barragens que apresentaram ruptura geotécnica e suas causas.	44
Quadro 3 – Principais informações sobre os barramentos que sofreram ruptura total ou parcial.....	61
Quadro 4 – Principais causas e consequências dos eventos de ruptura nas barragens listadas.	74

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

ASCE – American Society of Civil Engineers

CBDB – Comitê Brasileiro de Grandes Barragens

CCR – Concreto Compactado a Rolo

CNRH – Conselho Regional de Recursos Hídricos

ICOLD – Comissão Internacional de Grandes Barragens

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

RSB – Relatório de Segurança de Barragens

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	13
2.OBJETIVOS	14
2.1.Objetivo geral	14
2.2.Objetivos específicos	14
3.REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1.Definição de barragem	15
3.2.Finalidades do barramento.....	15
3.2.1.Barragem de regularização	16
3.2.2.Barragem de contenção	17
3.3.Tipos de barragens	17
3.3.1.Barragens de terra	17
3.3.2.Barragens de enrocamento.....	18
3.3.3.Barragens de concreto	19
3.3.4.Barragens mistas	21
3.4.Métodos construtivos das barragens de contenção	21
3.4.1.Método da jusante.....	22
3.4.2.Método da montante	22
3.4.3.Método da linha de centro	23
3.5.Mecanismos envolvidos na ruptura de barragens	24
3.5.1.Percolação	24
3.5.2.Instabilidade	24
3.5.3.Erosão	25
3.5.4.Galgamento ou “Overtopping”	25

3.5.5.Erosão interna (Piping).....	26
3.5.6.Liquefação	29
3.6.Histórico do registro de acidentes e incidentes envolvendo barragens.....	29
3.6.1.Definição de acidentes e incidentes envolvendo barragens.....	29
3.6.2.Histórico do registro de acidentes e incidentes de barragens no mundo	29
3.6.3.Histórico do registro de acidentes e incidentes de barragens no Brasil	31
4.METODOLOGIA.....	33
5.RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1.Exclusão das barragens citadas nos relatos que não estavam envolvidas em eventos de ruptura total ou parcial	34
5.2.Determinação das causas de cada caso de ruptura apresentado.....	43
5.3.Breve síntese de um acidente envolvendo piping	46
5.4.Breve síntese de um acidente envolvendo movimentos de massa	47
5.5.Breve síntese de um acidente envolvendo liquefação	48
5.6.Breve síntese de um acidente envolvendo falhas na fundação.....	49
5.7.Breve síntese de um acidente envolvendo outras causas geotécnicas	50
5.8.Comparação com os dados de outro estudo.....	51
5.9.Estudo de caso.....	52
6.CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
7.ANEXOS	60
7.1.Anexo I	61
7.2.Anexo II	74

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Lei Nº12.334, de setembro de 2010, barragens podem ser definidas como estruturas construídas dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (BRASIL, 2010).

Conforme citado pelo Relatório de Segurança de Barragens, redigido pela ANA em 2021, os principais usos de barragens submetidas a Política Nacional de Segurança de Barragens no Brasil estão relacionados à irrigação, abastecimento humano, hidrelétrica e contenção de rejeitos de mineração (ANA, 2021).

Apesar das vantagens obtidas com o uso de barragens, elas também podem ser vistas como uma fonte de perigo potencial quando analisada a possibilidade de seu rompimento, devido ao volume e às características físico-químicas do material armazenado. Nos casos de ruptura, há um acréscimo significativo da vazão em trânsito no trecho de jusante e, por consequência, uma área extensa estará sujeita a ocorrência de inundação e ao aumento da velocidade de escoamento (MELO, 2013; ROCHA, 2015).

Rupturas de barragens são classificadas como desastres podendo ser oriundos de causas naturais como cheias e terremotos, ou antrópicas, como manutenção inadequada e ações terroristas. O repentino extravasamento do volume armazenado, ocasionado por uma falha estrutural, pode apresentar grande potencial de danos por inundação nas áreas a jusante (SILVA, 2020). Essa inundação das áreas a jusante pode levar a perdas de bens materiais, quando houver a existência de residências ou comércios na região, bem como a perda de vidas humanas e animais.

Nos últimos anos, a incidência de acidentes em barragens no território nacional tem se acentuado em decorrência de vários aspectos, destacando-se a aceleração no ritmo de construção de novos empreendimentos (em particular de pequenas barragens) e a crescente participação da iniciativa privada (pautada pela busca de

resultados em prazos mais curtos em relação aos adotados tradicionalmente, com consequente adoção de níveis de risco mais elevados) (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

Nesse contexto é interessante ponderar os principais mecanismos envolvidos no processo de ruptura de barragens. Neste trabalho, em específico, serão levantados os principais problemas geotécnicos que levaram a ruptura de uma barragem e como eles poderiam ser evitados.

2. OBJETIVOS

Neste tópico serão definidos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

2.1. Objetivo geral

O trabalho proposto teve como finalidade levantar as principais causas geotécnicas que ocasionaram a ruptura de barragens no Brasil, além de realizar um estudo de caso baseando-se em laudos emitidos após o evento, e discutir soluções que poderiam ter sido aplicadas para evitar sua ocorrência.

2.2. Objetivos específicos

- Revisão da bibliografia;
- Análise de laudos emitidos após o evento;
- Discussão das possíveis soluções.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Nesse tópico, com base na literatura pertinente, foi discorrido sobre a definição e finalidade para qual uma barragem pode ser usada, bem como os tipos de barragens existentes, os métodos construtivos e os mecanismos que podem vir a causar sua ruptura, além de um breve histórico do registro de acidentes e incidentes envolvendo barragens.

3.1. Definição de barragem

No Brasil a Lei 12.334 de Setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas ao acúmulo de água para quaisquer usos, bem como para deposição temporário de rejeitos e à acumulação de rejeitos industriais (BRASIL, 2010).

Essa lei, define barragem como sendo qualquer estrutura construída no interior ou exterior a um curso de água sendo ele permanente ou temporário, em talvegue ou em cava exaurida com dique, com finalidade de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, abrangendo o barramento e as estruturas associadas.

Ademais, essa legislação abrange barragens que apresentem pelo menos um dos seguintes critérios de classificação:

- Altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas;
- Categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador.

3.2. Finalidades do barramento

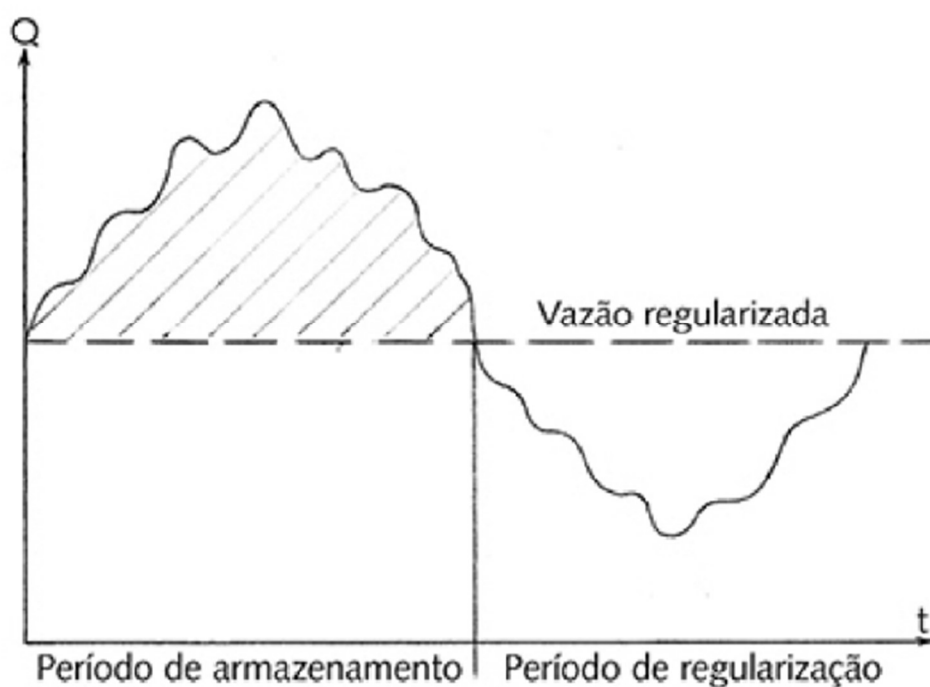
As barragens podem ser divididas quanto ao seu objetivo entre barragens de regularização e de contenção.

3.2.1. Barragem de regularização

São barragens que possuem como finalidade a regularização do regime hidrológico de um rio, armazenando água nos períodos em que sua disponibilidade é superior a demanda, possibilitando seu uso em um período de déficit hídrico (COSTA, 2012).

De acordo com Costa (2012), a regularização pode aumentar o volume de água armazenada, elevar o nível natural de um curso d'água por meio do armazenamento ou ainda criar um lago. Destaca-se que o objetivo do aumento de água está relacionado ao abastecimento doméstico ou industrial e a irrigação, enquanto a elevação do nível está diretamente relacionada a geração de energia elétrica, por meio da transformação da energia potencial hidráulica, ocasionada pela queda d'água.

Figura 1- Regularização do regime hidrológico.

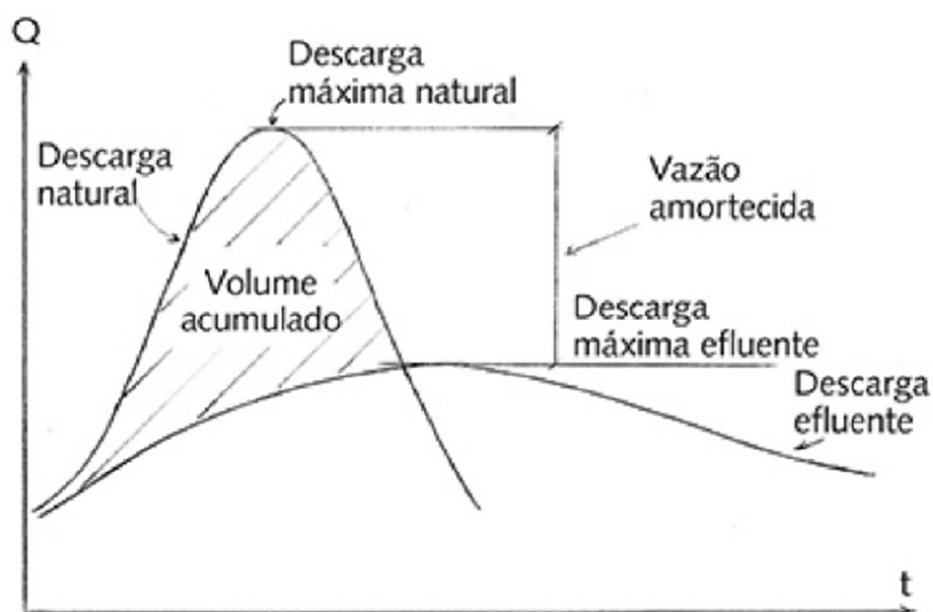


Fonte: Costa, 2012.

3.2.2. Barragem de contenção

Conforme citado por Costa (2012), são barragens que possuem como objetivo a retenção temporária de água ou o acúmulo de sedimentos, resíduos industriais ou rejeitos de mineração. Quando usadas para retenção de água objetivam o amortecimento das ondas de enchente, de modo a evitar inundações a jusante.

Figura 2- Amortecimento de uma onda de enchente.



Fonte: Costa, 2012.

3.3. Tipos de barragens

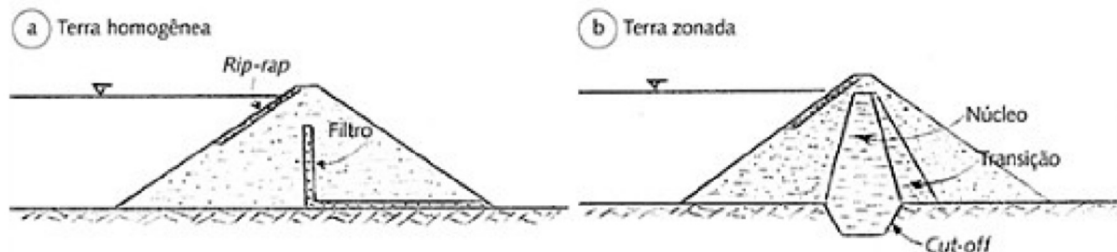
As barragens convencionais podem ser divididas em barragens de terra, enrocamento, concreto ou mistas. Nesse item serão detalhadas características de cada uma delas.

3.3.1. Barragens de terra

As barragens de terra podem ser do tipo homogênea ou então do tipo zonada. Conforme Costa (2012), uma barragem é considerada homogênea quando há predominância de um único material em sua composição, apesar de poderem existir elementos diversificados, como filtro e rip-rap. Já as barragens zonadas, possuem

um zoneamento de materiais terrosos em função das características de materiais e/ou sua permeabilidade.

Figura 3- Esquema das barragens de terra.



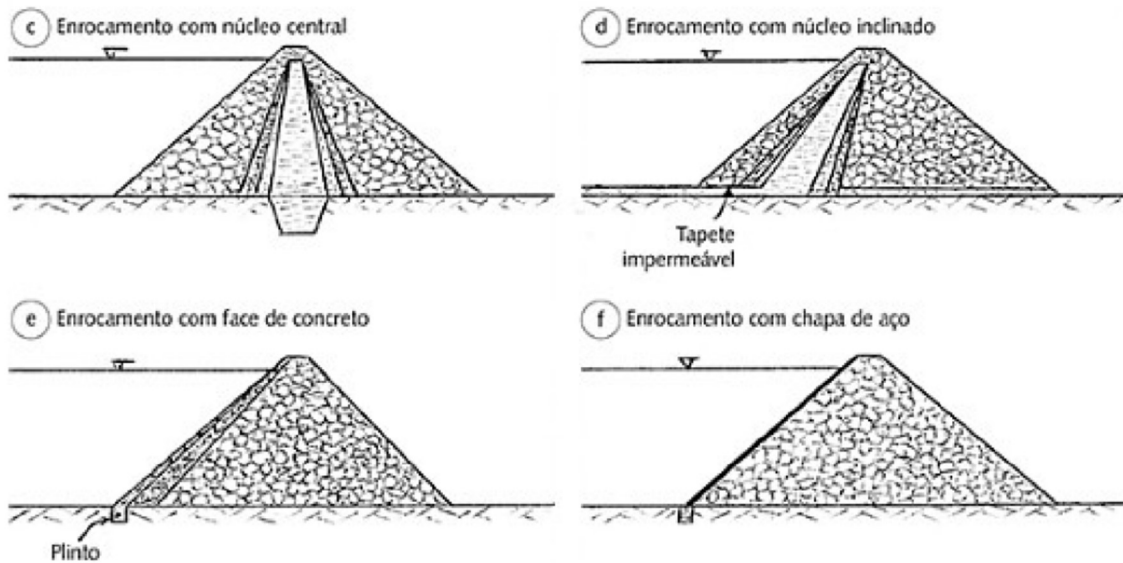
Fonte: Costa, 2012.

3.3.2. Barragens de enrocamento

As barragens de enrocamento podem ter o núcleo impermeável, ou então a face impermeável. Costa (2012) define barragens de enrocamento com núcleo impermeável como sendo barragens nas quais predomina o material rochoso, e a vedação da água é realizada por meio de um núcleo argiloso, separado do enrocamento por zonas de transição, de modo a evitar o carreamento do material fino para o interior do enrocamento, o núcleo pode estar centralizado ou então inclinado para a montante.

Ainda de acordo com Costa (2012), nas barragens com face permeável, a vedação da água é assegurada pela impermeabilização da face de montante da barragem, por meio de uma camada de asfalto, de uma placa de concreto ou ainda por uma chapa de aço.

Figura 4- Esquema das barragens de enrocamento.



Fonte: Costa, 2012.

3.3.3. Barragens de concreto

As barragens de concreto podem ser do tipo gravidade, gravidade aliviada, em contraforte, de concreto rolado ou compactado, abóboda ou em arco.

As barragens de gravidade são constituídas de concreto maciço, possuindo uma quantidade minoritária de armação, visto que sua estrutura recebe apenas esforços de compressão. Seu traçado pode ser retilíneo ou curvo (COSTA, 2012).

Já as barragens de gravidade aliviada são mais leves estruturalmente, havendo um vazio na estrutura, de modo a realizar uma pressão reduzida às fundações, ou ainda proporcionar uma economia de concreto. Por estar sujeita ao tracionamento, o uso de armaduras é superior nesse tipo de barramento, quando comparado as barragens de gravidade. Quanto ao seu tipo de traçado, ele pode ser retilíneo ou curvo (COSTA, 2012).

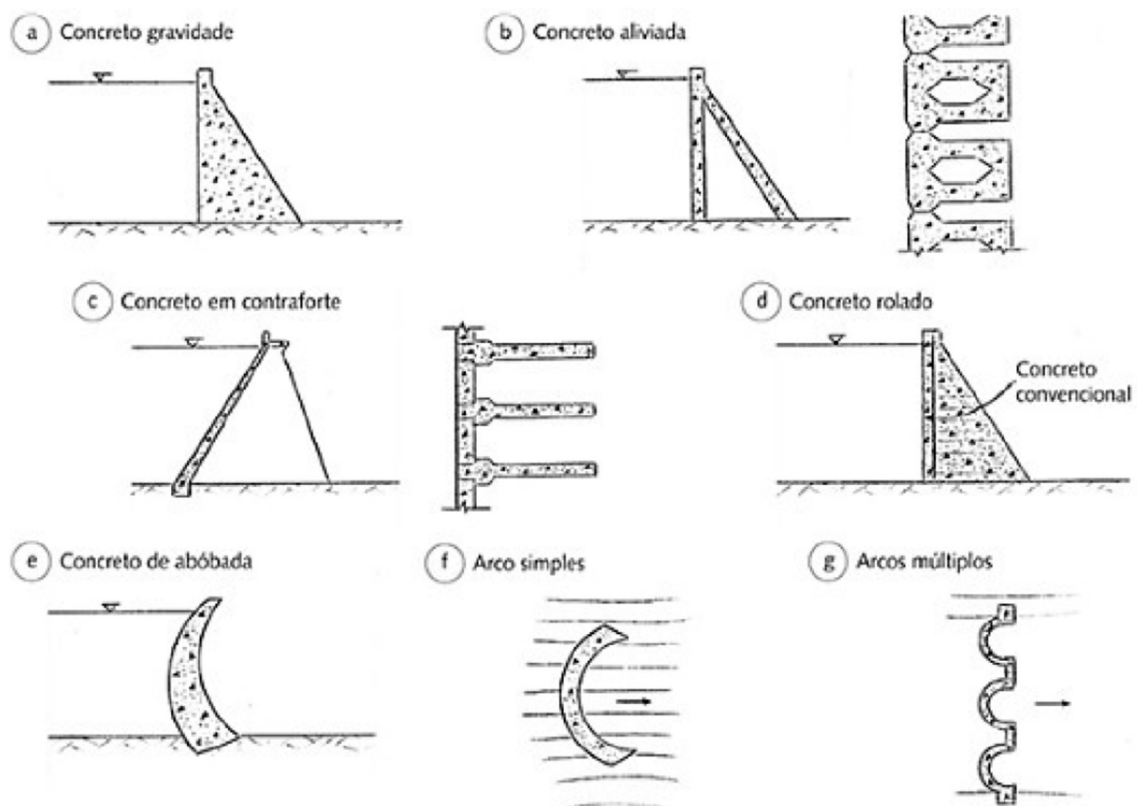
Os barramentos em contraforte são similares aos de gravidade aliviada, todavia são ainda mais leves, sendo o barramento com menor volume de concreto. Esse tipo de barragem necessita uma maior quantidade de armação que as demais citadas até então nesse trabalho, pois os esforços decorrentes da pressão hidrostática,

concentrados em menor área da fundação, apresentam maiores tensões de contato (COSTA, 2012).

As barragens de concreto rolado ou compactado funcionam como uma barragem de gravidade, na qual o concreto é difundido com um trator de esteira e em seguida compactado. Por não ser vibrado, a estanqueidade ou impedimento da passagem de água do concreto é assegurada por uma camada de concreto convencional, construída no paramento de montante (COSTA, 2012).

Por fim, as barragens do tipo abóbada ou em arco são as que apresentam a curvatura em duplo sentido: horizontal e verticalmente. Os arcos formados podem ser simples ou múltiplos. Uma fração das pressões hidráulicas dessa estrutura é transmitida para as ombreiras, devido ao efeito do arco. Ademais, em decorrência de sua forma esbelta, esse é o tipo de barramento com menor uso de concreto por metro quadrado de superfície represada (COSTA, 2012).

Figura 5- Esquema das barragens de concreto



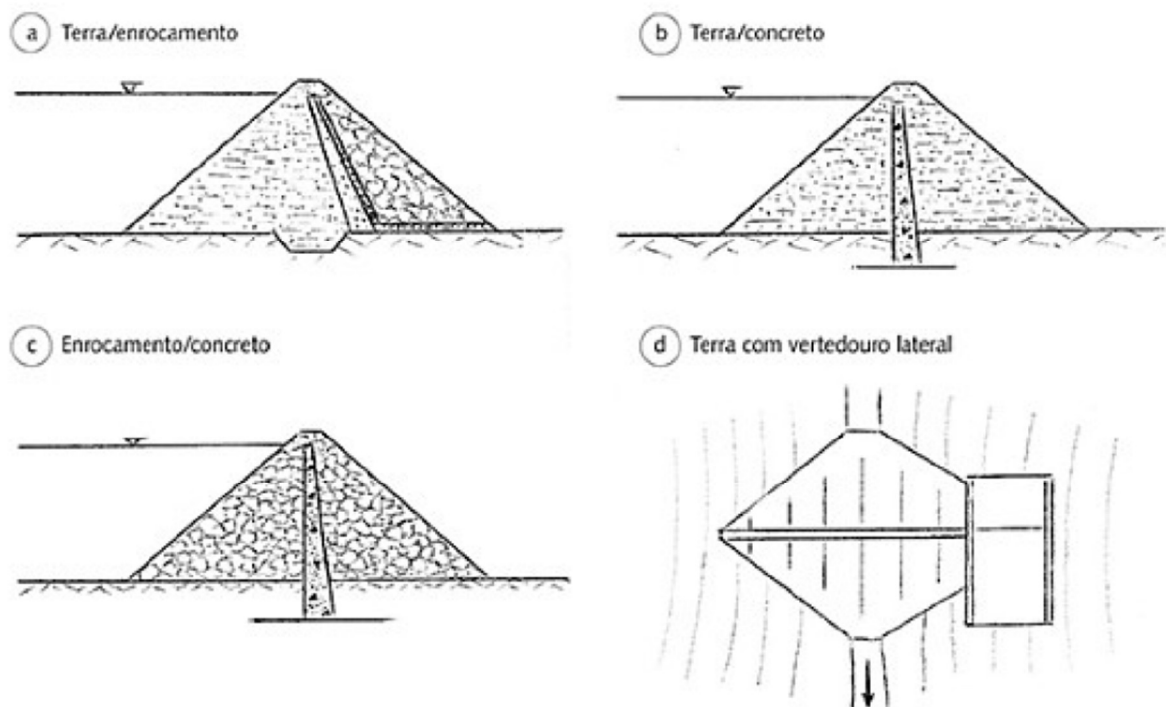
Fonte: Costa, 2012.

3.3.4. Barragens mistas

As formas nas quais uma barragem pode ser considerada mista são referentes a sua seção ou ao seu traçado. A barragem de seção mista é composta por diferentes materiais ao longo de uma seção transversal, sendo os mais conhecidos: terra/enrocamento; terra/concreto e enrocamento/concreto (COSTA, 2012).

A barragem é considerada mista em relação ao traçado quando as partes da obra possuem tipos diferentes, entre as barragens convencionais. Ressalta-se, que barragens com o corpo principal de terra ou enrocamento que possuem vertedouro em concreto, não são consideradas mistas, mesmo que constitua uma continuidade do traçado (COSTA, 2012).

Figura 6- Esquema das barragens mistas



Fonte: Costa, 2012.

3.4. Métodos construtivos das barragens de contenção

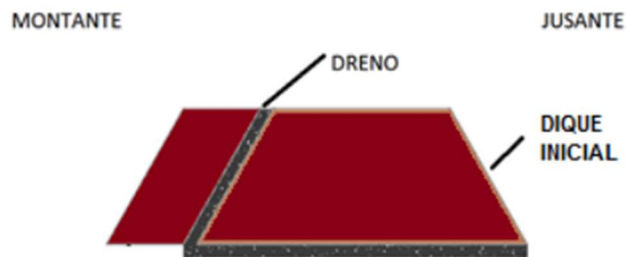
As barragens de contenção possuem três metodologias que podem ser seguidas para sua construção, sendo elas: o método da jusante, o método de

montante e o método da linha de centro. Neste item serão explanadas cada uma delas.

3.4.1. Método da jusante

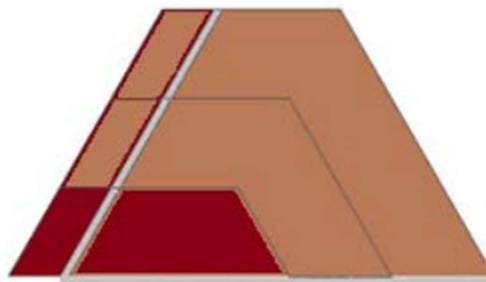
Esse método, como indicado pelo seu nome, tem como característica a construção e alteamento de um barramento sempre a jusante de uma barragem. As vantagens desse método compreendem a resistência a carregamentos dinâmicos, devido ao escalonamento da construção, sem interferir na segurança, facilitando a drenagem, e assim sendo pouco suscetível a liquefação, além de apresentar simplicidade na operação (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016).

Figura 7- Esquema do barramento



Fonte: Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016.

Figura 8- Alteamentos realizados posteriormente ao dique inicial



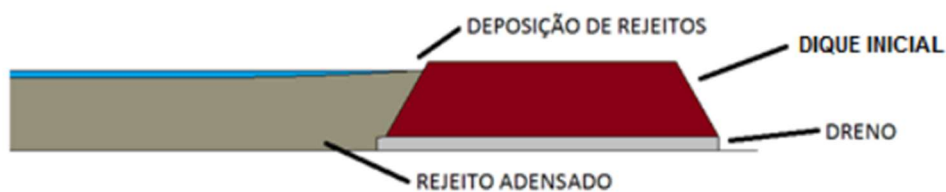
Fonte: Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016.

3.4.2. Método da montante

Esse método tem como característica a construção e alteamento do

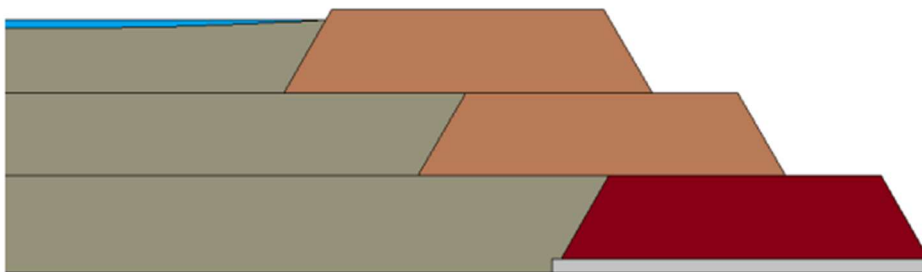
barramento sempre a montante, acima do rejeito já consolidado. Apesar de ser o método mais utilizado pela maioria das barragens de contenção de rejeitos de mineração, esse método exibe pouco controle construtivo, apresentando criticidade quanto a segurança da barragem. O método é tido como um desafio quando analisado geotecnicamente, em decorrência das tensões induzidas, potencial de liquefação e não consolidação do material usado como fundação (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016).

Figura 9- Estrutura inicial do barramento a montante.



Fonte: Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016.

Figura 10 - Barramentos a montante

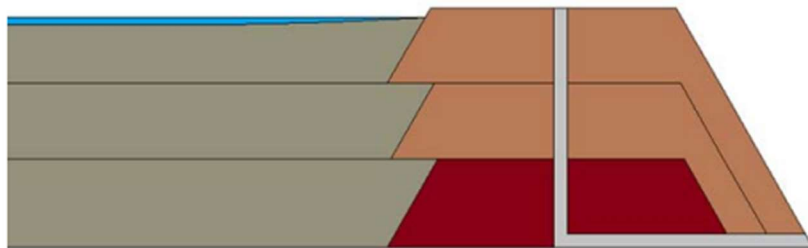


Fonte: Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016.

3.4.3. Método da linha de centro

No método da linha de centro a construção e o alteamento do barramento é realizado tanto à montante quanto à jusante, seguindo um eixo vertical denominada linha de centro. Nesse método, o alteamento é realizado ao mesmo tempo sob porções do rejeito, bem como sob o próprio barramento. No que concerne suas vantagens e desvantagens, ele é um intermediário entre os métodos de jusante e montante (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2016).

Figura 11- Esquema de construção e alteamento pelo método da linha de centro.



Fonte: Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016.

3.5. Mecanismos envolvidos na ruptura de barragens

São diversos os fatores que podem levar ao rompimento de uma barragem, nesse item serão detalhados alguns mecanismos hidráulicos e geotécnicos que podem estar envolvidos em eventos de ruptura.

3.5.1. Percolação

O mecanismo de percolação leva em consideração a identificação da trajetória que a água percorre através do barramento. Essa trajetória pode ocorrer no interior do aterro da barragem, em interfaces, sejam elas aterro/fundação ou aterro/concreto, ou ainda através das fundações. Ademais, há casos nos quais a água pode passar por diversos meios dentro do barramento. Esse mecanismo também engloba situações em que são verificadas perdas expressivas de água do reservatório em pontos afastados da barragem, um processo que pode ocorrer em áreas de rochas solúveis, ou em divisores de águas pouco consistentes (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

3.5.2. Instabilidade

Esse mecanismo engloba acidentes nos quais as cargas atuantes são superiores aos esforços resistentes do maciço. Em aterros essa instabilidade é exibida por meio dos deslizamentos, sejam através do aterro, ou ainda por meio do conjunto aterro/fundação (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

Nas estruturas de concreto esse mecanismo fenômeno é manifestado por

meio de deslizamento, tombamento e de subpressões excessivas, e afetam tanto a estrutura como o conjunto estrutura/fundação. Ademais, o comportamento de instabilidade é geralmente exibido em encostas e cortes na forma de deslizamentos, bem como outros movimentos de massa, afetando as imediações da barragem, as margens do reservatório e as margens do rio a jusante (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

3.5.3. Erosão

O mecanismo de erosão tem duas formas básicas de atuação, sendo elas: a erosão interna e a erosão externa. Essa última é exibida de três maneiras:

- Erosão da crista: sua ocorrência se dá pela ultrapassagem das águas por cima da barragem, geralmente logo após há a erosão do talude de jusante, sendo popularmente conhecida como galgamento;
- Erosão dos taludes: pode ser ocasionada por ondas no caso do talude de montante ou pelas águas da chuva nos casos do talude de jusante;
- Erosão de estruturas e de suas fundações: geralmente decorrentes do impacto causado pelas águas que escoam por meio dos órgãos extravasares ou por correntes de retorno (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a)

Quanto a erosão interna, sua ocorrência se dá principalmente em aterros e fundações em solo, com caráter retrocedente, denominada sifonamento ou entubamento, sendo também denominada piping. Esse tipo de erosão está associado ao mecanismo de percolação, da qual se origina (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

O galgamento e a erosão interna serão detalhados nos subitens a seguir.

3.5.4. Galgamento ou “Overtopping”

O galgamento, é um fenômeno que acontece quando o nível d'água do reservatório de uma barragem ultrapassa a cota de sua crista. Geralmente, são ocasionados devido às chuvas muito intensas, que produzem as cheias dos cursos fluviais, e excedem a capacidade de extravasão do vertedouro da barragem

(ENGECORPS, 2012).

O rompimento de uma barragem localizada a montante também pode ser uma das causas que levam ao galgamento, visto que a barragem à jusante se torna incapaz de laminar e verter todo volume advindo dessa barragem, elevando o nível de seu reservatório acima do coroamento, e assim provocando uma ruptura em cascata (ENGECORPS, 2012).

Quando levado em consideração as barragens de terra, o galgamento produz um arraste de materiais e sua posterior ruptura. Porém, quando considerado seus efeitos em barragens de concreto, ele não necessariamente ocasiona a ruptura, entretanto, as sobrecargas a que a barragem pode ser submetida podem conduzi-la à ruptura (ENGECORPS, 2012)

3.5.5. Erosão interna (Piping)

O processo de erosão interna acontece em decorrência do carreamento de partículas de solo do maciço de uma barragem ou de sua fundação, devido ao fluxo de percolação existente, assim como cita Filho (2013).

Foster et al. (1998) relata a existência de quatro fases desse mecanismo, sendo elas o início, a continuação, a progressão e a fratura. O início é a fase a partir da qual o processo é iniciado, podendo ser ocasionado devido a escoamentos concentrados, erosão regressiva, erosão de contato ou sufusão ou ainda por mais de um desses fatores simultaneamente (FILHO, 2013).

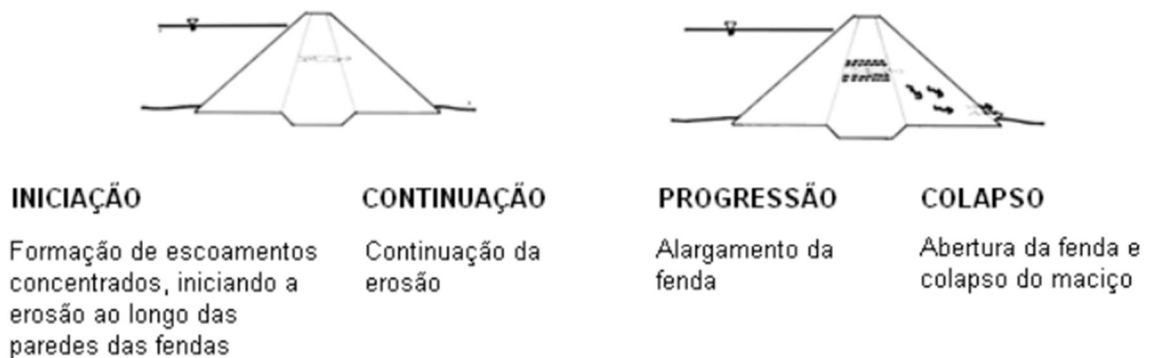
A continuação acontece logo após ao início do fenômeno, no qual não houve a interrupção da erosão por meio da atuação de um filtro ou ainda pelas partículas erodidas não terem sido contidas por algum material (FILHO, 2013).

A progressão é a etapa na qual um “tubo” é formado e as poropressões e/ou a percolação à jusante da barragem ou da fundação são estabilizadas ou então tem sua intensidade aumentada. Nas erosões regressivas, nesse estágio a erosão passa a não performar apenas superficialmente na face de jusante da barragem, com a

formação do tubo. Nas sufusões apesar de não haver a formação de um tubo, há um aumento significativo na permeabilidade do maciço (FILHO, 2013).

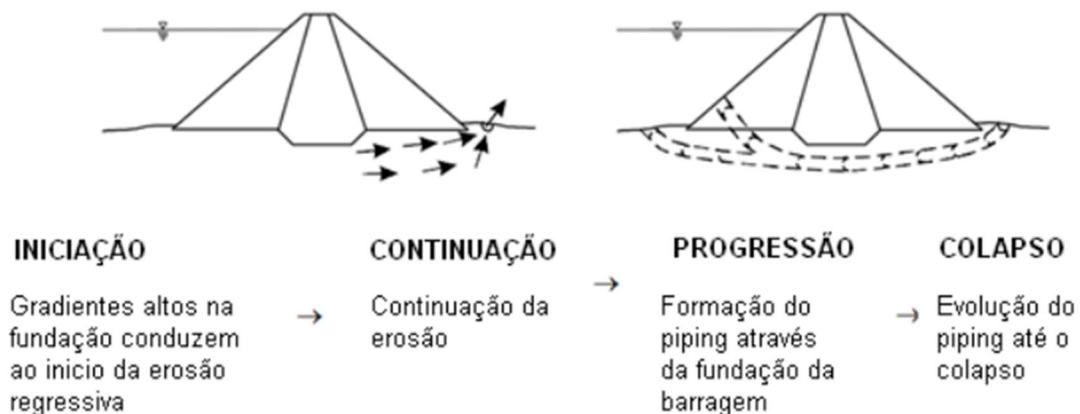
A fratura ou breach, é o estágio no qual ocorre a formação de uma brecha, na qual há a extravasão descontrolada do reservatório e não se tem mais controle sobre o processo de ruptura (FILHO, 2013). As figuras a seguir apresentam esquematicamente as etapas do processo de erosão interna para diferentes mecanismos de iniciação.

Figura 12 – Esquema de erosão interna iniciada devido a um escoamento concentrado



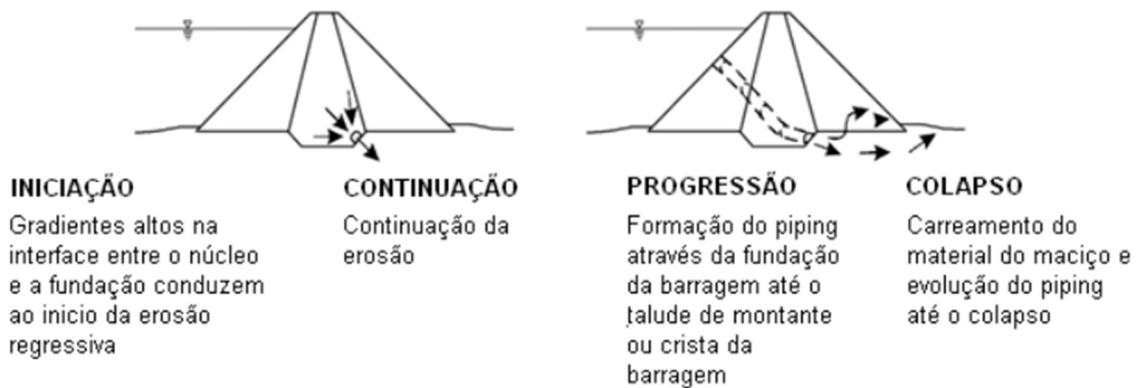
Fonte: Filho, 2013.

Figura 13 - Esquema de erosão interna na fundação de uma barragem iniciada a partir de um processo de erosão regressiva



Fonte: Filho, 2013.

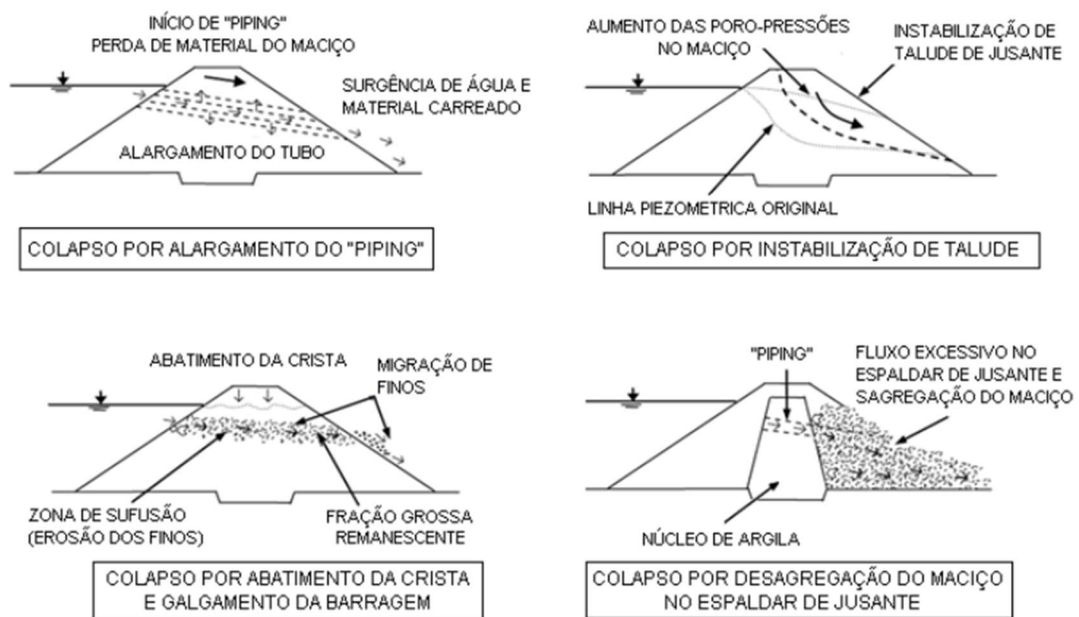
Figura 14 - Esquema de erosão interna iniciada a partir de um processo de erosão regressiva entre o maciço e a fundação de uma barragem



Fonte: Filho, 2013.

Os modos de ruptura mais comuns devido aos eventos de erosão interna são: o colapso por alargamento do *piping*, o colapso pela instabilização do talude, o colapso por abatimento da crista e galgamento da barragem e o colapso por desagregação do maciço no espaldar de jusante (FELL; FRY, 2007). A figura a seguir ilustra esses modos de ruptura.

Figura 15 – Modos de ruptura ocasionados por erosão interna.



Fonte: Filho, 2013.

3.5.6. Liquefação

O processo de ruptura por liquefação acontece em solos não coesivos, saturados e em condições de carregamento não drenado. Quando da aplicação de esforços, há um aumento de poro pressão até atingir um valor igual ao da tensão de confinamento inicial, então a tensão efetiva ou intergranular que existe no esqueleto do material diminui até ser nula. Em decorrência disso há perda de toda resistência cisalhante do material, que passa a se comportar como um líquido viscoso. No processo de liquefação a posição relativa dos grãos está constantemente mudando, de modo a manter uma resistência mínima (Souza, 2018).

3.6. Histórico do registro de acidentes e incidentes envolvendo barragens

Nesse item, serão definidos acidentes e incidentes de barragens, bem como será apresentado um breve histórico do registro desses eventos a nível mundial e nacional.

3.6.1. Definição de acidentes e incidentes envolvendo barragens

A resolução nº 144/2012 do Conselho Regional de Recursos Hídricos (CNRH), em seu artigo segundo define:

- Acidente: comprometimento da integridade da estrutura, apresentando a liberação incontrolável do conteúdo de um reservatório em decorrência de colapso parcial ou total da barragem ou estrutura anexa;
- Incidente: qualquer evento que interfira no comportamento da barragem ou estrutura anexa, que caso não seja controlado, possa ocasionar um acidente.

3.6.2. Histórico do registro de acidentes e incidentes de barragens no mundo

No âmbito internacional a ICOLD (Comissão Internacional de Grandes

Barragens), criada em 1928, foi a responsável por executar os primeiros levantamentos na área de segurança de barragens, englobando dados pertinentes ao cadastramento de acidentes e incidentes (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

O primeiro cadastramento de acidentes realizado pela ICOLD ocorreu na década de 60, quando em 1964 a comissão aprovou a proposta para o “Estudo de acidentes e incidentes conhecidos em fundações rochosas de grandes barragens”. Esse estudo compreendia barragens com altura superior a 15 metros ou então barragens entre 10 e 15 metros que possuísem pelo menos um desses requisitos:

- Comprimento de crista não inferior a 500 m;
- Capacidade do reservatório não inferior a 1 milhão de m³;
- Descarga máxima de cheia não inferior a 2 mil m³ por segundo;
- Condições de fundação particularmente problemáticas;
- Projeto da barragem não convencional.

As informações sobre os acidentes e incidentes foram solicitadas a todos os comitês nacionais membros da ICOLD, resultando no livro “Lessons from dam incidents”. O livro, publicado em 1974, contava com resultados de 43 países membros que relataram 530 incidentes ocorridos entre 1900 e 1965, entre esses 90 casos foram de colapso. O Brasil foi citado com o acidente de Orós- CE e com um incidente envolvendo os tuneis de desvio de Furnas (MG) (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

Em 1973 visando aumentar o relato de acidentes importantes a ICOLD selecionou o tema “Acidentes em barragens” como um dos principais tópicos do II Seminário Nacional. E a partir de então foi consolidada a prática de levantamentos periódicos e sistemáticos de incidentes e acidentes em barragens (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

Em 1975 a *American Society of Civil Engineers (ASCE)* publicou o primeiro levantamento do tipo realizado nos Estados Unidos com o título “*Lessons from dam incidents-USA*”, dando continuidade ao primeiro cadastramento do ICOLD entre 1966 e final de 1972 (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

Em 1988 foi publicado o livro “*Lessons from dam incidents-USA II*” cobrindo os acidentes ocorridos entre o início de 1973 e o final de 1985 nos Estados Unidos. Baseado nos registros de acidentes em barragens, Foster et al. (1988) levantaram em termos estatísticos as rupturas em grandes barragens de terra e/ou enrocamento construídas entre 1800 e 1986 em todos os continentes (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

3.6.3. Histórico do registro de acidentes e incidentes de barragens no Brasil

No Brasil, há uma escassez de documentação sobre os acidentes de barragens, visto que muitas barragens foram implantadas sem registro de projeto, e em regiões afastadas de centros urbanos. Nessas condições os casos de acidentes alcançam os veículos de comunicação apenas quando afetam as condições de vida de pessoas ribeirinhas ou interrompem as vias de comunicação local. (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

A primeira tentativa do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBDB) se filiar ao ICOLD ocorreu em 1936, após o Segundo Congresso Internacional de Grandes Barragens. Entretanto sua duração foi curta devido à ausência de suporte financeiro ao comitê brasileiro, sendo dissolvido. Em 1957 o CBDB foi reativado, porém continuou com dificuldades para contribuir anualmente com a ICOLD (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

Em 1961 houve um impulso no CBDB com a contribuição financeira de empresas privadas de engenharia consultiva. O primeiro estatuto do CBDB foi datado em outubro desse ano (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

O CBDB promoveu um cadastramento de 140 casos de deterioração de

barragens e reservatórios no Brasil, servindo como base para o boletim da ICOLD “*Deterioration of dams e reservoirs*”, editado em 1983 (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

A escassez de informações é verificada pelas estatísticas documentadas, visto que no Brasil, do total de 700 grandes barragens construídas até 1990, foram registrados pouco mais de 10 acidentes até essa data (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

A partir da promulgação da Lei nº 12.334/2010, foi atribuída a Agência Nacional de Águas (ANA) a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens, sendo sua primeira edição relativa ao ano de 2011. Desde então, houve um grande empenho, por parte da ANA, para conceber e implementar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens, no qual deve estar o cadastro único de todas as barragens construídas no País. O cadastro é o primeiro passo para elaborar e implantar um sistema de classificação das barragens em função da categoria de risco e dano potencial associado (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021a).

4. METODOLOGIA

Para análise dos principais aspectos geotécnicos envolvidos na ruptura de barragens no Brasil, foi feita uma pesquisa documental realizada a partir de documentos, ou seja, de 164 relatos citados no livro “Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil - Relatos” considerados cientificamente autênticos. Os documentos poderiam ser de fontes primárias e secundárias; fontes escritas ou não. O livro em questão foi publicado em 2021, pelo CBDB, e reúne acidentes e incidentes ocorridos e documentados até esse período no país.

Como a análise buscou levantar as causas que ocasionaram ruptura, os dados referentes aos acidentes nos quais não houve colapso parcial ou total da barragem e suas estruturas anexas foram descartados. Em seguida, foi determinada a causa do acidente com base no relato presente no livro, e então foi verificada qual a porcentagem correspondente aos acidentes com causa geotécnica.

Dentre os acidentes com causa geotécnica foi definido qual apresenta maior proporção. Esses dados foram comparados com os dados obtidos em outro estudo, a nível global, para verificar se há uma semelhança no padrão obtido.

Por fim, foi realizado um estudo de caso, analisando uma barragem que apresentou ruptura causada devido a um mecanismo geotécnico, e realizou-se uma ponderação com base nos laudos emitidos pós ruptura do que poderia ter sido feito para evitá-la.

O procedimento da metodologia aplicada está detalhado a seguir:

- Foram definidos os documentos a serem utilizados;
- Foram definidos os conceitos e termos a serem analisados no documento;
- Foi realizada a leitura e interpretação dos diferentes documentos;

- Foi feita uma relação entre a interpretação realizada e conceitos definidos na pesquisa;
- Para confirmar a análise e a interpretação realizada foi analisado, com maiores detalhes, o caso específico da Barragem de Algodões I.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item, são apresentados os resultados obtidos após a análise dos 164 relatos presentes no livro: “Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil - Relatos”, bem como a discussão que foi realizada a partir desses resultados. Também é apresentado um estudo de caso, detalhando um evento que sofreu ruptura geotécnica.

5.1. Exclusão das barragens citadas nos relatos que não estavam envolvidas em eventos de ruptura total ou parcial

Após a análise dos 164 relatos presentes no livro: “Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragens e obras anexas no Brasil - Relatos”, foram excluídas as barragens citadas que não apresentavam ruptura total ou parcial, por meio da análise da descrição dos eventos apresentado. No Quadro 1, é exibida a listagem de barragens envolvidas em acidentes e/ou incidentes, bem como a fonte a partir da qual foram obtidas pelo autor do livro, juntamente com a análise realizada no que concerne as rupturas totais ou parciais.

Quadro 1 – Listagem de barragens envolvidas em acidentes e/ou incidentes e a ocorrência de rupturas totais e/ou parciais.

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
1	Açu (RN)	Documentação técnica	SIM
2	Agrovila 1(Santa Júlia) (ES)	Documentação jornalística	NÃO
3	Agrovila 2 (Alto Santa Júlia) (ES)	Documentação jornalística	NÃO
4	Água Vermelha (José Ermírio de Moraes) (SP/MG)	Documentação técnica	SIM

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
5	Aipim (BA)	Documentação técnica	NÃO
6	Algodões I (PI)	Documentação técnica	SIM
7	Alois Partel ou Monjolinho (SP)	Documentação técnica escassa	NÃO
8	Alto Grande ou Serra Branca (BA)	Documentação técnica escassa	SIM
9	Analândia (SP)	Documentação técnica escassa	SIM
10	Anel de Dom Marco (RS)	Documentação técnica	NÃO
11	Angiquinho (AL)	Documentação técnica	NÃO
12	Apertadinho (RO)	Documentação técnica	SIM
13	Araras (Paulo Sarasate) (CE)	Documentação técnica	NÃO
14	Arneiroz II (CE)	Documentação jornalística	NÃO
15	Assis Chateaubriand ou Salto do Mimoso (MS)	Documentação técnica escassa	NÃO
16	Bacanga (MA)	Documentação técnica escassa	NÃO
17	Baixo Iguaçu (PR)	Documentação técnica	SIM
18	Balneário Paraguaçu (SP)	Documentação jornalística	SIM
19	Banabuiú (Arrojado Lisboa) (CE)	Documentação técnica escassa	NÃO
20	Bandeira de Mello (BA)	Documentação técnica escassa	SIM
21	Barcarena (PA)	Documentação técnica escassa	NÃO
22	Barreiras (PI)	Documentação técnica	NÃO
23	Barreiros (PE)	Documentação técnica escassa	SIM
24	Batalhão (CE)	Documentação técnica	NÃO
25	Bezerra (PI)	Documentação jornalística	NÃO

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
26	Bicas (MG)	Documentação jornalística	NÃO
27	Bocaina (RJ)	Documentação técnica escassa	NÃO
28	Bocaiúva (MT)	Documentação jornalística	SIM
29	Bom Retiro (RS)	Documentação técnica	NÃO
30	Boqueirão das Cabaceiras (Epitácio Pessoa) (PB)	Documentação técnica	NÃO
31	Cachoeira Caldeirão (AP)	Documentação jornalística	SIM
32	Cacimba Nova (PE)	Documentação técnica escassa	SIM
33	Cafundó (RS)	Documentação técnica escassa	SIM
34	Caldeirão (PI)	Documentação técnica escassa	NÃO
35	Calheiros (RJ)	Documentação técnica escassa	NÃO
36	Camará (PB)	Documentação técnica	SIM
37	Campos Novos (Barragem) (SC)	Documentação técnica	SIM
38	Campos Novos (Túneis de desvio) (SC)	Documentação técnica	SIM
39	Candongá (UHE Risoleta Neves) (MG)	Documentação técnica	NÃO
40	Carão (CE)	Documentação técnica escassa	NÃO
41	Castro Alves (RS)	Documentação técnica	NÃO
42	Cataguazes (MG)	Documentação técnica	SIM
43	Caxitoré (CE)	Documentação técnica	NÃO
44	Coaracy Nunes ou Paredão (AP)	Documentação técnica escassa	NÃO
45	Cocorobó (BA)	Documentação técnica	SIM
46	Coronel Soares (Jales) (SP)	Documentação técnica escassa	NÃO

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
47	Corumbataí	Documentação técnica escassa	SIM
48	Coxim (Dr. Vitor Andrade Brito) (MS)	Documentação técnica escassa	SIM
49	Crixas –Barragem MSG (GO)	Documentação técnica escassa	NÃO
50	Curuá-Una ou UHE Sílvio Braga (PA)	Documentação técnica	NÃO
51	Custódia (PE)	Documentação jornalística	SIM
52	Delmiro Gouveia – Barragem Leste (AL)	Documentação técnica	NÃO
53	Derivação do rio Cubatão (SC)	Documentação técnica escassa	SIM
54	Dique B3 – Ipê Brumadinho (MG)	Documentação técnica escassa	NÃO
55	Duas Bocas (ES)	Documentação técnica	SIM
56	Ema (CE)	Documentação técnica escassa	SIM
57	Emas Novas (Usina Mogi-Guaçu) (SP)	Documentação técnica	SIM
58	Emborcação (MG/GO)	Documentação técnica	NÃO
59	Engordador (SP)	Documentação técnica	NÃO
60	Espora (GO)	Documentação técnica	SIM
61	Estevam Marinho - Sistema Curema - Mãe D'Água (PB)	Documentação técnica	NÃO
62	Estreito (Luiz Carlos Barreto de Carvalho) (MG/SP)	Documentação técnica	NÃO
63	Euclides da Cunha (SP) (Efeito cascata)	Documentação técnica	SIM
64	Eugênio Gudín – Ex Acarape do Meio (CE)	Documentação técnica	SIM
65	Fazenda Felícia (GO)	Documentação jornalística	SIM
66	Fernandinho (MG)	Documentação técnica	SIM
67	Fontes Velha (Chaminé) (RJ)	Documentação técnica	SIM

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
68	Fontes Velha (Dique 4) (RJ)	Documentação técnica	NÃO
69	Foz do Chapecó (SC)	Documentação técnica escassa	SIM
70	Fundão (Efeito cascata) (MG)	Documentação técnica	SIM
71	Furnas (Reservatório) (MG)	Documentação técnica	NÃO
72	Furnas (Túneis de desvio) (MG)	Documentação técnica	NÃO
73	General Sampaio (CE)	Documentação técnica	NÃO
74	Granada (MG)	Documentação técnica	SIM
75	Granjeiro (CE)	Documentação jornalística	NÃO
76	Guaíba Country Club (RS)	Documentação técnica	SIM
77	Guarapiranga (SP)	Documentação técnica	NÃO
78	Herculano – Barragem B1 – Retiro do Sapecado (MG)	Documentação técnica	SIM
79	Ingá (RJ)	Documentação técnica	SIM
80	Inxu (MT)	Documentação jornalística	SIM
81	Itapebi (BA)	Documentação técnica	NÃO
82	Itaúba (RS)	Documentação técnica	NÃO
83	Itaúna (CE)	Documentação técnica	NÃO
84	Izabel (SP)	Documentação técnica	NÃO
85	Jaburu I (CE)	Documentação técnica	NÃO
86	Jacareí (SP)	Documentação jornalística	SIM
87	Jaguara (MG/SP)	Documentação técnica	NÃO

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
88	Jaó (GO)	Documentação técnica escassa	SIM
89	Jati (CE)	Documentação jornalística	SIM
90	Joana (PI)	Documentação técnica escassa	NÃO
91	João Penido (MG)	Documentação técnica escassa	NÃO
92	Joasal (MG)	Documentação técnica escassa	NÃO
93	Jucazinho (PE)	Documentação técnica	NÃO
94	Jucu (ES)	Documentação técnica escassa	NÃO
95	Juturnaíba (RJ)	Documentação técnica escassa	SIM
96	Labourier Coogal (AP)	Documentação técnica escassa	NÃO
97	Lages (MG)	Documentação técnica escassa	SIM
98	Lavras (SP)	Documentação técnica escassa	NÃO
99	Lençóis (SP)	Documentação técnica escassa	SIM
100	Lima Campos (CE)	Documentação técnica escassa	SIM
101	Limoeiro - Armando de Salles Oliveira (SP)	Documentação técnica	SIM
102	Macabu (RJ)	Documentação técnica	SIM
103	Machadinho d'Oeste (RO)	Documentação técnica escassa	SIM
104	Marimbondinho (SP/MG)	Documentação técnica escassa	NÃO
105	Marimbondo (MG)	Documentação técnica	NÃO
106	Melo Viana (MG)	Documentação jornalística	SIM
107	Mina do Engenho	Documentação jornalística	NÃO
108	Mina do Córrego do Feijão - B1 (MG)	Documentação técnica	SIM

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
109	Mirai – Mineração Pombas (MG)	Documentação técnica	SIM
110	Moxotó (Apolônio Sales)	Documentação técnica	NÃO
111	Mulungu (PE)	Documentação técnica escassa	SIM
112	Namorados (PB)	Documentação jornalística	SIM
113	Nilo Peçanha (Casa de Força) (RJ)	Documentação técnica	NÃO
114	Nilo Peçanha (Túnel de adução) (RJ)	Documentação técnica escassa	NÃO
115	Nossa Senhora do Livramento (MT)	Documentação técnica escassa	SIM
116	Nova Sinceridade (MG) – Benjamim Mário Batista	Documentação jornalística	NÃO
117	Orós (Barragem)(CE)	Documentação técnica	SIM
118	Orós (vertedouro) (CE)	Documentação técnica	NÃO
119	Pacajús (CE)	Documentação técnica	NÃO
120	Palmácia (CE)	Documentação técnica escassa	SIM
121	Pampulha (MG)	Documentação técnica	SIM
122	Paranapanema (SP)	Documentação técnica	NÃO
123	Paranoá (DF)	Documentação técnica	NÃO
124	Pari (SP)	Documentação técnica escassa	SIM
125	Passo do Meio (RS)	Documentação técnica	NÃO
126	Pedra Furada (PE)	Documentação técnica escassa	SIM
127	Peixoto (Mascarenhas de Moraes) (SP)	Documentação técnica	NÃO
128	Peti (MG)	Documentação técnica	NÃO
129	Piau (MG)	Documentação técnica	NÃO

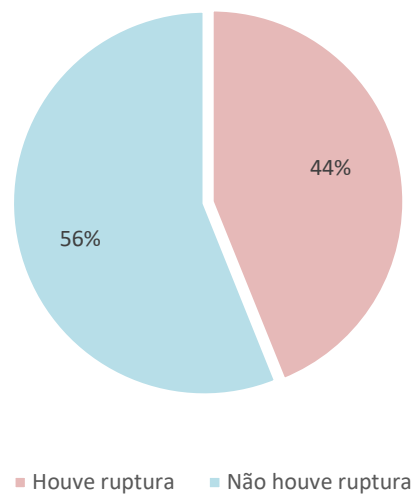
Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
130	Piaus (PI)	Documentação técnica	NÃO
131	Pico São Luiz (MG)	Documentação técnica	SIM
132	Piranhas (Engenheiro Ávidos) (PB)	Documentação técnica	SIM
133	Pontalina (GO)	Documentação jornalística	SIM
134	Poquim (MG)	Documentação técnica	SIM
135	Porto Colômbia (SP/MG)	Documentação técnica	NÃO
136	Poxoréu (MT)	Documentação técnica escassa	NÃO
137	Quati (BA)	Documentação jornalística	SIM
138	Rasgão (Barragem)(SP)	Documentação técnica	NÃO
139	Rasgão (TA/CF) (SP)	Documentação técnica escassa	NÃO
140	Riacho do Sangue (Boqueirão)(CE)	Documentação técnica	NÃO
141	Rio de Pedras (MG)	Documentação técnica	NÃO
142	Rio Largo (AL)	Documentação técnica escassa	NÃO
143	Rio Verde (MG)	Documentação jornalística	SIM
144	Rosário (CE)	Documentação técnica	NÃO
145	Rudolf Heidrich	Documentação jornalística	SIM
146	Sá Carvalho (MG)	Documentação técnica	NÃO
147	Salto Osório (PR)	Documentação técnica escassa	NÃO
148	Salto Santiago (PR)	Documentação técnica	NÃO
149	Santa Branca (SP)	Documentação técnica	NÃO
150	Santa Cruz (Efeito cascata) (RN)	Documentação técnica	SIM

Nº	Barragem/Estado de localização	Tipo de documentação disponível	Houve ruptura? (total ou parcial)
151	Santa Helena (BA)	Documentação técnica	SIM
152	Santa Helena (RJ)	Documentação técnica	NÃO
153	Santarém (MG) (Efeito cascata)	Documentação técnica	NÃO
154	Santa Rosa II (RJ)	Documentação técnica escassa	NÃO
155	Santo Antônio do Jari (AP)	Documentação técnica escassa	NÃO
156	São Domingos (TO)	Documentação técnica	NÃO
157	São João (PR)	Documentação técnica escassa	NÃO
158	São José do Rio Claro (MT) (Efeito cascata)	Documentação jornalística	SIM
159	São Tadeu I (MT)	Documentação técnica escassa	SIM
160	Sinop (MT)	Documentação jornalística	SIM
161	Tamboril (GO)	Documentação técnica escassa	SIM
162	Trairi (RN)	Documentação técnica	NÃO
163	Três Marias (MG)	Documentação técnica	NÃO
164	Vigário (RJ)	Documentação técnica	NÃO

Fonte: Adaptado de Guidicini; Sandroni; Mello, 2021b.

O período analisado tem seu primeiro evento de acidente/incidente registrado em 1912 e seu último em 2020, durante todo esse período dos 164 casos registrados em 72 deles houve a ruptura total ou parcial da barragem, representando 44% dos casos, assim como apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Porcentagem de barragens que apresentaram ruptura total ou parcial.



Fonte: Própria autora.

5.2. Determinação das causas de cada caso de ruptura apresentado

A partir da descrição dos relatos, foram definidas as causas de cada um dos eventos de ruptura, e então determinadas quais delas eram de natureza geotécnica. Ressalta-se que para esse estudo foram consideradas geotécnicas as seguintes causas: movimentos de massa, que abrangem instabilidade estática e sísmica, bem como os processos de liquefação estática ou dinâmica, falhas na fundação, piping e outras causas que tenham como origem problemas relacionados a qualidade dos solos.

O Quadro 2 apresenta as barragens que apresentaram ruptura geotécnica, e específica qual sua categoria. Salienta-se que informações sobre a localização de cada barragem, suas principais características, datas de construção e data do evento de ruptura serão exibidas no Anexo I desse trabalho, assim como a breve descrição do acidente, causa detalhada e consequências principais de cada evento irão constar no Anexo II.

Quadro 2 – Barragens que apresentaram ruptura geotécnica e suas causas.

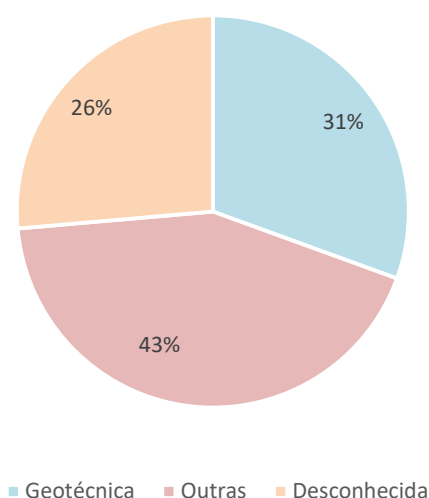
Nº	Barragem	Causa Geotécnica/Geológica?	Enquadramento da causa
1	Açu	SIM	Movimentos de massa
2	Algodões I	SIM	Movimentos de massa
3	Apertadinho	SIM	Piping
4	Barreiros	SIM	Piping
5	Bocaiúva	SIM	Piping
6	Cacimba Nova	SIM	Piping
7	Camará	SIM	Piping
8	Campos Novos (barragem)	SIM	Movimentos de massa
9	Cataguazes	SIM	Piping
10	Cocorobó	SIM	Movimentos de massa
11	Duas Bocas	SIM	Piping
12	Ema	SIM	Piping
13	Fundão	SIM	Liquefação
14	Granada	SIM	Falhas na fundação
15	Guaíba Country Club	SIM	Piping
16	Inxu	SIM	Piping
17	Mina do Córrego do Feijão - B1 (MG)	SIM	Liquefação
18	Pampulha	SIM	Piping
19	Pedra Furada	SIM	Piping

Nº	Barragem	Causa Geotécnica/Geológica?	Enquadramento da causa
20	Pico São Luiz	SIM	Liquefação
21	Piranhas	SIM	Outros
22	Santa Helena (BA)	SIM	Movimentos de massa

Fonte: Própria autora.

Dos 72 casos em que houve eventos de ruptura, apenas 22 foram correspondentes a causas geotécnicas, correspondendo a 31% dos casos, essa fração é representada na Figura 17. Ademais, 19 casos não possuíam informações sobre a causa de ruptura da barragem, e os outros 31 categorizados como “outras” estavam relacionadas a causas hidráulicas (principalmente galgamento) ou então a falhas de projeto.

Figura 17 – Porcentagem de eventos de ruptura com causas geotécnicas.

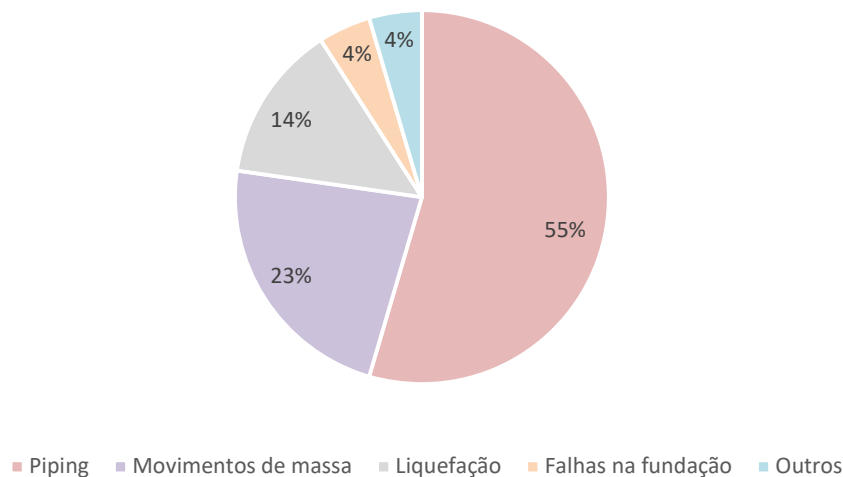


Fonte: Própria autora.

Dentre as causas geotécnicas identificadas, o piping (erosão interna) representou a maior fração delas, seguido por movimentos de massa e liquefação, em minoria estavam as falhas na fundação e outras causas relacionadas ao solo. Ressalta-se que todas as barragens que apresentaram liquefação eram barragens de rejeito de mineração. A Figura 18 apresenta as porcentagens correspondentes a

cada tipo de causa de ruptura geotécnica identificada.

Figura 18 – Proporção das principais causas de ruptura geotécnicas apresentadas.



Fonte: Própria autora.

Para uma melhor elucidação de cada uma das causas geológicas identificadas, foi realizado uma breve síntese de acidentes envolvendo-as.

5.3. Breve síntese de um acidente envolvendo piping

Neste item será abordado o acidente envolvendo a barragem de Barreiros, parte de um conjunto de obras integradas ao Sistema de Transposição do Rio São Francisco, localizada próximo a cidade de Sertânia – PE (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

É uma barragem mista, possuindo estruturas de concreto como um vertedouro e um descarregador de fundo, ladeados por barragens de terra de seção homogênea e altura máxima de 14 metros (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Dois dias após o enchimento do reservatório da barragem (dia 03/03/2017), houve o registro de um vazamento na barragem, no qual foi constatada a comunicação direta da água do reservatório com o estrato rochoso muito fraturado da fundação do maciço de terra da margem direita da barragem (GUIDICINI;

SANDRONI; MELLO, 2021b).

O fluxo de água atravessou outras camadas até provocar a saída de água pelo teto da galeria, acarretando o carreamento de partículas do maciço de terra, assentado diretamente sobre o maciço rochoso, o que ocasionou o processo de piping, com arraste das partículas sólidas até o rompimento desse trecho (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

A principal causa apontada foi o piping ocorrido na junção entre as estruturas de concreto com a barragem de terra, local que apresenta vulnerabilidade quando analisadas barragens mistas. Como consequência houve o esvaziamento rápido do reservatório, além dos danos a estrutura não foram reportadas outras consequências (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

5.4. Breve síntese de um acidente envolvendo movimentos de massa

Neste item serão abordados os acidentes ocorridos na barragem de Açú, também denominada Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, localizada no rio Piranhas, a aproximadamente 6 Km a montante da cidade de Açú-RN, tendo como finalidade suprir a necessidade de água do Projeto de irrigação do Baixo Açú. A barragem é constituída de terra, com 2550 metros de extensão. Sua construção iniciou-se em 1979 e finalizou-se em 1983 (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Durante seu período de construção ocorreram dois episódios de ruptura. Em 1980 houve dois deslizamentos, separados por 10 metros, quase simultâneos em um alteamento antecipado do aterro de solo fino, que tinha como finalidade atuar como ensecadeira para conter uma eventual enchente. As rupturas abrangeram cerca de 150 metros de extensão cada, além de possuir 14 metros de altura e talude com inclinação 1:5, além de terem ocorrido pouco após a construção do alteamento (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Em 15 de dezembro de 1981, houve a ruptura do talude de montante da barragem, no momento a construção do aterro da barragem central estava a 35 metros de altura, restando apenas 5 metros para atingir o nível final de projeto. Esse

acidente apresentou danos apenas a obra, porém representou sua perda quase total (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Segundo nota do DNOCS de março de 1982, no relatório final sobre as causas do acidente, a causa atribuída foi o escorregamento às elevadas pressões neutras desenvolvidas no material argiloso preto que constituía o núcleo e parte inferior da berma. Após o acidente foram investigadas, as características geotécnicas dos materiais constituintes do aterro e da fundação (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

5.5. Breve síntese de um acidente envolvendo liquefação

Neste item, será feita uma síntese do acidente ocorrido na barragem de Fundão. A barragem tem finalidade de contenção de rejeitos, é de propriedade da empresa Samarco Mineração, e está situada na cidade de Mariana – MG. A barragem tem um alteamento do tipo a montante e seu dique de partida, assim como os de alteamento foram construídos com solos selecionados compactados (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Na tarde de 05/11/2015 houve a liberação de aproximadamente $34 \times 106\text{m}^3$ de rejeitos do reservatório de fundão A ruptura ocorreu em quatro etapas: primeiro houve a descarga de água suja no tapete drenante e um trincamento na base do platô, em seguida o platô se move para a jusante, depois a grande deformação no talude ocorre da base para cima, por último acontece as trincas na crista e acima dela (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

De acordo com o Relatório de Morgenstern e outros (2016), a causa final de ruptura ocorreu devido a deformação por extrusão do rejeito fino, que havia sido espremido para a jusante. A deformação da camada de lama foi transmitida para cima, ocasionando a redução da tensão horizontal na camada sobrejacente de areia, induzindo a sua liquefação (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Como consequência do rompimento da barragem de Fundão houve um efeito cascata nas barragens localizadas a sua jusante, tais como a barragem Germano,

que apesar de erodir não rompeu e a barragem de Santarém, que foi galgada. Os rejeitos galgados atingiram o povoado de Bento Rodrigues ocasionando quatro mortes, ademais outras 13 mortes foram registradas, relativas a funcionários da empresa que trabalhavam no momento da ruptura (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

5.6. Breve síntese de um acidente envolvendo falhas na fundação

Neste item, será descrito o acidente que levou a ruptura da barragem de Granada. A PCH granada é situada no município de Abre Campos – MG. Ela possui uma barragem de terra de seção homogênea que fecha o vale do rio, constituída por um vertedouro em sua ombreira direita e uma torre de tomada d'água na margem esquerda da barragem (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

No mês de janeiro de 2003 vazões acima das calculadas para o maciço provocaram o deslizamento no local onde se apoiaria a ombreira direita da barragem de terra em fase inicial. Durante este sinistro, as águas escoadas pelo rio Matipó galgaram a ensecadeira e a ombreira direita, desestabilizando-a e o maciço de apoio (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Segundo Almeida (2006), a análise do impacto induzido por fatores geológicos nos custos globais indicou que os problemas detectados estavam relacionados a condições imprevistas nas fundações da barragem. O acesso direto às fundações locais após a fase de desvio do rio constatou que as condições reais eram divergentes daquelas previstas nos estudos de Projeto Básico, variando sobre o posicionamento do topo rochoso, além da incidência de feições geológicas desfavoráveis não identificadas anteriormente (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Estimou-se em 20.000 m³ o volume de material removido e transportado pela força das águas após a ruptura, havendo a necessidade da remoção dos detritos e do preparo de uma ampla área adicional, inexistente no projeto original, além da implementação de um projeto específico para a estabilização do talude da ombreira direita. Ademais, houve um acréscimo de 138% do volume final de escavação em

rocha e de 63% do volume de material compactado (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

5.7. Breve síntese de um acidente envolvendo outras causas geotécnicas

O exemplo que será explanado nesse item será o da barragem de Piranhas também conhecida como Barragem Engenheiro Ávidos, localizada no município de Cajazeiras – PB. A barragem é do tipo zonada, constituída por terra e enrocamento, além de possuir uma cortina de concreto como elemento de vedação, além disso possui 44m de altura máxima e 340 m de extensão (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

A barragem apresentou recalques e movimentos que causaram abertura de algumas juntas entre placas de concreto após sua abertura. Em 1963 após uma cheia essas anomalias identificadas se acentuaram. Foi constatado a partir de estudos o abatimento do enrocamento e sua ruptura na parte de jusante, assim como o abatimento do maciço de terra a montante da cortina de concreto (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

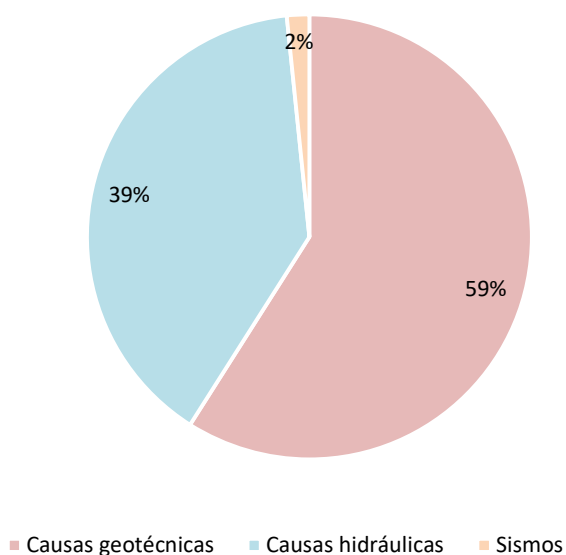
A causa apontada para o acidente foi que a dinâmica comportamental dos materiais, solo e enrocamento, perante a atuação de esforços e por longo tempo de duração, era desconhecida, por ser um tipo de obra pioneira no Nordeste. As deformações identificadas no corpo de enrocamento e no solo, respectivamente a jusante e a montante da cortina, foram refletidas na integridade das placas de concreto de revestimento dos taludes, com conseqüente abertura de algumas juntas (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Os distúrbios foram acentuados por quase 30 anos arriscando a segurança da obra e dando razões para os estudos e análises que resultaram na proposição de uma grande reforma. Como conseqüência foi recomendada a não recuperação do vertedouro existente e a implantação de um novo vertedouro, fora do corpo da barragem (GUIDICINI; SANDRONI MELLO, 2021b).

5.8. Comparação com os dados de outro estudo

O artigo “Analysis of dam failures – A database approach” faz um levantamento dos principais tipos de causas de ruptura de barragens de terra, que representam 66% dos casos identificados de ruptura por eles analisados. O artigo leva em consideração o banco de dados da ICOLD, que apresenta mais de 900 casos de acidentes e incidentes em barragens, no todo mundo, com exclusão da China. Na Figura 19 é apresentada a porcentagem dos tipos de causas de ruptura mais frequentes, englobando 61 barragens de terra.

Figura 19 – Percentual do tipo de causa de ruptura mais frequente em barragens de terra.



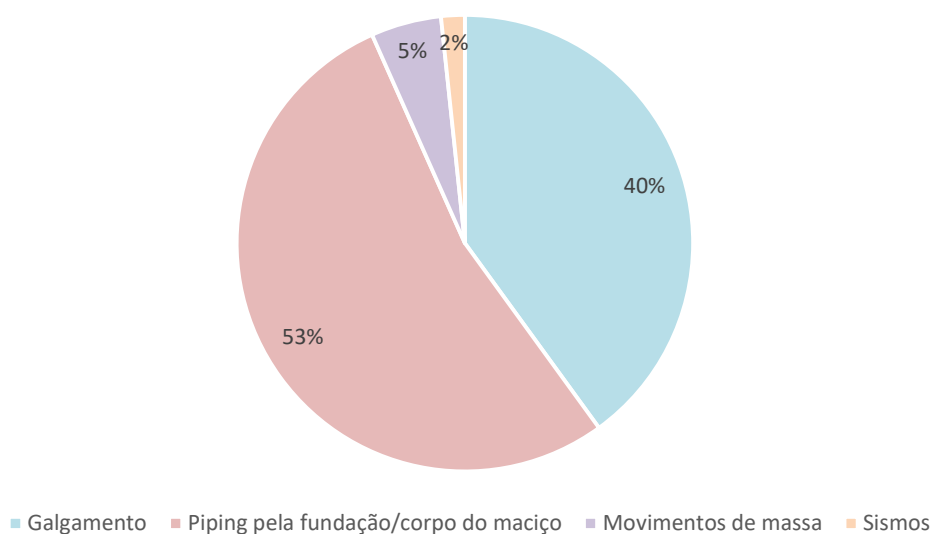
Fonte: Adaptado de L. M. Zhang & Y. Xu, 2007.

Nota-se que o levantamento realizado por L. M. Zhang & Y. Xu apontou que dentre os 61 casos analisados, 59% deles estavam relacionados a causas geotécnicas. Nos 72 casos de ruptura analisados neste trabalho, 31% deles tinham como causa fatores geotécnicos. Essa divergência percentual, deve-se ao fato deste trabalho considerar as causas desconhecidas no percentual final, bem como englobar barragens de concreto e de rejeitos em sua análise.

O artigo de L. M. Zhang & Y. Xu (2007) apresentou o piping (tanto pela fundação, quanto pelo maciço) como a principal causa geotécnica que ocasionou a

ruptura das barragens analisadas, representando 53% do total. O resultado obtido por eles foi similar ao obtido nas análises de ruptura realizados neste trabalho para barragens brasileiras, no qual o piping figurou como principal causa geotécnica representando 55% do total. Na Figura 20 são apresentados todos os percentuais das causas geotécnicas que ocasionaram a ruptura de barragens de terra.

Figura 20 – Percentual das causas geotécnicas que ocasionaram ruptura das barragens de terra.



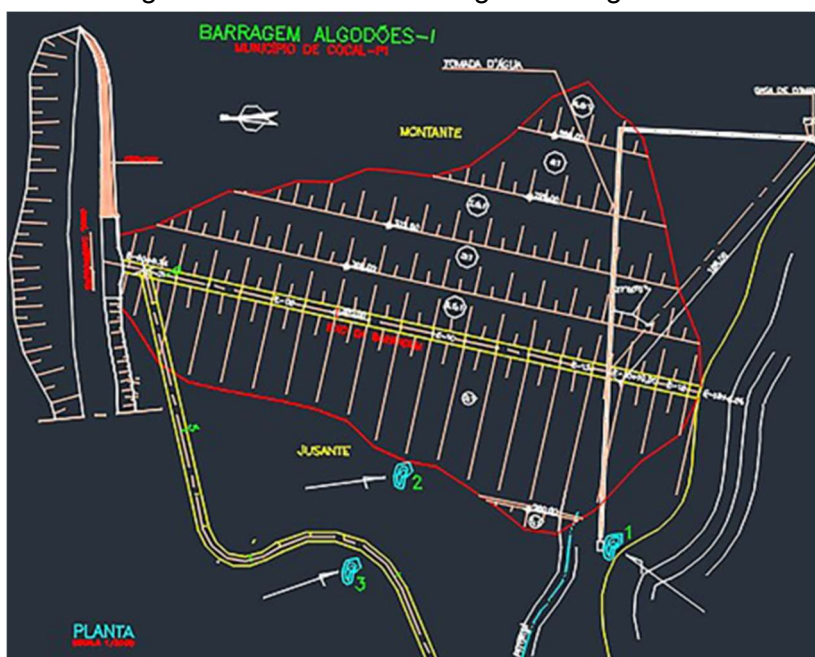
Fonte: Adaptado de L. M. Zhang & Y. Xu, 2007.

5.9. Estudo de caso

O estudo de caso desse trabalho contemplou a ruptura ocorrida na Barragem de Algodões I. O açude de Algodões I está situado no Rio Pianji a aproximadamente 16 km a leste do município de Cocal – PI. Sua barragem tem como finalidade a regularização da vazão do rio e o favorecimento do aproveitamento agrícola das terras a jusante do açude (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

A barragem foi concebida para ser constituída por terra homogênea e fechar o boqueirão, apresentando uma extensão de 378 metros e sendo articulada por um vertedouro localizado em sua ombreira direita. A Figura 21 apresenta a planta da barragem (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Figura 21 – Planta da barragem de Algodões I



Fonte: Guidicini; Sandroni; Mello, 2021b.

Em uma inspeção realizada em agosto de 2008, antes da ruptura alguns problemas foram identificados no sítio do local sendo eles: um grande deslizamento na ombreira direita ocasionado por escavações inadequada em massas de tálus-colúvio, o estrangulamento até a obstrução do canal de restituição das águas a jusante do sangradouro, surgências no pé da barragem, descolamento do aterro da barragem sob a laje de concreto do muro de contrafortes, deslizamento e surgências d'água no pé da ombreira esquerda e a inoperância da comporta da tomada d'água e do controle da válvula dispersora (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

As anomalias identificadas não foram solucionadas ao longo do tempo, até o surgimento de uma situação crítica ocorrida no primeiro enchimento do reservatório, após chuvas intensas em 2009 (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Em 2009 durante a estação chuvosa o nível do reservatório subiu rapidamente. Em certo momento as águas passaram a ultrapassar a soleira do vertedouro, canal esse que estava obstruído devido a escorregamentos. O fluxo contínuo de chuvas ocasionou o escoamento da água pelo vão existente entre o aterro e o muro, acarretando na erosão do solo que descalçou a base do muro

(GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

O muro de concreto submetido as forças externas atuantes, representadas pelas águas no canal de descarga estrangulado e as forças internas atuantes entre o aterro e muro da barragem não resistiu e cedeu. Assim, como apresentado na Figura 22, a primeira placa de concreto foi destacada e tombada devido à falta de apoio no dia 12 de maio de 2009 (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Figura 22 – Queda da primeira placa de concreto



Fonte: Guidicini; Sandroni; Mello, 2021b.

No dia 13 de maio de 2009 outras duas placas de concreto se desalinham, no dia 27 de maio as demais placas que constituíam o muro de contrafortes ruíram, devido a instabilização da estrutura do vertedouro, que tombou para jusante. Ao fim do processo todas as estruturas de concreto sumiram da paisagem, conforme indicado na Figura 23 (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Figura 23 – Queda de toda estrutura de concreto



Fonte: Guidicini; Sandroni; Mello, 2021b.

As causas apontadas para a ruptura da barragem foi um somatório de erros e omissões. O principal erro de projeto foi o encontro entre a barragem e o muro de contrafortes em talude negativo, não havendo possibilidade de compactação adequada. Os recalques após a construção causaram descolamento entre o solo e o concreto. Após o enchimento do reservatório, houve a passagem de água entre o vão entre o aterro e o muro de concreto, provocando o processo de erosão e descalçamento do muro de concreto (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

Outro erro de projeto foi o extenso e alto corte da ombreira direita, visto que a escavação foi realizada com alta declividade e sem proteção ou estabilização do talude escavado, tendo havido diversos deslizamentos no talude desde sua construção (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

O relatório técnico emitido pelo CREA – PI aponta o rompimento da barragem como consequência da falta de manutenção da obra, bem como da deficiência de estudos geológicos e geotécnicos no projeto (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b). Pode-se constatar a partir desse laudo que se houvesse a identificação da fragilidade das condições geológicas da massa de tálus ainda na fase de projetos,

teriam sido evitados os deslizamentos de material que obstruíram o canal de restituição do sangradouro, e levaram a ruptura da barragem (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b). Em adição, se mesmo após a execução e não identificação das fragilidades geológicas as anomalias identificadas na inspeção de 2008 tivessem sido propriamente tratadas, a ruptura também poderia ter sido evitada.

Como consequência da ruptura, houve a propagação da onda de lama ao longo do vale do Rio Piranji, que atingiu o núcleo urbano de Cocal da Estação, causando sua inundação e desalojando cerca de 2500 moradores. Sabe-se que houve vítimas fatais, porém seu número não foi divulgado (GUIDICINI; SANDRONI; MELLO, 2021b).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise de 164 relatos de acidentes e incidentes no Brasil foi possível identificar que 72 deles apresentaram ruptura, sendo que dentre esses, 31% apresentaram causas geotécnicas. A causa geotécnica mais recorrente identificada nesse estudo foi o piping.

Quando comparado ao cenário internacional pôde-se perceber uma consonância em relação ao resultado observado no Brasil, visto que novamente o piping figurou como principal causa geotécnica nas rupturas analisadas.

Por meio da análise do estudo de caso, notou-se que é importante investigar a fragilidade das condições geológicas do solo, visto que essa ação pode prevenir futuros acidentes.

Ao observar os relatos dos casos de acidentes e incidentes, foi verificado que em muitos casos a ruptura é decorrente da negligência das obras por meio de empreendedores, que por muitas vezes não realizam as manutenções necessárias para garantir a estrutura dos barramentos.

Por fim, os relatos analisados partiram de um livro que compilou todos os eventos registrados no Brasil até o ano de 2020. Nota-se que a quantidade de relatos é pequena considerando que o acidente mais antigo registrado data do ano de 1912. Porém, essa quantidade não representa de fato todos os sinistros ocorridos envolvendo barragens, visto que muitas barragens no Brasil ainda não são registradas e algumas encontram-se longe dos centros urbanos, em condições nas quais os casos de acidentes alcançariam os veículos de comunicação apenas se afetassem as condições de vida de populações ribeirinhas que morassem nas proximidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA. Relatório de segurança de barragens 2021. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2022. 68 p.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Brasília, DF. Setembro de 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20072010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em 19 de agosto de 2022.

BRASIL. – Resolução nº 144, de 10 de julho de 2012 – MMA/CNRH – Ministério do Meio Ambiente / Conselho Nacional de Recursos Hídricos – Brasília, 2012. 16p.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos Construtivos de Barragens de Rejeitos de Mineração – Uma Revisão. **Holos**, [S.L.], v. 8, p. 77-85, 9 maio 2017. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.5367>.

COSTA, W. D. Geologia de Barragens. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

ENGECORPS. R06 - ESTUDOS DE RUPTURA DE BARRAGENS. 4. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2012. 113 p.

FELL, FRY 2007 piping: FELL, R.; FRY, J.J. The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations. In: Internal Erosion of Dams and their Foundations. London. 2007. 1-24 p

GUIDICINI, G.; SANDRONI, S.; MELLO, F. Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021a. 208 p.

GUIDICINI, G.; SANDRONI, S.; MELLO, F. Lições aprendidas com acidentes e incidentes em barragem e obras anexas no Brasil - Relatos. Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2021b. 792 p.

ISGSR2007 FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEOTECHNICAL SAFETY & RISK, 2007, Shanghai. Analysis of earth dam failures - A database approach. Shanghai: Tongji University, China, 2007. 10 p.

MELO, L. P. R. Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeito: Caso hipotético da Barragem Tico-tico. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2013.

PIMENTA FILHO, M. A. Análise da Erosão Interna de Solos em Barragens com Base na Distribuição de Vazios. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROCHA, F. F. Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Miraf, Minas Gerais, Brasil. 2015. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, A. A. C. L.; ELEUTÉRIO, J. C. Modelagem de Brechas de Ruptura em Barragens de Terra. ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 2., 2020, Online: Abphidro, 2020. 4 p

SOUZA, T. C. A. Metodologia de Avaliação de Liquefação em Barragens de Rejeito: Uma Abordagem Probabilística. 2018. 269 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

7. ANEXOS

As informações sobre a localização de cada barragem, suas principais características, datas de construção e data do evento de ruptura serão exibidas no Anexo I desse trabalho, assim como a breve descrição do acidente, causa detalhada e consequências principais de cada evento irão constar no Anexo II.

7.1. Anexo I

Quadro 3 – Principais informações sobre os barramentos que sofreram ruptura total ou parcial.

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
1	Açu	Rio Piranhas, 6 km de Açu - RN	Barragem de terra, com 2.550m de extensão.	De 1979 a 1983	Primeiro acidente: 1980 Segundo acidente: 15/12/1981
2	Água Vermelha	Rio Grande, entre SP e MG	Hidroelétrica, com vertedouro controlado por oito comportas tipo segmento, com dissipação de energia por salto de esqui e muro de transição envolto por maciço de enrocamento com núcleo de terra	Entre 1973 e 1978	Janeiro de 1980
3	Algodões I	Rio Piranji, 16 km a leste de Cocal -PI	Barragem de terra homogênea, que fecha o boqueirão com 378 m de extensão e é articulada com o vertedouro	De 1995 a 2001	Entre 12 e 27/05/2009
4	Alto Grande (Serra Grande)	Rio Serra Branca, 16 km de Araci - BA	Barragem de terra, com 7 m de altura máxima e 300m de extensão de crista	Não disponível	04/01/2016
5	Analândia	Área de mineração na periferia de Analândia - SP	Cava de acumulação de areia delimitada por um barramento, constituído por estêreis do processo de lavagem da mineração, com volume de água 3,5 hectares.	Não disponível	18/01/2010

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
6	Apertadinho	Região à montante do rio Comemoração - RO	Barragem principal em terra zonada, com 450 m de extensão e 43 metros de altura máxima.	De 02/2006 a 12/2007	09/01/2018
7	Baixo Iguaçu	Rio Iguaçu - PR, a 200 km de sua foz	Barramento retilíneo, com 1080m de extensão e estruturas de concreto na margem esquerda, Barragem de terra e enrocamento na margem e ombreira do lado direito.	de 07/2013 a 05/2019	08/06/2014
8	Balneário Paraguaçu	Rio Paraguaçu, periferia de Paraguaçu Paulista - SP	Barragem de terra, com estreito vertedouro na ombreira direita	Início da década de 1960	06/01/2007
9	Bandeira de Mello	Rio Paraguaçu, Entre Itaetê e Boa Vista do Tupim - BA	Barragem com 863 m de extensão e 19 m de altura máxima	Finalizada em 2006	Fevereiro de 2005
10	Barreiros	Sistema de transposição do Rio São Francisco, a 12 km de Sertânia - PE	Barramento misto, vertedouro e descarregador de fundo de concreto, ladeados por barragens de terra de seção homogênea e altura máxima de 14 m	Finalizada em janeiro de 2017	03/03/2017
11	Bocaiúva	Rio Cravari, Brasnorte - MT	Barragem em solo compactado, vertedouro de soleira livre em concreto ciclópico.	Finalizada no início de 2010	18/01/2010

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
12	Cachoeira Caldeirão	Rio Araguari, Ferreira Gomes - AP	UHE com 219 MW de potência instalada	Finalizada em agosto de 2016	07/05/2015
13	Cacimba Nova	Custódia - PE	Barragem de terra homogênea, com 14 m de altura	Desconhecida	16/02/2017
14	Cafundó	Fazinal do Soturno - RS	Barramento constituído de blocos de rocha basáltica, assentados com cimento, a extensão original da crista tinha 100 m	Iniciada em 1948 e finalizada em duas etapas: 1952 e 1958	19/01/2010
15	Camará	Rio Riachão, 60 km de Campina Grande -PB	Barragem constituída de concreto compactado rolado, altura máxima de cerca de 50 m e a extensão da crista é de 296 m	Iniciada em 2000 e finalizada em 2002	17/06/2004
16	Campos Novos (barragem)	Rio Canoas -SC	Barragem de enrocamento com face de concreto, com 590 m de extensão e 202 m de altura máxima	De outubro de 2001 a fevereiro de 2005	De 18 a 22/06/2006
17	Campos Novos (túneis de desvio)	Rio Canoas -SC	Barragem de enrocamento com face de concreto, com 590 m de extensão e 202 m de altura máxima	De outubro de 2001 a fevereiro de 2006	20/10/2005 e de 18 a 22/06/2022

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
18	Cataguazes	Cataguazes - MG	Duas barragens de terra com seção homogênea, com finalidade de contenção de resíduos	Entre 1989 e 1990	29/03/2003
19	Cocorobó	Euclides da Cunha - BA	Barragem de terra homogênea, com altura máxima 33,5 m e extensão de 643m	Entre 1951 e 1967	Dezembro de 1967
20	Corumbataí	Entre o rio Corumbataí e o Ribeirão claro Cerca de 6 km de Rio Claro - SP	Barragem de concreto em gravidade, com 55 m de extensão e complementada com maciço de terra	Novembro de 1895	16/11/1895 e 1970
21	Coxim	Coxim - MS	Barragem de concreto gravidade	Finalizada em 1964	Janeiro de 1982
22	Custódia	Custódia - PE	Canal de transposição do Projeto São Francisco	2017	09/07/2017
23	Derivação do Rio Cubatão Norte	Rio Cubatão Norte - SC	Barragem de derivação em concreto e dois diques laterais.	Desconhecida	09/02/1995

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
24	Duas Bocas	Cariacica - ES	Barragem de terra com 28 m de altura máxima e 170 m de extensão	1940	1940
25	Ema	Iracema - CE	Barragem de terra homogênea, com 15,20 m de altura máxima e 340 de extensão	De 1931 a 1932	1940
26	Emas Novas	Pirassununga - SP	Barragem de concreto, composta por tomada d'água, descarregador de fundo, vertedouro e muro de alvenaria na margem esquerda.	1922	19/02/1995
27	Espora	Aporé - GO	Barragem de terra em enrocamento, com altura máxima de 52 metros e extensão de 1630 metros	Finalizada em 2006	30/01/2008
28	Euclides da Cunha	São José do Rio Pardo -SP	Barragem de terra com eixo levemente arqueado, com altura máxima de 56 m e 312 m de extensão.	Entre 1956 e 1960	19/01/1977
29	Eugênio Gudín	Redenção - CE	Barragem de concreto em arco gravidade	De 1909 a 1924	1912

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
30	Fazenda Felícia	Entre Itaberaí e Itauçu - GO	Duas pequenas barragens de terra	Desconhecida, porém segundo dados jornalísticos recente	20/02/2016
31	Fernandinho	Cerca 40 km de Belo Horizonte - MG	Barragem de contenção com 40 m de altura, alteada a montante	Iniciada em 1984	16/05/1986
32	Fontes Velha (Chaminé)	Serra das Araras - RJ	A chaminé de equilíbrio é formada por tubos metálicos apoiados sobre a encosta, atrás da casa de válvulas da UHE.	De 1903 a 1908	04/03/2004
33	Foz do Chapecó	Entre Águas de Chapecó (SC) e Alpestre (RS)	Barragem com núcleo asfáltico em barragem de enrocamento, constituída por estrutura de concreto gravidade do vertedouro com 48 m de altura máxima e 598m de extensão	Desconhecida	28 e 29/06/2014
34	Fundão	Mariana - MG	Barragem de contenção de rejeitos, alteada a montante.	Gradual	05/11/2015
35	Granada	Abre Campos - MG	Barragem de terra, de seção homogênea	2002 a 2003	Janeiro de 2003

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
36	Guaíba Country Club	Eldorado do Sul - RS	A barragem em terra compactada, com 7 m de altura máxima	Finalizada em setembro de 1974	Março de 1977
37	Herculano	Itabirito - MG	Barragem de contenção de rejeitos, com 61 m de altura	Iniciada em 1996 e finalizada em 2010	10/09/2014
38	Ingá	Ilha da Madeira - RJ	Dique argiloso de contenção	1984	Fevereiro de 1996
39	Inxu	Entre de Campo Novo do Parecis - MT e Nova Maringá - MT	Canal de adução, ladeado por diques de terra, e a tomada d'água consiste em uma torre isolada na câmara de carga	2012 a 2015	05/06/2015
40	Jacareí	Jacareí - SP	Área de dragagem, definida como barragem devido a existência de um desnível entre a área de dragagem e o nível do rio.	Desconhecida	06/02/2016
41	Jaó	Goiânia - GO	Barragem de concreto gravidade, com a altura máxima estimada de 10 m a 12 m e extensão de aproximadamente 120 m a 150 m de extensão	Entre 1934 e 1936	Abril de 1945

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
42	Jati	Jati - CE	Dique de terra de seção zonada, com 56 m de altura máxima e 1900 m de extensão.	Inaugurada em agosto de 2020	21/08/2020
43	Juturnaíba	Araruama - RJ e Silva Jardim -RJ	Barragem constituída por maciços de terra, com estruturas de concreto em posição central	Entre 1982 e 1984	Fevereiro de 2015
44	Lages	Coromandel - MG	Barragem, com altura máxima de 2,50 m e extensão de crista de 50 m	Finalizada em 1942	Fevereiro de 1992
45	Lençóis	Macatuba - SP	Barragem de terra	Finalizada em 1917	Março de 1962
46	Lima Campos	Região centro-sul do Estado do Ceará	A barragem com cerca de 25 m de altura é constituída por um maciço de terra com uma cortina vertical de concreto armado	1932	Ao longo do tempo
47	Limoeiro	Rio Pardo - SP	Barragem constituída por um conjunto de estruturas de concreto, ocupando posição central, tendo em ambos os lados barragens de terra, de seção homogênea, altura máxima de 35 m e 660 m de extensão.	Entre 1956 e 1958	19/01/1977

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
48	Macabu	Trajano de Morais - RJ	Barragem de concreto, em arco gravidade, com 38 m de altura máxima e 285 m de comprimento	Entre 1950 e 1960	04/02/1961
49	Machadinho D'Oeste	Machadinho D'Oeste - RO	Passagens recortando o leito natural do rio, feitas rudimentarmente, compostos de troncos ocos, recobertos por material argilo-arenoso com pouca ou nenhuma compactação.	Desconhecida	29/03/2019
50	Melo Viana	Raul Soares - MG	Barragem de concreto	Finalizada em 1933	1979-1980
51	Mina do Córrego do Feijão - B1 (MG)	Brumadinho - MG	Barragem de rejeito com alteamento a montante	Gradual	25/01/2019
52	Miraí	Miraí - MG	Barragem de terra para contenção de rejeitos de mineração de bauxita	Início de operação em 1995	10/01/2007
53	Mulungu	Buíque - PE	Barramento é de terra, com 8 m de altura máxima	Desconhecida	1981

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
54	Nossa Senhora do Livramento	Nossa Senhora do Livramento - MT	Barragem com 15 m de altura, contendo 580.000 m ³ de rejeitos de minério de ouro, alteamento progressivo pelo método a jusante	Desconhecida	10/10/2009
55	Orós	Rio Jaguaribe - CE	Barragem de concreto ciclópico com formato semicircular, com 54 m de altura e 670 m de comprimento de crista	Outubro de 1958 a janeiro de 1962	26/03/1960
56	Palmácia	Palmácia - CE	Açudes na área	Desconhecida	01/04/2021
57	Pampulha	Pampulha - MG	Barragem de terra, homogênea, construída em duas etapas.	Iniciada em 1936 e completa em 1941	20/04/1954
58	Pari	Entre Cândido Mota - SP e Palmita - SP	UHE com barragem de concreto	Finalizada em 1937	1983
59	Pedra Furada	Joaquim Nabuco - PE e Água Preta - PE	Duas barragens de aterro que fecham o barramento nas ombreiras.	Finalizada em abril de 2012	05/11/2011

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
60	Pico São Luiz	Pico São Luiz - MG	Barragem de contenção, alteada em pontas de aterro	Gradual	Junho de 1985, e 02/10/1986
61	Piranhas	Cajazeiras -PB	Barragem zonada, de terra e enrocamento, com uma cortina de concreto, que possui um comprimento de crista de 340 m e altura máxima de 44 m	1932 a 1936	1963
62	Pontalina	Pontalina - GO	A barragem de terra possui de 7 a 8 m de altura e cerca de 150 m de extensão na crista	2012	04/04/2020
63	Poquim	Itambacuri - MG	Barragem a montante da UHE, em concreto ciclópico, com extensão de crista de aproximadamente 70 m e altura máxima de 6 a 7 m	1960	1979
64	Quati	Pedro Alexandre - BA	Barragem de terra, de pequenas dimensões, ladeada por aterros.	2000	11/07/2019
65	Rio Verde	Nova Lima - MG	Barragem de rejeitos	Desconhecida	22/06/2001

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
66	Rudolf Heidrich	Ribeirão das Pedras - SC	Barragem de represamento de pequena altura, formada por uma soleira livre vertente que encaminha as águas para um extenso canal de adução	Desconhecida	13/07/2017 e 23/02/2019
67	Santa Cruz	Santa Cruz - RN	A barragem consiste em uma estrutura em terra, de seção homogênea, com dreno de pé, cerca de 600 m de extensão e altura máxima de 14 m.	Entre 1957 e 1959	01/04/1954
68	Santa Helena (BA)	Camaçari - BA	Maçios homogêneos de terra com drenagem interna constituída por filtro chaminé e tapete drenante	Agosto de 1976 a dezembro de 1979	09/05/1985
69	São José do Rio Claro	São José do Rio Claro - MT	Não especificado detalhes sobre os barramentos	Desconhecida	04/02/2018
70	São Tadeu	Serra de São Vicente - MT	A barragem principal possui extensão de crista de 230 m e altura máxima de 30 m, com seção em aterro compactado.	Dezembro de 2006 a outubro de 2009	11/11/2009
71	Sinop	Entre Cláudia - MT e Itaúba - MT	Não especificado detalhes sobre o barramento	Março de 2014 a março de 2019	08/10/2015

Nº	Barragem	Localização	Principais características da barragem	Data de construção	Data do acidente
72	Tamboril	Entre e Palestina de Goiás - GO e Arenópolis - GO	A barragem tem altura de 8 m, construída com alvenaria de pedra, concreto ciclópico e concreto rolado	Finalizada em dezembro de 2014	10/03/2017

Fonte: Adaptado de Guidicini; Sandroni; Mello, 2021b.

7.2. Anexo II

Quadro 4 – Principais causas e consequências dos eventos de ruptura nas barragens listadas.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
1	Açu	Em 1980 ocorreram dois deslizamentos vizinhos e quase simultâneos, em um alteamento antecipado do aterro em solo fino; Em 15/10/1981 ocorreu a ruptura do talude de montante da barragem.	Escorregamento devido às elevadas pressões neutras, desenvolvidas no material argiloso preto que constituía o núcleo e a parte inferior da berma de montante.	Perda quase total da obra construída até o momento.
2	Água Vermelha	Em 1980 observou-se um processo de erosão do talude de jusante da margem esquerda, devido ao fluxo contínuo de descargas de água liberadas pelo vertedouro, em poucos dias a erosão provocou a ruptura parcial do talude na extensão de 130 m e removido blocos de rocha e material de transição.	Operação do vertedouro realizada de forma assimétrica, diferente do especificado nos manuais de operação gerando correntes de retorno que provocaram a erosão no pé do talude de jusante. A erosão progressiva foi atribuída a atuação conjunta de correntes de retorno e gradientes hidráulicos elevados	Ruptura parcial do talude de jusante.
3	Algodões I	Chuvvas intensas elevaram a lâmina d'água que ultrapassava a crista do vertedouro, então a água passou a escoar pelo vão existente entre o aterro e o muro do vertedouro, erodindo o solo e descalçando a base do muro. O muro de concreto não resistiu as forças atuantes sobre ele, e sua primeira placa de concreto caiu no dia 12/05/2009. Em 27/05/2009 o processo erosivo atingiu seu ápice, com a ruína das demais placas de concreto que formavam o contraforte, instabilizando a estrutura do vertedouro que tombou para jusante.	Falta de manutenção da barragem e deficiência nos estudos geológicos e geotécnicos do projeto.	Onda de lama projetada ao longo do Vale rio do Piranji, inundando um núcleo urbano de Cocal da estação e desabrigando moradores da área.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
4	Alto Grande (Serra Grande)	Em 04/01/2016 os elevados níveis de chuva acarretaram a elevação do nível do reservatório, em função da escassa capacidade de escoamento do vertedouro, levando ao rompimento parcial da barragem e comprometimento do sangradouro.	Galgamento, devido a incapacidade do sangradouro escoar a vazão efluente.	Rompimento parcial da barragem e do vertedouro, além da interrupção do trânsito na rodovia.
5	Analândia	Em 18/01/2010 o excesso de águas de chuva ocasionou a ruptura do barramento.	Excesso de águas da chuva e barramento em não conformidade com os requisitos de segurança recomendados pelas normas técnicas de mineração.	A onda de cheia gerada pela ruptura derrubou árvores e invadiu a rodovia, ocasionando uma cratera profunda. Além disso houve a interrupção de abastecimento de água na cidade vizinha.
6	Apertadinho	Alguns dias após o enchimento do reservatório observou-se a percolação de água com carreamento de sólidos e acomodação dos gabiões instalados na área de encontro com a parede esquerda da calha do vertedouro. No dia 09/01/2018 a barragem colapsou por piping, originada na calha citada.	Piping originado sob a estrutura de concreto do vertedouro.	Ruptura da barragem, inundação da casa de força, perda da mata ciliar no raio da ordem de centenas de metros do rio Comemoração.
7	Baixo Iguaçu	A ensecadeira de primeira etapa havia sido dimensionada para uma vazão de 27.250 m ³ /s, e estava finalizada em 2014. No dia 08/06/2014 devido às chuvas intensas a vazão atingiu 31.300 m ³ /s, galgando e destruindo grande parte da ensecadeira de primeira etapa.	Galgamento, devido às chuvas intensas.	Destruição de grande parte da ensecadeira, deposição de blocos de rochas no leito do rio, alterando as condições de escoamento e aumentando as velocidades.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
8	Balneário Paraguaçu	Em 04/01/2007 houve o transbordamento da barragem devido ao grande volume de chuvas. No dia 06/01/2007 houve o rompimento de uma das saídas emergenciais criadas para manter o nível da represa e evitar o galgamento da barragem.	Galgamento devido a incapacidade de escoamento do vertedouro das descargas afluentes.	Inundação de imóveis, vias públicas e rodovias.
9	Bandeira de Mello	O acidente ocorreu durante a fase construtiva, quando houve o galgamento de uma ensecadeira que abrangia a área destinada ao vertedouro.	Vazão superior à prevista para a fase de desvio, ocasionando galgamento.	Invasão da água nas áreas destinadas a construção do vertedouro e queda das ensecadeiras a montante e a jusante.
10	Barreiros	No dia 03/03/2017, dias após o enchimento do reservatório, registrou-se um vazamento na barragem, havendo comunicação direta da água do reservatório com o estrato rochoso muito fraturado da fundação do maciço de terra da barragem da margem direita. A água percolou por outras camadas, até sair por cima do teto da galeria. Esse fluxo de água causou o carreamento de partículas, desencadeando um piping, até a ruptura de um trecho da barragem.	Piping no encontro da estrutura de concreto, com a estrutura de terra, ponto de vulnerabilidade.	Esvaziamento rápido do reservatório e ruptura de um trecho da barragem.
11	Bocaiúva	Ruptura na área do circuito hidráulico, entre a tomada d'água e os condutos forçados.	Erosão interna, no encontro do aterro do dique de contorno da câmara de carga com a estrutura de concreto dos condutos forçados.	Ruptura na área do circuito hidráulico.
12	Cachoeira Caldeirão	Rompimento da ensecadeira de segunda etapa.	Razões divergentes, o proprietário alega ter aberto a ensecadeira para permitir a passagem das águas do rio e a ANEEL alega rompimento.	A cheia do rio atingiu partes da cidade causando interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
13	Cacimba Nova	Infiltrações devido a percolação de água pela fundação, o fluxo de água então causou o carreamento dos solos mais finos da fundação, dando origem ao piping pela fundação.	Piping pela fundação.	Não há informações.
14	Cafundó	A ruptura da estrutura ocorreu em um período de fortes chuvas, removendo um trecho da estrutura com 4 m de altura e 50 m de extensão, a linha de ruptura coincidiu com um plano de assentamento dos blocos rochosos.	Aumento do nível de água do reservatório acima do nível previsto, aumentando o empuxo atuante no paramento de montante, acarretando a ruptura da estrutura.	Inundação de áreas urbanas das cidades próximas ao barramento, desalojando moradores.
15	Camará	Em março de 2004 foi observada uma mancha de umidade no pé da estrutura na margem esquerda. Em maio, o carreamento de material através dos drenos de fundação causou um entupimento no sistema de despejo das águas, inundando a galeria de drenagem em sua parte baixa. Em 17 de junho de 2004 ocorreu o arrombamento parcial do corpo da barragem na ombreira esquerda, com formação de um arco residual. Em 28 de junho, o arco cedeu.	Com a subida do nível do reservatório, a pressão exercida pela água que percolava na fundação desencadeou um processo de erosão interna regressiva com o carreamento de boa parte do material alterado da “caixa de falha” e das fraturas interligadas, deixando as mesmas vazias e sem nenhuma coesão. O esvaziamento na rocha progrediu até alcançar uma situação limite de sustentação, quando começou a ocorrer o colapso dos blocos de rocha.	Esvaziamento rápido do reservatório, causando danos no vale próximo, ademais houve 6 mortes e 3500 desabrigados
16	Campos Novos (barragem)	Esvaziamento do reservatório entre os dias 18 e 22/06/2006, evidenciando rupturas na face de concreto.	Excessivos esforços de compressão nas direções vertical e transversal, resultaram no rompimento das lajes e deslocamento relativo com superposição.	Rompimento das juntas entre as lajes 16 e 17, além de demais trincas.
17	Campos Novos (túneis de desvio)	20/10/2005 houve um vazamento da ordem de 50 m³/s pelo túnel de desvio 2, tendo sido identificado um processo de ruptura em andamento. Mesmo com as medidas de contenção entre 19 e 20/06/2006 houve o rompimento.	Ruptura do elemento de concreto de segundo estágio, que servia de apoio para a comporta vagão.	Rebaixamento do reservatório, danos a estrutura de concreto e a seção do túnel 2, a estrutura de concreto a jusante das comportas e a própria seção do túnel foram intensamente erodidas.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
18	Cataguazes	Em 29/03/2003 uma das barragens rompeu parte de seu aterro.	Falhas ou ausência de manutenção e piping.	O efluente industrial lixívia, atingiu a calha do rio Paraíba do Sul, interrompendo o abastecimento de água a vários municípios de MG e RJ.
19	Cocorobó	Escorregamento de parte do talude de montante do aterro.	Elevada plasticidade das argilas de origem aluvionar usadas na construção do aterro, essas são altamente compressíveis.	Danos a estrutura da barragem.
20	Corumbataí	Em 15/01/1970 durante o período de chuvas intensas houve a ruptura das barragens da UHE Corumbataí.	Elevação do rio acima da cota habitual, detritos acumulados nos pilares do vertedouro e queda da ponte existente sob o reservatório.	Paralisação da geração de energia por cerca de 40 anos.
21	Coxim	Rompimento da barragem de concreto	Desconhecida	Paralisação na geração de energia elétrica.
22	Custódia	Em 09/07/2017 a evolução rápida de uma brecha inicial, acarretou a ruptura dos diques de ambos os lados.	Desconhecida	Danos a estrutura do canal.
23	Derivação do Rio Cubatão Norte	Rompimento da barragem de concreto após precipitação intensa.	Galgamento	Inundação de grande parte do curso inferior da bacia hidrográfica, havendo 3 mortes e milhares de pessoas desalojadas.
24	Duas Bocas	Vazamentos generalizados após o primeiro enchimento. Há referência de um acidente no maciço a montante, próximo a ombreira direita, com abertura no talude próximo a crista e escorregamento do talude de jusante.	Piping, causado pela danificação de uma manilha que atravessa o maciço.	Rebaixamento do nível do reservatório para níveis mais seguros. Parte da estrutura do vertedouro foi dinamitada.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
25	Ema	Um processo de entubamento evoluiu no talude de jusante, causando seu deslizamento e posterior ruptura da barragem.	Ausência de elemento drenante no maciço, agravado por compactação ineficiente, ocasionando o piping (entubamento).	Além dos danos a estrutura, demais danos são desconhecidos.
26	Emas Novas	O acidente ocorreu no muro de encontro com a margem esquerda, as águas o arrastaram, além de parte da margem esquerda	Acúmulo de capim, obstruindo os vãos do vertedouro, ocasionando sobrecarga hidráulica.	Não houve danos a população à jusante.
27	Espora	Houve a ruptura de um trecho da barragem de 50 a 60 m de extensão, do lado direito do vertedouro, por onde houve o esvaziamento do reservatório.	Há três hipóteses: galgamento, ruptura de um talude submerso e piping. Porém a causa oficial é desconhecida.	Inundação de e isolamento de cidades e comunidades, além da destruição de uma ponte.
28	Euclides da Cunha	Intensas chuvas ocasionaram o galgamento da barragem, que levou a formação de uma brecha e posterior ruptura.	Galgamento da barragem.	Ocasionou o efeito em cascata no reservatório de usinas a jusante
29	Eugênio Gudín	Durante sua construção, houve um período com chuvas intensas na região do Rio Pacoti, havendo o transbordamento das águas pela ensacadeira e rompendo uma das ombreiras.	Desconhecida.	Além dos danos a estrutura, demais danos são desconhecidos.
30	Fazenda Felícia	Momentos antes da ruptura da barragem de montante, caminhões se dirigiam ao local para alteá-la. O rompimento ocorreu na porção central da barragem.	A causa da ruptura da barragem de montante é desconhecida, enquanto a de jusante foi galgamento. Havia falhas no projeto e execução, além da ausência de licença ambiental	A ruptura da barragem de montante acarretou a ruptura da barragem de jusante, ademais a onda de cheia atingiu um trecho da rodovia GO-070

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
31	Fernandinho	A ruptura ocorreu em duas etapas. A primeira uma ruptura lenta próxima a ombreira direita, posteriormente houve o colapso total da barragem.	Causas não esclarecidas. A Ausência de projeto de engenharia, falta de drenagem e ausência de monitoramento geotécnico são elementos que contribuíram para o acidente.	Rompimento de barragens de decantação de sedimentos e captação de água a jusante, destruição da vegetação, assoreamento da faixa atingida pela onda e morte de sete trabalhadores que estavam no local.
32	Fontes Velha (Chaminé)	O súbito rompimento de uma das tubulações da chaminé deu início a um fluxo de 15 m³/s de água, com cinco horas de duração sobre a encosta, ocasionando sua erosão. A corrida de detritos causou a ruptura de um trecho com 18 m de extensão de uma cortina atirantada e a destruição do aceso a casa de válvulas.	Os dutos metálicos datavam do século XX, já deteriorados pelo tempo de uso. Ademais, devido aos alteamentos da barragem de Lajes que abastecia a usina o sistema de adução foi submetido ao aumento de pressões internas.	Ruptura da cortina atirantada e perda de acesso a casa de válvulas.
33	Foz do Chapecó	Em junho de 2014 após chuvas intensas a barragem sofreu danos, sendo eles: a erosão do talude lateral da estrada de acesso a usina, na margem esquerda ocorreu a erosão da estrada de acesso a área à jusante, também houve a erosão parcial do espigão de enrocamento da barragem e foi registrada a queda do muro a jusante do vertedouro:	Desconhecida	Ruptura parcial do muro a jusante do vertedouro.
34	Fundão	A ruptura ocorreu em quatro etapas: primeiro houve a descarga de água suja no tapete drenante, trincamento na base do platô, em seguida o platô se move para a jusante, depois a grande deformação no talude ocorre da base para cima, por último acontece as trincas na crista e acima dela.	Deformação por extrusão do rejeito fino, que foi espremido para jusante, reduzindo a tensão horizontal levando a liquefação da areia.	A onda de cheia atingiu as barragens a jusante, além de atingir o povoado de Bento Rodrigues, ademais a onda de rejeitos avançou mais de 600 km pelos rios até desembocar no oceano Atlântico ao fim de 16 dias.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
35	Granada	Vazões da ordem 400 m ³ /s, provocaram o deslizamento de parte do maciço já concluído.	Condições reais da fundação da barragem divergentes das de projeto da barragem.	Acréscimo de 138% do volume final de escavação em rocha e de 63% do volume de material compactado.
36	Guaíba Country Club	Em 1977 as águas provenientes de uma cheia em adição ao fechamento das comportas, acabaram por levar a estrutura de concreto da soleira do vertedouro e o radier à ruptura.	Devido a cheia repentina, conjugou-se o efeito das subpressões sob o radier com o fenômeno de entubamento (piping) nos sedimentos pouco coesivos, o que levou as estruturas ao colapso.	Colapso da estrutura de concreto
37	Herculano	O maciço lateral da barragem B1 se rompeu junto à ombreira direita e escorregou levando parte do platô que abrigava as baias de decantação, rompendo-as	As causas do acidente não foram esclarecidas de maneira satisfatória.	Três pessoas morreram e a lama soterrou um carro, uma escavadeira e um caminhão, assoreamento do córrego João dias e interrupção de água e energia para um condomínio próximo. Além disso houve efeito cascata nas barragens a jusante.
38	Ingá	Em fevereiro de 1996, em decorrência das fortes chuvas, o dique de contenção da Cia. Ingá rompeu-se, contaminando com metais pesados a Baía de Sepetiba. Em 2003 o dique se rompeu novamente	Não especificados. Com a falência da empresa, a indústria foi abandonada e os sistemas de controle, desativados, o que deu continuidade ao processo de contaminação e aos riscos de acidentes ambientais	Contaminação da Baía de Sepetiba, afetando o lençol freático na região, bem como o solo e o ecossistema marítimo.
39	Inxu	Na madrugada de 05/06/2015, uma grande quantidade de água jorrava de um ponto um pouco a montante da casa de força, junto ao pé do talude de jusante do dique. Algum tempo depois, o dique da câmara de carga foi rompido e uma onda de água e solo destruiu parcialmente a casa de força.	Um processo de erosão interna do aterro do dique que, partindo do pé de jusante, evoluiu no sentido remontante, levando-o ao colapso.	A inundação da casa de força afetou os quadros elétricos/eletrônicos, mas não destruiu os equipamentos mecânicos, nem as instalações civis.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
40	Jacareí	Uma empresa que não tinha autorização para despejar rejeitos na área de dragagem passou a despejá-los, então em fevereiro de 2016 houve vazamento da água com sedimentos no rio Paraíba do Sul.	Causas desconhecidas.	Moradores de São José dos Campos ficaram com o abastecimento de água comprometido.
41	Jaó	A estrutura de concreto gravidade rompeu-se em abril de 1945 durante um período de chuvas intensas.	Causas desconhecidas.	Interrupção do fornecimento de energia elétrica ao município de Goiânia por longo período.
42	Jati	O conduto forçado da barragem sofreu uma ruptura na parede esquerda hidráulica de um segmento de concreto armado, imediatamente a montante do bloco de concreto que faz a transição para o trecho em aço.	Ainda pendentes.	Desmonte hidráulico de parte do terreno da ombreira direita e do talude de jusante da barragem, criando um grande anfiteatro de erosão.
43	Juturnaíba	Foi identificado o deslocamento estrutural longitudinal do canal de restituição da margem esquerda da barragem e observado o colapso estrutural frontal da estrutura do canal, com comprometimento parcial do funcionamento das comportas	Causas desconhecidas.	São desconhecidas informações a respeito das consequências impostas pelos danos sofridos pelas estruturas laterais de liberação de descargas para jusante.
44	Lages	A primeira casa de força foi totalmente destruída em fevereiro de 1992, devido aos altos níveis atingidos pelo curso d'água a jusante da cachoeira. Parte da barragem de concreto também ruiu.	Causas desconhecidas.	Perda parcial dos equipamentos de geração e desativação da usina
45	Lençóis	Em março de 1962 uma enchente galgou a barragem destruindo-a parcialmente	Galgamento	Não há notícias de que o rompimento de parte da barragem tenha causado prejuízos a jusante. A alienação dos equipamentos equivale a dizer que a usina ficou desativada por quase 25 anos.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
46	Lima Campos	Processo gradual de deterioração que, após cerca de 80 anos de vida útil, ocasionou o rompimento da laje de concreto de proteção do aterro do açude.	Deterioração da estrutura.	Além dos danos a estrutura, demais danos são desconhecidos.
47	Limoeiro	A onda de cheia ocasionada pela ruptura da barragem Euclides da Cunha atingiu a barragem do limoeiro, ultrapassando a capacidade do vertedouro que foi galgado, abrindo uma extensa brecha na margem direita do barramento.	Rompimento em cascata, devido ao galgamento da barragem.	A onda de choque que se propagou para jusante desalojou cerca de 4.000 pessoas, sem ter causado vítimas fatais
48	Macabu	Após chuvas intensas a ruptura ocorreu do lado esquerdo hidráulico a algumas dezenas de metros a montante da chaminé de equilíbrio.	Existência de armadura deficiente no concreto do túnel no trecho do acidente e o recobrimento muito pequeno para o túnel no trecho próximo à chaminé de equilíbrio, formado por solos e rocha decomposta	A usina foi atingida pela corrida de detritos, tendo sido inundada e os equipamentos danificados.
49	Machadinho D'Oeste	Fortes chuvas provocaram o galgamento de três passagens construídas sobre o leito do rio, seguido pelo rompimento das estruturas e liberação do caudal por elas represado.	Precipitação intensa que incidiu sobre um solo já saturado. As travessias atuaram como barragens, retendo e armazenando água até romperem.	50 famílias ficaram isoladas, mas não houve registro de vítimas. Sete pontes foram destruídas.
50	Melo Viana	No período hidrológico 1979 - 1980 uma enchente catastrófica rompeu a barragem e inundou a casa de força	Enchente	Paralisação da usina
51	Mina do Córrego do Feijão - B1 (MG)	A barragem 1 sofreu uma ruptura abrupta e com movimentos rápidos.	Ocorrência de uma liquefação estática causada por deslocamentos horizontais excessivos no trecho em que o rejeito era mais suscetível à liquefação.	A lama atingiu casas, hotéis, estradas e pontes e chegou ao rio Paraopeba nas proximidades da cidade de Brumadinho.

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
52	Mirai	A barragem rompeu, provocando um forte vazamento de lama avaliado em 2.000.000 de m ³	Falha na estrutura da barragem.	Moradores das cidades de Mirai e Patrocínio do Muriaé ficaram desalojados. Em Muriaé, a lama atingiu 1.200 casas
53	Mulungu	Durante o primeiro enchimento, foi observado a formação, a partir de jusante, de dois “tubos” de erosão interna com intenso carreamento de sólidos nas quinas superiores da galeria. Em poucas horas, o aterro foi destruído	Falha de execução. A posição de apoio da galeria foi aprofundada até encontrar terreno duro, sem que se tomasse qualquer outra medida. A protuberância resultante, que penetrava no aterro como uma faca, gerou tensões de tração nas imediações da galeria.	Destruição do aterro da barragem
54	Nossa Senhora do Livramento	Rompimento a partir do pé do talude de jusante.	Causas desconhecidas.	Os rejeitos escoaram por uma área com vegetação e derrubaram um dos postes da rede de alta tensão que atende a região
55	Orós	A barragem em construção começou a ser galgada, tendo resistido por muitas horas. Quando do colapso, a lâmina de água sobre a maior parte do corpo da barragem era de 30 cm, enquanto na parte rebaixada, 80 cm	Galgamento da barragem.	A onda de cheia avançou rapidamente para jusante, percorrendo 75 km em aproximadamente 12 horas e inundando as cidades de Aracati, Itaiçaba, Jaguaribe, Limoeiro e Juazeiro.
56	Palmácia	Em abril de 2001, seis pequenos açudes foram arrombados devido à forte precipitação ocorrida, o que mobilizou uma cheia com vazão superior à capacidade dos sangradouros	Inadequação dos dispositivos de descarga, geralmente subdimensionados e incapazes de fazer face à súbita elevação das vazões afluentes em cheias, como consequência de chuvas intensas e concentradas nas respectivas áreas de drenagem	Perda do açude, arrombado após o galgamento
57	Pampulha	Na manhã do dia 20, houve a queda da parte central da barragem, com colapso da placa de concreto e formação de um canal de escoamento em “S”, entre o ponto da trinca na placa e o local da surgência inicial a jusante	Segundo Vargas & outros (1954), a ruptura da barragem de Pampulha se deu por erosão regressiva do tipo entubamento (piping) através do corpo da barragem, como consequência de um sistema de drenagem interna inadequado	Não foram registradas vítimas, pois foi possível tomar medidas preventivas

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
58	Pari	Uma enchente destruiu a UHE no inverno	Enchente ocorrida no inverno de 1983	Desativação da Usina
59	Pedra Furada	A barragem de terra sofreu colapso, deixando um vão aberto entre a ombreira e o muro de concreto de abraço na margem esquerda.	O colapso foi por piping, embora não se saiba se teve início pela fundação da barragem ou pela ombreira esquerda.	o esvaziamento do reservatório, de forma gradativa e lenta, acarretando a interrupção da operação de teste das unidades geradoras
60	Pico São Luiz	Em junho de 1985 um trecho de aterro da barragem rompeu junto à ombreira esquerda. No dia 2 de outubro de 1986, a barragem rompeu na região do vertedouro, deixando o resto do aterro intacto	Liquefação do maciço.	A linha da estrada de ferro da Vale do Rio Doce foi arrastada pela enxurrada, paralisando o transporte de minério. Uma pequena ponte de concreto foi destruída. Não houve vítimas fatais
61	Piranhas	Ocorreu abatimento do enrocamento e ruptura dele na parte jusante, bem como abatimento do maciço de terra a montante da cortina de concreto	A dinâmica comportamental dos materiais, solo e enrocamento, perante a atuação de esforços e por longo tempo de duração, estava longe de ser bem conhecida, acarretando a ruptura.	Não recuperação do vertedouro existente e a implantação de um novo vertedouro, fora do corpo da barragem.
62	Pontalina	A barragem foi galgada pelas águas que acabaram abrindo uma brecha junto à margem e ombreira esquerda, com cerca de 20 m de largura	Galgamento	A água que saiu da barragem destruiu uma residência.
63	Poquim	Uma cheia de grandes proporções que provocou o rompimento da estrutura em diversos pontos, somente permanecendo no local a metade esquerda da estrutura	Supõe-se que a carga hidrostática por ocasião da enchente tenha exercido esforços suficientes para romper a estrutura	Perda do reservatório que abastecia a cidade

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
64	Quati	A barragem rompeu após o transbordamento das águas do rio do Peixe em virtude das fortes chuvas ocorridas na região	O excesso de vazão teria provocado um alteamento do nível das águas, com galgamento das barragens de terra em ambas as margens, causando a erosão das mesmas.	Inundação de residências próximas, ademais a propagação da onda de cheia atingiu a cidade vizinha a inundando e desabrigando 1000 pessoas.
65	Rio Verde	O rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro da Mineração Rio Verde causou uma onda de lama que se estendeu por mais de 6 km a jusante,	Causas desconhecidas.	Morte de cinco operários, e destruição da principal via de acesso de São Sebastião das Águas Claras, no distrito de Macacos, em Nova Lima - MG
66	Rudolf Heidrich	Em 2017 e em 2019 houve o rompimento do canal de adução	No acidente de 2017, a causa foi a existência de falhas nas estruturas da obra, tanto ao longo do canal de adução, quanto em outros componentes do empreendimento. Já em 2019 não há informações	Em 2019 houve a inundação de parte da propriedade de uma única família afetada, sem perdas de vidas humanas ou de animais. Já no acidente anterior, de 2017, ocorreu a morte de diversos animais, além de outras perdas materiais.
67	Santa Cruz	A barragem de Santa Cruz foi galgada por uma lâmina superior a 1 m pela cheia causada pelos sucessivos colapsos de barragens a montante. Em virtude disso, o maciço não resistiu à inesperada solicitação, rompendo em três pontos distintos, numa abertura total de 160 m	Somatório de eventos desfavoráveis, consistindo em uma estação chuvosa que acarretou o rompimento de uma série de pequenos açudes situados a montante, com reflexos em cascata	Destruição de prédios municipais e de mais de mil residências, deixando ao desabrigo cerca de 5.000 pessoas
68	Santa Helena (BA)	A ruptura da barragem de Santa Helena ocorreu em 9 de maio de 1985. Na véspera do colapso apareceram trincas e afundamentos (“crateras”) nos aterros junto ao vertedouro	A ruptura ocorreu devido ao mau comportamento geotécnico da obra, sendo iniciado pelo deslocamento ou destruição das lajes da calha do vertedouro, em decorrência da elevação da subpressão causada pelo aumento do nível d’água a jusante da barragem.	A perda do reservatório foi total. Todo o vale do rio Jacuípe, até a foz, foi inundado pela onda de cheia que não causou vítimas fatais

Nº	Barragem	Breve descrição dos acidentes	Causa do acidente	Consequências
69	São José do Rio Claro	Durante fortes chuvas ocorridas no início de fevereiro de 2018, relatou-se o rompimento simultâneo de cinco barragens na região	A ocorrência de chuvas intensas gerou descargas elevadas que ocasionaram a sequência de rompimentos de barragens por galgamento, provavelmente	Os prejuízos ambientais foram elevados, apesar de não quantificados. Não houve perdas de vidas humanas.
70	São Tadeu	o sinistro ocorreu ao final do túnel de adução, isto é, perto do desemboque, e consistiu na ruptura hidráulica da seção, com abertura de fraturas na rocha,	O relatório para a ANEEL não aborda as causas do acidente.	Além dos danos causados no interior do túnel, o sinistro ocasionou o alagamento da casa de força e consequente paralisação dos testes
71	Sinop	Verificou-se aberturas de trincas existentes próximas e paralelas à borda da parede de escavação aumentando significativamente. A obra entrou em compasso de espera do rompimento da parede, que se percebia iminente, apesar da dimensão do evento não ser previsível. O colapso da parede, documentado pelos próprios trabalhadores, teve duração inferior a dois minutos	Não foram fornecidas à mídia informações suficientes para lançar luz sobre as causas do colapso da parede de escavação.	O evento teve impacto no cronograma das obras e trabalhos adicionais, embora não haja informações a respeito
72	Tamboril	Em 10 de março de 2017 ocorreu o rompimento parcial do Polietileno de Alta Densidade (PEAD) nas regiões entre as galerias 6 e 7. Na sequência, houve o rompimento parcial do aterro da margem esquerda na galeria 7	Causas desconhecidas.	Interrupção da produção de energia da UHE

Fonte: Adaptado de Guidicini; Sandroni; Mello, 2021b.