



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

ALINE DAIANE RIBI FERNANDES STORTZ

FÁBIO NELSON ALVES ABIBI

**MONITORAMENTO DE BARRAGENS:
MODELAGEM PARA SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE MONITORAMENTO DE
SEGURANÇA DE BAIXO CUSTO**

Tubarão (SC)

2022

ALINE DAIANE RIBI FERNANDES STORTZ

FÁBIO NELSON ALVES ABIBI

**MONITORAMENTO DE BARRAGENS:
MODELAGEM PARA SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE MONITORAMENTO DE
SEGURANÇA DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
do Sul de Santa Catarina como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Civil.

Orientadores: Prof. Ms. Ismael Medeiros

Prof. Esp. Gil Felix Madalena

Tubarão (SC)

2022

ALINE DAIANE RIBI FERNANDES STORTZ

FÁBIO NELSON ALVES ABIBI

**MONITORAMENTO DE BARRAGENS:
MODELAGEM PARA SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE MONITORAMENTO DE
SEGURANÇA DE BAIXO CUSTO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão (SC), 02 de dezembro de 2022.

Professor e orientador Ismael Medeiros, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Gil Félix Madalena, Esp.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Engº. Leandro da Costa Vieira, Esp.
Convidado – MPB Engenharia

FÁBIO NELSON ALVES ABIBI

Dedico este Trabalho à minha esposa, Luciana Reis, meu porto-seguro, que sempre me encorajou e deu forças para continuar. Ao meu filho, Heitor, que me faz querer ser sempre melhor. À minha mãe, Teresa, sem o sacrifício da qual eu não teria chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à minha Mãe, Teresa, por todo o incentivo, empenho e sacrifícios para que eu chegasse até aqui.

Aos Professores e Professoras que tanto contribuíram para esta conquista, em especial: Anita Dela Vedova, por toda candura e paciência em reensinar fundamentos básicos a quem havia saído da escola há mais de uma década; aos *temidos* Maria Lúcia Soares Cochlar e Aderbal Brauner Fagundes pela maestria na docência e preocupação com o aprendizado; aos Professores-Orientadores Gil Félix Madalena, pela dedicação e apoio muito além dos horários de aula e da obrigação acadêmica, e Ismael Medeiros pelo empenho e dedicação, sempre instigando o corpo discente a “pensar fora da caixa”, estímulo este que foi inspiração para a elaboração deste Trabalho.

À toda minha família e amigos que direta ou indiretamente contribuíram para esta conquista.

À minha Esposa, Luciana, por estar sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando, sendo sempre “*o vento sob minhas asas*”, dando forças e lutando comigo para chegar até o final, e ao meu Filho, Heitor, razão por eu lutar para ser sempre minha melhor versão, alguém de quem ele possa se orgulhar e inspirar.

Fábio Nelson Alves Abibi

ALINE DAIANE RIBI FERNANDES STORTZ

Dedico esse trabalho ao meu esposo Luiz Henrique por todo incentivo, cuidado e amor. À minha filha Alice pelo seu sorriso que torna tudo ao redor obsoleto. Aos meus amigos que tornam a vida mais leve. E as minhas gatas, pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que em muitos momentos me carregou em seu colo como filha, guardou minhas lágrimas e me deu forças para prosseguir.

A familiares e amigos que de alguma forma contribuíram para essa realização.

Aos meus professores e professoras, em especial aos orientadores Gil Félix Madalena pela excelente didática, pelo apoio profissional e emocional, sem o qual não me permitiria chegar nessa etapa, e Ismael Medeiros pela forma leve de ensino, e pelos desafios práticos que nos permite aprender além da sala de aula.

Agradeço ao colega Fábio Nelson Alves Abibi por me permitir fazer parte deste trabalho, compartilhando conhecimento e agregando conteúdo.

Ao meu esposo, Luiz Henrique da Conceição Stortz, que sempre me incentivou, cuidou de mim nos momentos de crise e jamais me permitiu desistir. *“Eu serei o sangue se você for os ossos”*.

Por último, mas infinitamente mais importante, agradeço minha filha, Alice Ribi Stortz, *“você corre em minhas veias”*. Mesmo sem ter idade e tamanho para compreender o que acontece a sua volta, tem sido minha força, minha motivação. Conheci o amor mais puro quando fostes gerada, e sem o qual hoje não saberia viver. Obrigada pelo maior e melhor presente, ser sua mãe.

Aline Daiane Ribi Fernandes Stortz

“Uma pessoa inteligente resolve um problema, um sábio previne-o” (Autoria desconhecida, atribuída a Albert Einstein).

RESUMO

As barragens são comumente adotadas em jazidas de minérios por todo o país. Embora haja vários recursos técnicos preventivos possíveis de serem implantados na fase de execução das barragens, existem casos em que são adotadas medidas aquém do necessário, seja por estimar não serem necessários em uma obra muitas vezes temporária, ou decisões corporativas; ainda que existam também recursos de monitoramento para a integridade das barragens (deslocamento, piezômetro, massa, etc.), podem ocorrer falhas humanas, mudanças climáticas ou outros fatores não previstos que comprometam a integridade da barragem e façam-na colapsar. Isto pode acarretar tragédias colossais como as barragens de Brumadinho e Mariana nos últimos anos, que resultaram em centenas de mortes - além de tantas outras que felizmente não resultaram em óbitos, apesar de gerarem substanciais prejuízos financeiros e ambientais. Apesar das tecnologias de automação para monitoramento em tempo real serem de fácil acesso, ainda vemos muito pouco emprego destas para a prevenção de acidentes.

Palavras-chave: Barragem. Monitoramento. Automação.

ABSTRACT

Dams are commonly adopted in ore deposits throughout the country. Although there are several preventive technical resources that can be implemented in the execution phase of the dams, there are cases in which measures are adopted below the necessary, be it for estimate a lack of necessity in a work that is often temporary, or corporate decisions; although there are also monitoring resources for the integrity of the dams (displacement, piezometer, mass, etc.), human failures, climate changes or other unforeseen factors may occur that compromise the integrity of the dam and cause it to collapse. It may lead to colossal tragedies such as the Brumadinho and Mariana dams in recent years, which resulted in hundreds of deaths - in addition to many others that fortunately did not result in deaths, despite causing substantial financial and environmental damage. Although automation technologies for real-time monitoring are easily accessible, we still see very little use of them for accident prevention.

Keywords: Dam. Monitoring. Automation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Barragens de terra e enrocamento.	17
Figura 2 – Barragens de concreto.	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acidentes com barragens de rejeitos no Brasil nos últimos 35 anos.....	14
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	TEMA E DELIMITAÇÃO	13
1.2	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	14
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos específicos	15
1.4	ESTRUTURA	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	BARRAGENS NO BRASIL	16
2.1.1	Tipos de barragens	16
2.1.1.1	Barragens de Terra	16
2.1.1.2	Barragens de Enrocamento	17
2.1.1.3	Barragens de Concreto	17
2.2	FENÔMENOS HIDROGEOTÉCNICOS.....	18
2.2.1	Ruptura por entubamento (<i>piping</i>).....	18
2.2.2	Ruptura por cisalhamento.....	19
2.2.3	Ruptura por galgamento (<i>Overtopping</i>)	19
2.2.4	Ruptura por falha na fundação.....	19
2.2.5	Ruptura por liquefação.....	20
3	METODOLOGIA.....	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	22
4.1	MODELAGEM.....	22
4.1.1	Modelagem conceitual.....	22
4.1.1.1	Hidrologia.....	23
4.1.1.2	Hidrografia	23
4.1.1.3	Geologia e Pedologia.....	24
4.1.1.4	Topologia.....	24
4.1.1.5	Parâmetros Geotécnicos e Hidrogeotécnicos	24
4.1.2	Fluxograma de modelagem	25
5	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

O Brasil desde os tempos coloniais tem na mineração uma atividade de possui grande exploração e importância econômica, somando-se mais de 300 anos desta prática (ÁVILA *et al.*, 2021). Em 2019 foram exportados mais de U\$ 32 bilhões em minérios, o que representou aproximadamente 16,8% do Produto Interno Bruto (PIB) Industrial do país (IBRAM, 2020). Tal atividade comumente apresenta certas necessidades hídricas, relacionadas ou não a rejeitos, e para a sanar estas questões convencionou-se a adoção do uso de barragens homogêneas, que em geral apresentam solução de bom custo-benefício.

Apesar do uso e *know-how* comuns à confecção deste tipo de estrutura de contenção, por vezes ocorrem eventos atípicos, causados por fatores imprevisíveis ou não, causando colapso das barragens como aconteceram nos últimos anos, dos quais Brumadinho e Mariana tiveram maior notoriedade por somarem centenas de vítimas fatais, e não podemos considerar “normal” esse tipo de ocorrido. Além das medidas preventivas que podem (e devem) ser adotadas a fim de impedir o colapso das barragens, deve-se também monitorar constantemente a situação da barragem, pois indicadores de deslocamento, altura piezométrica interna e peso (massa) total da barragem servem como indicadores de fragilidade estrutural da contenção permitindo identificar a iminência de um colapso.

Este trabalho propõe apresentar alternativas de baixo custo para monitoramento em tempo real dos indicadores de estabilidade da barragem, integrado com rede de comunicação para alertas e assim resguardar as vidas das populações fixa e flutuante circundantes, no caso de colapso.

1.1 TEMA E DELIMITAÇÃO

O presente projeto tem como tema o monitoramento em tempo real de barragens, em especial de rejeitos. A delimitação será através de pesquisas e análises de casos descritos na literatura, e elaboração de algoritmo modelo para monitoramento em tempo real dos índices de segurança e estabilidade das barragens, ligados a um sistema de comunicação e alerta autônomo.

1.2 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

Apesar de estudos apontarem a ínfima probabilidade de apenas 0,2 % de ruptura de uma barragem, 59 % dos desastres têm causas geológicas-geotécnicas, incluindo problemas nas fundações, 23 % por cheias excepcionais e 12 % por construções deficitárias (MAGELA, 2017).

Nos últimos anos, fomos impactados pelo rompimento de barragens, em especial de Brumadinho e Mariana, ambas no Estado de Minas Gerais, que resultaram em centenas de mortes e danos ambientais de proporções colossais – desastres estes que poderiam ter sido no mínimo reduzidos com um sistema eficaz e eficiente de monitoramento em tempo real, possibilitando o alerta e evacuação das áreas a tempo de evitar muitas mortes.

Tabela 1 – Acidentes com barragens de rejeitos no Brasil nos últimos 35 anos.

ANO	BARRAGEM	DANOS
1986	Fernandinho	7 mortes.
2001	Rio Verde	5 mortes.
2003	Florestal Cataguases	Vazamento de lixívia negra, contaminação de água a jusante.
2006/2007	São Francisco	Vazamento de rejeito de bauxita, contaminação de água a jusante.
2014	Herculano	3 mortes.
2015	Fundão (Mariana)	19 mortes, contaminação de água a jusante.
2019	Córrego do Feijão (Brumadinho)	270 mortes, contaminação de água a jusante.

Fonte: Ávila *et al.* (2021, p. 437).

Visando evitar tragédias e preservar vidas e ecossistema este trabalho propõe a criação de modelagem computacional de baixo custo para monitoramento em tempo real das barragens, de modo a permitir a detecção prévia de uma situação de risco e assim prover o devido alerta para correções necessárias ou mesmo evacuações das cercanias nos casos de colapso iminente.

1.3 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais e específicos propostos no presente estudo.

1.3.1 Objetivo geral

Elaborar um algoritmo para sistema de baixo custo de monitoramento em tempo real de barragens homogêneas, com comunicação instantânea de alertas para potenciais catástrofes iminentes.

1.3.2 Objetivos específicos

Para a verificação do objetivo geral foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) Modelar os fenômenos hidrogeotécnicos que estruturas deste porte estão submetidas;
- b) Desenvolver a modelagem conceitual multiplicada;
- c) Desenvolver as rotinas/algoritmos em atendimento a demanda;
- d) Estabelecer a linha de comunicação em tempo real dos diferentes cenários monitorados;
- e) Estabelecer os gatilhos de alerta em tempo real para os sistemas monitorados.

1.4 ESTRUTURA

O presente estudo é composto por quatro capítulos. Primeiramente a Introdução, onde é apresentado o tema, sua delimitação, problemática e justificativa do porquê da escolha deste tema, os objetivos a serem alcançados e a metodologia adotada.

O segundo capítulo conta com o referencial teórico que fundamenta o presente trabalho. Abordagem sobre as barragens homogêneas no Brasil e no mundo, riscos de desastres, registros de ocorrências, impactos ambientais, entre outros.

O terceiro capítulo traz o método adotado, o campo no qual ele foi desenvolvido, as pesquisas correlatas e a análise destas pesquisas fundando-se no referencial teórico adotado.

O quarto capítulo conta com os resultados e discussões sobre o presente trabalho.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e considerações finais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos relacionados ao tema, na visão de outros autores. Assim serão abordados conceitos e estudos sobre os fenômenos ocorridos nas barragens, que possibilitarão a adequada modelagem conceitual proposta.

2.1 BARRAGENS NO BRASIL

As barragens têm sido fundamentais para o desenvolvimento das civilizações desde o início da humanidade. A civilização encontrou neste tipo de estrutura uma solução para a escassez de água, fosse para consumo direto, lavoura etc. Com o avanço da civilização, outras necessidades surgiram, e assim, novos usos para esta estrutura.

No Brasil, o registro mais antigo que se tem da construção de uma barragem data do século XVI, onde hoje é situada a urbe de Recife, PE, anterior mesmo à invasão holandesa (SANTOS, 2018). Atualmente o Brasil conta com mais de 22.000 barragens, das quais mais de 2300 estão categorizadas como Risco Alto e mais de 3600 com Dano Potencial Associado Alto (SNISB, 2021).

2.1.1 Tipos de barragens

Assim como a tecnologia evolui e se adapta, esta premissa também é verdadeira no que tange as construções de barragens. Os principais tipos de construção de barragens são de terra, de enrocamento e barragens de concreto (CORDEIRO, 2021).

2.1.1.1 Barragens de Terra

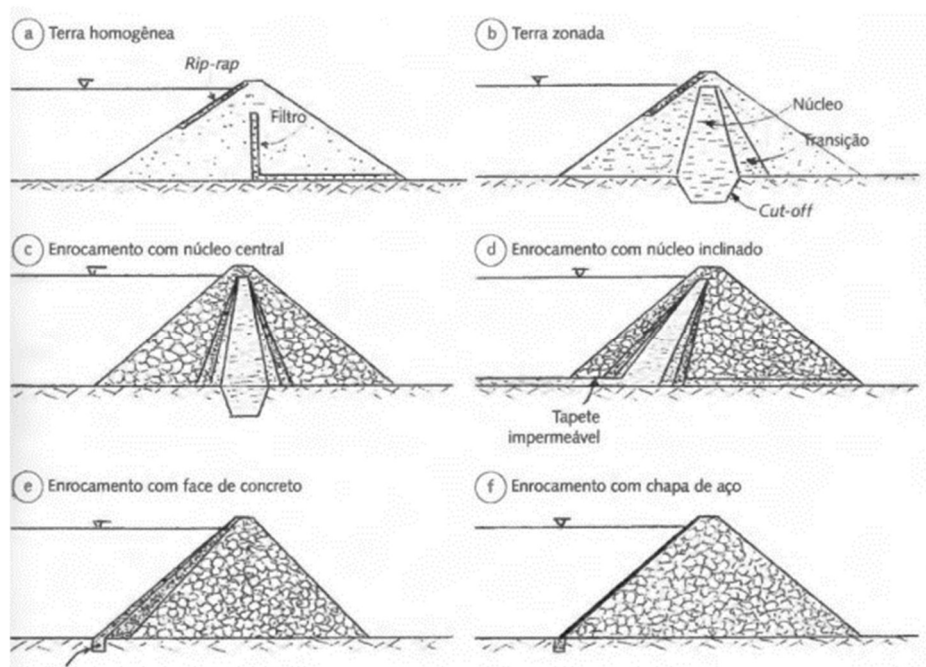
Barragens de terra normalmente são utilizadas quando o maciço de fundação não possui condições geológicas adequadas para comportar estruturas em concreto. Como o nome aponta, sua constituição é essencialmente por terra, o que faz necessária uma jazida consideravelmente próxima para o transporte de material e construção da barragem. Tais quais as pirâmides, são construídas com base alargada, visando reduzir as tensões aplicadas no maciço de fundação.

As barragens de terra homogêneas são constituídas por apenas um material, daí seu nome; ainda assim, podem comportar outros elementos de segurança e contenção auxiliar, como filtro ou rip-rap (CORDEIRO, 2021).

2.1.1.2 Barragens de Enrocamento

Também chamadas de terra-enrocamento, são barragens constituídas essencialmente por rochas, porém contam com um núcleo impermeável (vertical ou inclinado para montante), podendo ser de argila com material de transição para inviabilizar o carreamento do núcleo pela água. Outras variações de impermeabilização podem ocorrer utilizando aço, CBUQ ou concreto em seu interior ou na face a jusante (CORDEIRO, 2021).

Figura 1 – Barragens de terra e enrocamento: (a) Terra homogênea, (b) Terra Zoneada, (c) Enrocamento com núcleo central, (d) Enrocamento com núcleo inclinado, (e) Enrocamento com face em concreto, (f) Enrocamento com chapa de aço.

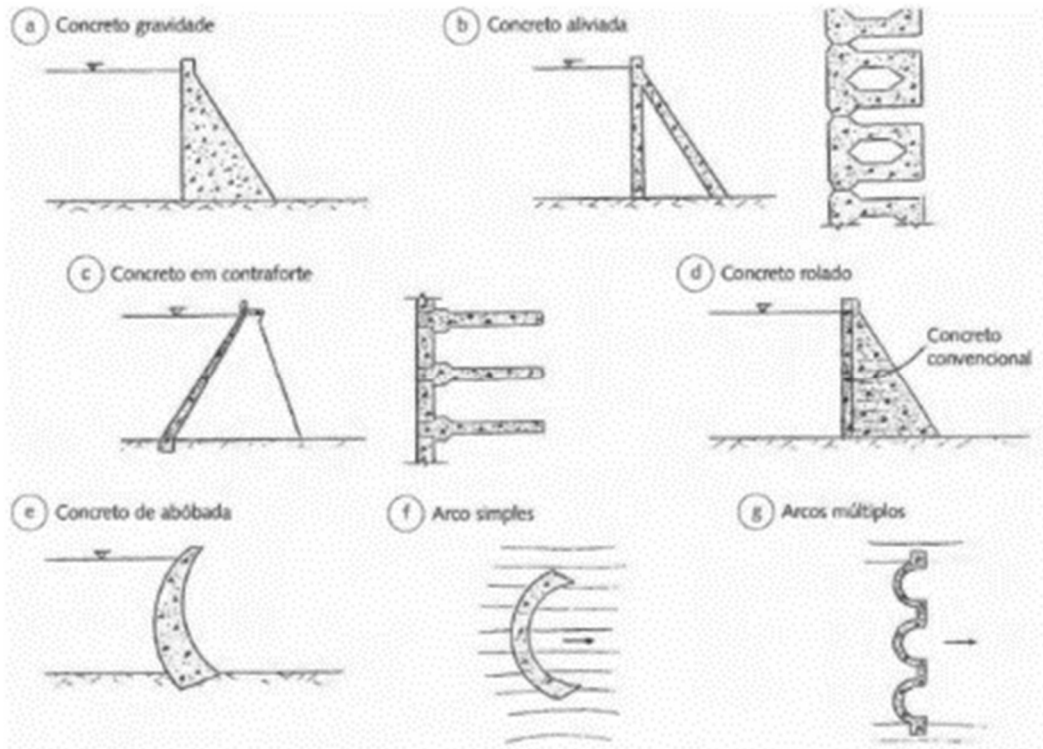


Fonte: Rauén (2006, p. 127).

2.1.1.3 Barragens de Concreto

Como o nome sugere, são barragens construídas em concreto, podendo esta ser em concreto simples, compactado, armado ou não. Para CORDEIRO (2021), no geral necessitam assentamento em de fundação em rocha que possua as adequadas características de suporte solicitadas (deformabilidade, estanqueidade e resistência). Ainda podem ser divididas em barragens de peso (ou gravidade), gravidade aliviada, contraforte, de concreto rolado (ou compactado) e de abóboda (em arco).

Figura 2 – Barragens de concreto: (a) Gravidade, (b) Aliviada, (c) Contraforte, (d) Concreto rolado, (e) Abóboda, (f) Arco simples, (g) Arcos múltiplos.



Fonte: Cordeiro (2021, p. 20).

2.2 FENÔMENOS HIDROGEOTÉCNICOS

Conceitualmente falando, a ruptura de uma barragem é um evento descontrolado de transferência de material sólido, acompanhado ou não de material líquido, sendo este parcial ou integral, e pode resultar em perda de capacidade e/ou estrutura de contenção da barragem, inviabilizando tecnicamente seu funcionamento. Além dos prejuízos, a potencial ruptura da barragem ameaça não apenas a população circundante, como todo o ecossistema próximo (COSTA, 2018).

2.2.1 Ruptura por entubamento (*piping*)

Uma das principais causas de rupturas de barragens é o fenômeno de entubamento, que é um tubo de escoamento preferencial, conhecido internacionalmente como *piping*. Este fenômeno acontece por erosão regressiva, quando há o carreamento de grumos de silte e argila dentro da barragem, de jusante a montante, formando assim o referido tubo. À medida que a

água percola pelo solo compactado, este tubo tende a aumentar, carregando mais material, o que eventualmente leva ao colapso da barragem (LADEIRA *et al.*, 2007).

2.2.2 Ruptura por cisalhamento

A ruptura de uma barragem ocorre devido à formação de uma superfície de cisalhamento contínuo, onde há a perda de propriedades mecânicas do solo (CORDEIRO, 2021). Conceitualmente falando, a ruptura de uma barragem é um evento descontrolado de transferência de material sólido, acompanhado ou não de material líquido, sendo este parcial ou integral, e pode resultar em perda de capacidade e/ou estrutura de contenção da barragem, inviabilizando tecnicamente seu funcionamento. Além dos prejuízos, a potencial ruptura da barragem ameaça não apenas a população circundante, como todo o ecossistema próximo (COSTA, 2018).

2.2.3 Ruptura por galgamento (*Overtopping*)

A ruptura por galgamento, internacionalmente conhecida como *Overtopping*, ocorre por extravasamento não controlado de água sobre o corpo da barragem, podendo ter sua causa em problemas no dimensionamento de controle hidráulico, evento hidrológico excepcional (não previsto assim pelo tempo de retorno) (COSTA, 2018). Ocorre quando os sistemas de extravasão (vertedores) são insuficientes ao fluxo recebido, fazendo com que a água passe sobre a barragem e assim comece a erodir a superfície de jusante a montante, podendo levar ao colapso total da barragem (AMORIN, 2021).

2.2.4 Ruptura por falha na fundação

A ruptura pode ocorrer também por falha na fundação, o que ocorre quando as tensões recebidas são superiores à resistência oferecida, ou quando esta apresenta ligações com materiais argilosos ou materiais impermeáveis nas juntas de ligações (COSTA, 2018). Este acontecimento pode estar ligado a falhas geológicas ou de execução da barragem. Como capacidade de suporte e compressibilidade praticamente não podem ser melhoradas, pode-se adotar uma fundação mais profunda e de maior suporte, nos casos de barragens de concreto, ou optar por erigir a barragem em outro local com o suporte adequado (AMORIN, 2021).

2.2.5 Ruptura por liquefação

A liquefação do solo é o estado de fluidez que ocorre quando a poro pressão chega a reduzir a zero a tensão efetiva, levando as partículas sólidas a perder o contato e coesão entre si. (COSTA, 2019). Outro fator determinante que pode causar a liquefação e assim chegar a gerar a ruptura da barragem é a presença de minerais solúveis, que aumentam a liquidez da barragem, podendo gerar canais ou causar recalques por perda de volume (MAGELA, 2017).

3 METODOLOGIA

Quanto à natureza a pesquisa se classifica como experimental, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicações práticas com objetivo de solucionar problemas específicos.

Do ponto de vista da abordagem do problema esta é uma pesquisa de caráter quantitativa, uma vez que trata de dados levantados e índices de segurança geotécnicos e geológicos, dados concretos não passíveis de “opinião”.

Quanto à abordagem dos objetivos a pesquisa é exploratória, visto que envolve levantamentos bibliográficos, além da análise de dados disponíveis.

Já, quanto aos procedimentos técnicos vale-se do método indutivo, pois é proposto um modelo para ser colocado em prática.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

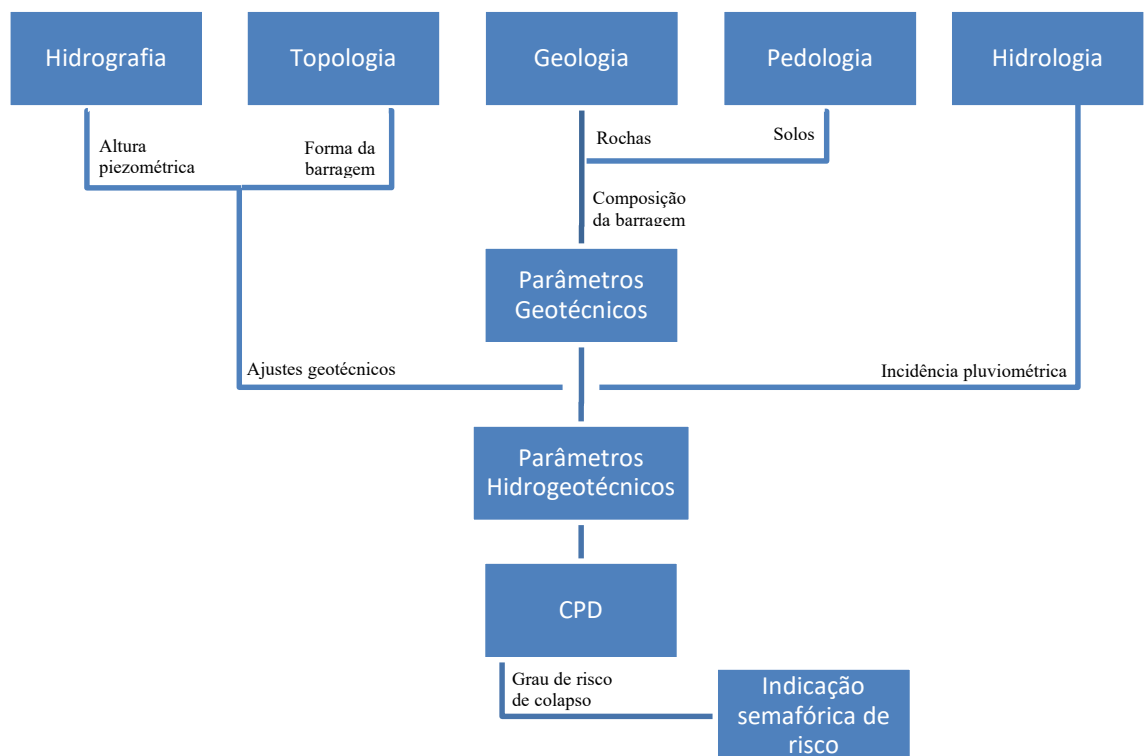
Como resultado desta pesquisa, propõe-se a elaboração de um sistema computacional de baixo custo, apresentando uma modelagem conceitual que forneça a lógica do processo, possibilitando a aplicação deste modelo mesmo nas menores escalas, demonstrando assim a viabilidade de implantar um sistema de monitoramento em tempo real acessível a qualquer grupo.

4.1 MODELAGEM

Conforme abordado, os fenômenos que comumente levam uma barragem ao colapso são de ordem hidrogeotécnica; assim sendo, tendo um monitoramento contínuo dos fatores relacionados a estes fenômenos, podemos com suficiente eficácia e eficiência identificar o grau de risco de potenciais desastres, e assim tomar as medidas necessárias para majorar a segurança circundante para população, fauna e flora.

4.1.1 Modelagem conceitual

A modelagem conceitual dar-se-á conforme:



Para entender a metodologia conceitual, é imprescindível conhecer alguns conceitos e como eles são aplicados em uma estrutura de barragem.

4.1.1.1 Hidrologia

Hidrologia é a ciência que trata da água na Terra, sua ocorrência, circulação e distribuição, suas propriedades físicas e químicas, e sua reação com o meio ambiente, incluindo sua relação com as formas vivas (TUCCI, 1993, p. 25).

Torna-se expressiva a necessidade de incluir a hidrologia como índice de análise para projeto e dimensionamento de barragens, visto que o objeto de estudo – a água – interfere diretamente no impacto de uso, alterando os parâmetros hidrogeotécnicos, tornando-se, em alguns casos, responsável pelo colapso da estrutura.

Para a construção da modelagem conceitual, a hidrologia nos fornece a incidência pluviométrica da região de estudo para instalação da estrutura da barragem. Esse índice nos permite analisar a quantidade de chuva. Com este dado conseguimos prever o impacto na estrutura, e projetá-la de forma a suportar essa incidência sem que haja rompimento da barragem. Além da importância no projeto, no modelo em questão, necessitamos dos dados pluviométricos para mensurar a carga incidental sobre a barragem e o quão esta influirá no risco de colapso.

4.1.1.2 Hidrografia

Hidrografia também possui a água como objeto de estudo, porém no ramo da geografia física, ou seja, o conjunto de águas nos países e regiões, como por exemplo: rios, lagos, mares, oceanos, entre outros.

Durante a modelagem conceitual utilizaremos dos dados de altura piezométrica para realizarmos a determinação da pressão neutra, que juntamente com dados coletados da geologia e pedologia da região onde a estrutura será projetada, obtemos os parâmetros hidrogeotécnicos que possibilitará o monitoramento da barragem.

4.1.1.3 Geologia e Pedologia

Geologia e pedologia são, respectivamente, o estudo das rochas e dos solos. Através desses estudos, conseguimos compor a estrutura da barragem. Uma vez identificada essa composição, é necessário que se tenha conhecimento de alguns parâmetros, como por exemplo o comportamento mecânico e a permeabilidade dos solos.

A permeabilidade é a propriedade do solo em possibilitar o escoamento da água através dele. Esse conhecimento é muito importante no ramo da engenharia civil, especialmente na construção de barragens, pois a água por ser incompressível e não possuir resistência ao cisalhamento, penetra facilmente em microfissuras e sob elevada pressão, pode levar estruturas ao colapso.

4.1.1.4 Topologia

Após conhecer e determinar o solo que irá compor a estrutura, precisamos projetar a topologia da barragem. A topologia nada mais é do que o formato que a barragem irá se apresentar. Através desse formato e dos outros parâmetros já mencionados, conseguimos estabelecer e calcular a massa, o teor e o afastamento. Características estas necessárias para definir o grau de risco da barragem.

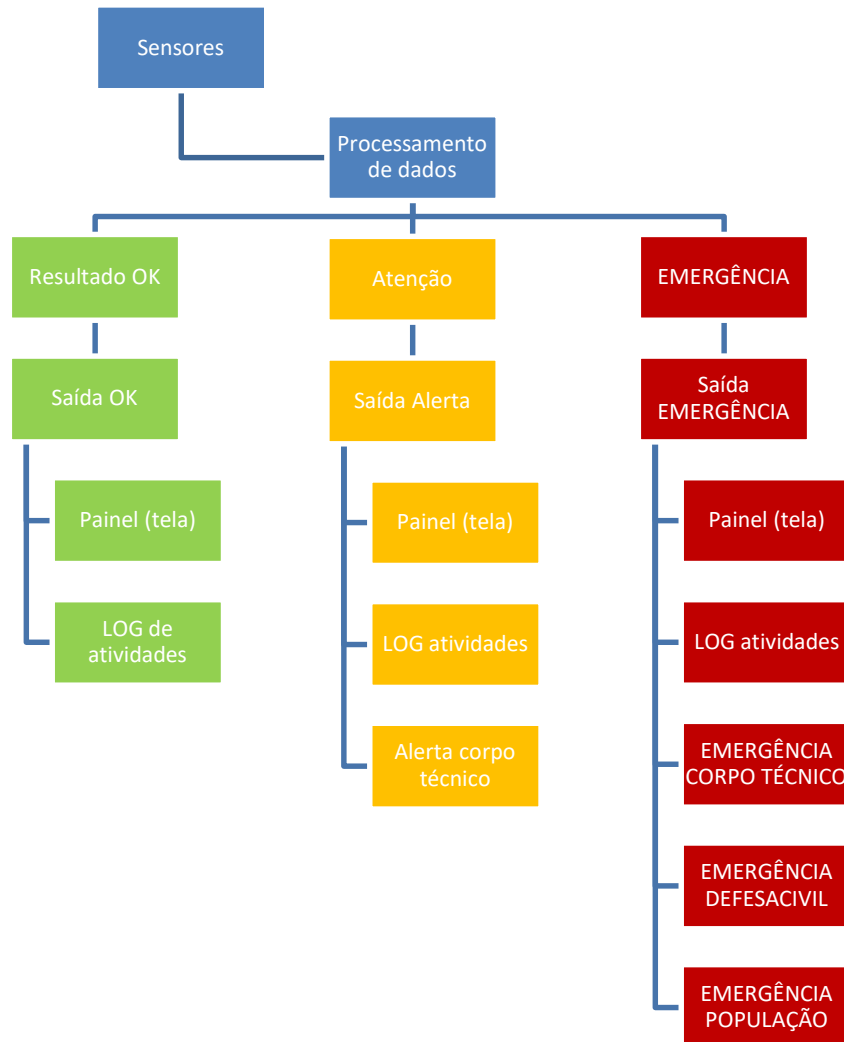
4.1.1.5 Parâmetros Geotécnicos e Hidrogeotécnicos

Os parâmetros geotécnicos e hidrogeotécnicos são parâmetros levantados a partir dos conceitos acima estabelecidos. Para extrair esses dados, utilizar-se-á de métodos matemáticos provenientes do conhecimento nas áreas de mecânica e hidráulica dos solos, bem como instrumentos de leitura de índices das áreas supracitadas, como piezômetro, sensores de proximidade, de massa etc.

Esse conglomerado de informações será enviado para uma Central de Processamento de Dados (CPD), onde será devidamente processado e fornecerá como saída o grau de risco de colapso, valendo-se de um formato de “indicação semafórica” conforme a gravidade.

4.1.2 Fluxograma de modelagem

O modelo de coleta e tratamento de dados dar-se-á conforme fluxograma a seguir:



Para a modelagem proposta, são coletados dados provenientes de sensores instalados na barragem a ser monitorada. Estes sensores coletam dados como altura piezométrica, deslocamento do maciço e massa total, que são direcionados ao CPD. O CPD é integrado por instrumentos de tecnologia da informação e automação, podendo ser computadores, minicomputadores (Raspberry e similares) e/ou placas únicas de prototipagem eletrônica (Arduíno, entre outros).

Após o processamento e estabelecido o grau de risco do colapso, essas informações serão enviadas às entidades e canais necessários (como a Defesa Civil e demais órgãos cabíveis, além do corpo técnico responsável pela barragem) que colocarão em prática o sistema de urgência/emergência estabelecido conforme o alerta recebido, ou seja, conforme a gravidade

do risco de colapso da estrutura. Dessa forma, mitigando impactos ambientais, sociais e econômicos advindos desse fenômeno, que em muitos casos, torna-se irremediável e fatal.

5 CONCLUSÃO

No decorrer deste estudo buscou-se demonstrar a importância de um monitoramento adequado às barragens, que seja eficaz e eficiente. As barragens são elementos importantes à economia e desenvolvimento tecnológico de um país, e o Brasil utiliza desta contenção há séculos. No entanto, os desastres dos últimos anos demonstram que a segurança relacionada a estas estruturas ainda está muito aquém do necessário, levando a fatalidades irreparáveis que poderiam ser evitadas.

Toda estrutura apresenta sinais quando da ocorrência de manifestações atípicas (patologias), seja esta ocorrida por findar a vida-útil, subdimensionamento, fatores externos não previstos etc. e no caso das barragens isto não é diferente. Elevação de altura piezométrica interna, aumento de pressão neutra, deslocamento do maciço são alguns dos sinais que indicam que as condições podem estar distanciando-se do ideal, aumentando o grau de risco de um potencial colapso.

Coletar informações relativas aos itens supracitados nos fornece dados significativos, que podemos utilizar para definir os índices geotécnicos (e hidrogeotécnicos) relacionados à barragem, e assim identificar o grau de risco de colapso ao qual a estrutura está sujeita. Esta prática inclusive é aplicada comumente em barragens, porém muitas vezes ocorrem falhas por depender de aferição, falhas estas que podem ser minimizadas – ou até mesmo eliminadas – com um sistema de automação para monitoramento em tempo real, que realize a coleta, processamento e entrega dos resultados destes dados necessários de maneira autônoma.

Justamente por isso, este estudo propõe um modelo para automação, que permita a montagem de tal sistema de maneira acessível, de forma que qualquer ente pode adotar tal solução com investimento mínimo, visto que o modelo proposto é aplicável a equipamentos comuns, inclusive a minicomputadores (como Raspberry Pi e similares) ou mesmo placas únicas de prototipagem eletrônica (como Arduino e afins).

Um sistema de monitoramento autônomo em tempo real que possibilite inclusive comunicar os canais necessários em situações emergenciais, permitirá com suficiente antecedência saber do grau de risco com que se está lidando, possibilitando realizar as correções necessárias (quando aplicável), ou mesmo evacuar as cercanias em casos extremos. Esta vigilância constante fornece mais tempo, que no caso de prevenção de acidentes e/ou evacuação pode significar a diferença entre a vida e a morte.

REFERÊNCIAS

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Economia mineral brasileira**. Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2021/03/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2021.

MAGELA, Geraldo Pereira. **Descrição de Casos de Rupturas de Barragens a partir da Década de 50, em Âmbito Mundial**. 2017. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Defesa e Segurança Civil, Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio de Janeiro, Niterói, 2017.

ÁVILA, Joaquim Pimenta de *et al.* Segurança de Barragens de Rejeitos no Brasil: Avaliação dos acidentes recentes. **Geotecnia**, Portugal, v. 152, n. 152, p. 435-464, jul. 2021. Mensal.

LADEIRA, Josias Eduardo Rossi *et al.* **Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Método Probabilístico**, XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo, 2007.

COSTA, Karoline Rodrigues. **Retroanálise de parâmetros em modelagens hidrodinâmicas hipotéticas e reais associadas ao rompimento da Barragem I - Brumadinho (MG)**. 2018. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2018.

Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens - SNISB (org.). **Cadastro de Barragens**. 2021. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/>. Acesso em: 03 dez. 2021

AMORIN, Júlio César Pereira. **Estudo Hipotético de Propagação de Onda Ruptura da Barragem do Reservatório Bom Jardim em Uberlândia - MG**. 2021. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

CORDEIRO, Bruno Teles. **Análise de Estabilidade e Percolação em Barragens de Terra: estudo de caso em um dique de terra homogênea**. 2021. 175 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2021.

TUCCI, Carlos E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1993. 938 p.