



**CEFET-MG**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**

**UNIDADE ARAXÁ**

**ENGENHARIA DE MINAS**

**ULISSES GUIMARÃES FILHO**

**A IMPORTÂNCIA DA INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA PARA  
A GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO**

**ARAXÁ/MG**

**2021**

**ULISSES GUIMARÃES FILHO**

**A IMPORTÂNCIA DA INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA PARA  
A GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE REJEITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Me. Yuri Cardoso Mendes

Coorientador: Me. Flávio Márcio Guimarães

**ARAXÁ-MG**

**2021**

**ULISSES GUIMARÃES FILHO**

**A IMPORTÂNCIA DA INSTRUMENTAÇÃO AUTOMATIZADA PARA  
A GESTÃO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Data de Defesa: Araxá, 19 de abril de 2021.

---

Orientador: Me. YURI CARDOSO MENDES  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

---

Coorientador: Me. FLÁVIO MÁRCIO GUIMARÃES  
Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte

---

Avaliador: Dr. ALEXANDRE MORAIS DE OLIVEIRA  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

---

Avaliador: Me. ALLAN ERLIKHMAN MEDEIROS SANTOS  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá

## RESUMO

Uma gestão de segurança de barragens, em especial as de rejeito mineral, para ser eficiente deve incluir no mínimo um estudo de geologia de fundação, estudos de mecânica de solos, método construtivo e escolha adequada do material de construção, programa de monitoramento geotécnico contínuo, inspeção visual feita por engenheiro qualificado, e uma auditoria externa feita por uma empresa especializada em segurança de barragens. O Brasil vivenciou grandes tragédias pelo colapso das barragens de Fundão e Feijão, em Mariana/MG e Brumadinho/MG, respectivamente. O potencial de dano dessas estruturas são catastróficos, e as incertezas sobre a estabilidade de barragens de rejeito, sobretudo as construídas à montante tornou-se uma preocupação de toda a sociedade. Para monitorar o comportamento estrutural de uma barragem durante a construção, enchimento e em sua atividade deve-se conhecer os módulos de falha que afetam sua estabilidade estrutural, e assim prescrever um conjunto de instrumentos necessários para um monitoramento geotécnico eficiente. Tradicionalmente, o monitoramento das barragens no Brasil, quando feita por instrumentos geotécnicos, são caracterizadas por leituras manuais que além de serem bastante susceptíveis ao erro humano, proporcionam uma interpretação atrasada das condições reais de comportamento e estabilidade da estrutura. Este trabalho visa comparar os principais instrumentos geotécnicos manuais com instrumentos automatizados, e suas relações com uma maior eficiência no monitoramento e controle de dados. Como resultado, obteve-se relações diretas entre variáveis e módulos de falha de barragens de terra e enrocamento, bem como o tipo de instrumentação recomendada para cada um deles. Depois, foram demonstradas comparações e discussões entre as alternativas automatizadas, e como o uso de novas tecnologias pode reduzir os erros referentes ao monitoramento e gestão de segurança, ajudando a prevenir ou evitar com grande antecipação uma eventual ruptura.

**Palavras-chave:** Geotecnia. Segurança de Barragens. Instrumentação Geotécnica. Monitoramento Automatizado.

## ABSTRACT

Safety management of dams, especially those of mineral tailings, to be efficient must include at least a study of foundation geology, studies of soil mechanics, construction method and appropriate choice of construction material, continuous geotechnical monitoring program, visual inspection by a qualified engineer, and an external audit by a company specializing in dam safety. Brazil experienced great tragedies due to the collapse of the Fundão and Feijão dams, in Mariana / MG and Brumadinho / MG, respectively. The damage potential of some of these structures can be catastrophic, and the uncertainties about the stability of tailings dams, especially those of upstream construction, has become a concern for the whole of society. To monitor the structural behaviour of a dam during construction, filling and in its activity, one must know the failure modules that affect its structural stability and then prescribe a set of instruments necessary for efficient geotechnical monitoring. Traditionally, the monitoring of dams in Brazil, when done by geotechnical instruments, is characterized by manual readings that, in addition to being quite susceptible to human error, provide a delayed interpretation of the real conditions of behaviour and stability of the structure. This work aims to compare the main manual geotechnical instruments with automated instruments and their relationship with greater efficiency in data monitoring and control. As a result, direct relationships were obtained between variables and failure modules of earth and rockfill dams, as well as the type of instrumentation recommended for each of them. Then, comparisons and discussions between the automated alternatives were demonstrated, and how the use of new technologies can reduce errors related to security monitoring and management, helping to prevent or avoid possible disruption with great anticipation.

**Keywords:** Geotechnics. Dam Safety. Geotechnical Instrumentation. Automated Monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Modelo de alteamento a montante.....   | 14 |
| Figura 2 – Modelo de alteamento a jusante.....  | 15 |
| Figura 3 – Modelo de alteamento por linha de centro.....  | 16 |
| Figura 4 – Classificação de barragens pelos órgãos fiscalizadores.....                              | 19 |
| Figura 5 – Galgamento (Overtopping).....  | 23 |
| Figura 6 – Galgamento (Overflowing).....  | 23 |
| Figura 7 – Erosão interna no aterro e na fundação.....  | 25 |
| Figura 8 – Falha circular no talude de jusante.....   | 26 |
| Figura 9 – Medidor de vazão triangular (exemplo).....   | 31 |
| Figura 10 – Esquema de um piezômetro Standpipe instalado.....                                       | 32 |
| Figura 11 – Esquema de transdutor de corda vibrante.....  | 35 |
| Figura 12 – Modelo VW2100.....  | 35 |
| Figura 13 – Modelo VW2100-DPC.....  | 36 |
| Figura 14 – Seção sensoriada Shape Array Accelerometer.....   | 37 |
| Figura 15 – Modelos Measurand SAAV e SAAScan.....   | 37 |
| Figura 16 – Exemplo de aplicação do monitoramento remoto em uma barragem alteada a<br>montante..... | 45 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1 – Categoria de Risco e Dano Potencial Associado.....                            | 18 |
| Quadro 2 – Correlação entre módulo de falha, variáveis e instrumentação recomendada..... | 42 |
| Quadro 3 – Correspondências de Instrumentação.....                                       | 43 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|        |  |
|--------|--|
| ANA    | Agência Nacional de Águas                                    |
| CNRH   | Conselho Nacional de Recursos Hídricos                       |
| CRI    | Categoria de Risco   |
| DPA    | Dano Potencial Associado                                     |
| INA    | Indicador de Nível e Água                                    |
| PAE    | Plano de Ação Emergencial                                    |
| PNSB   | Política Nacional de Segurança de Barragens                  |
| RSB    | Relatório de Segurança de Barragens                          |
| SAA    | Shape Array Accelerometer                                    |
| SINIMA | Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente        |
| SNISB  | Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens |



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>2.1 Barragens de Rejeito .....</b>                                       | <b>13</b> |
| 2.1.1 CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO .....                              | 13        |
| 2.1.2 MÉTODOS DE ALTEAMENTO.....  | 14        |
| 2.1.3 LEI Nº 12.334 E A POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE<br>BARRAGENS..... | 16        |
| 2.1.4 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS PELA PNSB.....                             | 18        |
| <b>2.2 Geotecnia e Segurança de Barragens.....</b>                          | <b>19</b> |
| 2.2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS.....   | 20        |
| <b>2.3 Módulos de Falha em Barragens.....</b>                               | <b>22</b> |
| 2.3.1 GALGAMENTO .....  | 22        |
| 2.3.2 LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA .....   | 23        |
| 2.3.3 RECALQUE DIFERENCIAL .....  | 24        |
| 2.3.4 EROÇÃO INTERNA (PIPING).....  | 24        |
| 2.3.5 RUPTURA CIRCULAR (INSTABILIDADE DE TALUDE).....                       | 25        |
| <b>2.4 Monitoramento Geotécnico.....</b>                                    | <b>26</b> |
| 2.4.1 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM MONITORADOS .....                      | 27        |
| 2.4.2 MEDIDAS PONTUAIS.....   | 28        |
| 2.4.3 PROBLEMAS E RISCOS DE LEITURAS MANUAIS .....                          | 29        |
| <b>2.5 Automação e Monitoramento de Barragens .....</b>                     | <b>29</b> |
| <b>2.6 Instrumentos de Monitoramento Geotécnico.....</b>                    | <b>30</b> |
| 2.6.2 PIEZÔMETROS CASAGRANDE OU <i>STANDPIPE</i> .....                      | 32        |
| 2.6.3 INCLINÔMETROS .....   | 33        |
| 2.6.4 PIEZÔMETROS DE CORDA VIBRANTE.....                                    | 34        |
| 2.6.5 SHAPE ARRAY ACCELEROMETER (SAA).....                                  | 36        |
| <b>3 METODOLOGIA.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>3.1 Roteiro.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>3.2 Fontes de pesquisa.....</b>  | <b>38</b> |
| <b>3.3 Estruturação.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                      | <b>42</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>                 | <b>47</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b> | <b>48</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O sucesso de uma estrutura geotécnica, em especial de barragens, depende diretamente de fatores de projeto, e de um programa de monitoramento bem elaborado. Os casos de barragens de rejeito desde sempre se revelam como um empecilho para a mineração. Muitas vezes, os rejeitos minerais não são economicamente aproveitáveis, e não há nenhum processo viável a ser feito com este material, a não ser a sua estocagem em barragens.

Porém, essas estruturas de longa vida útil que muitas vezes estão associadas a grandes potenciais de danos ambientais e sociais vitalícios em caso de falha. Desta forma, são necessários constantes aprimoramentos para um melhor controle operacional e otimização das metodologias de monitoramento geotécnico em todas as etapas e fases – construtivas e operacionais. Os elementos construtivos e o monitoramento eficiente podem proporcionar melhores condições de segurança para a barragem e aos que por ela podem ser efetivamente afetados.

Os recentes casos de falha em Mariana-MG e Brumadinho-MG, além da iminência de deslizamento de outras barragens no Brasil ressaltam a importância da implementação de novas tecnologias e uma possível revisão nos métodos e legislação que envolvem barragens de rejeito. As perdas humanas e ambientais geraram prejuízos incalculáveis não só aos responsáveis, mas principalmente para aqueles que foram afetados direta ou indiretamente pelos acidentes.

No território nacional, a maior parte das gestões de monitoramento destas estruturas seguem métodos e instrumentos manuais para obtenção de dados e medidas. Esses métodos, além de uma baixa periodicidade de leituras apresentam outros problemas operacionais, e algumas vezes funcionais a longo prazo. Isso resalta a necessidade de inovação nestes métodos, e uma instrumentação automatizada pode ser um importante componente para trazer melhorias na gestão de segurança de barragens de rejeito.

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas a instrumentação geotécnica pode se mostrar um forte aliado para uma detecção breve de problemas estruturais de barragens de rejeito, e assim direcionar possíveis soluções enquanto ainda há tempo, ou buscar uma forma de reduzir os danos associados aquela determinada estrutura. Existem instrumentos

automatizados correspondentes a vários dos principais instrumentos manuais de monitoramento básico, e muitos ainda estão sendo desenvolvidos.

Portanto, para implementações destes equipamentos, é necessário a ação de pesquisas que os relacionem e proponham modelos de monitoramento para determinado tipo de módulo de falha, e adaptar a uma condição característica – cada estrutura tem as suas particularidades. Diante deste panorama, buscar evoluir e aprimorar os métodos de monitoramento, para garantir uma melhor gestão de segurança para barragens de rejeito, em especial a longo prazo, quando normalmente os problemas são agravados. Podendo assim oferecer um melhor cenário de credibilidade e comprometimento com a sociedade e o meio ambiente.

O objetivo geral deste trabalho consiste na determinação dos módulos de falha aos quais barragens de rejeito estão suscetíveis e determinar os instrumentos geotécnicos básicos para cada um destes módulos. Como objetivos específicos, a determinação dos comportamentos que afetam a estabilidade, apresentando os equipamentos necessários no monitoramento, com uma abordagem aos equipamentos manuais mais citados em pesquisas científicas. Desta forma, correlacioná-los com os equipamentos que correspondem as suas versões automatizadas.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Barragens de Rejeito**

O beneficiamento mineral segue uma rota de processo sugerida por um estudo (principalmente) de viabilidade financeira, química e física de métodos possivelmente aplicáveis em relação ao tipo de minério a ser explorado. Tais métodos, por sua vez, em sua grande maioria utilizam água no circuito de beneficiamento. Os resíduos gerados não aproveitáveis, são denominados “rejeitos”. A retenção de rejeitos na mineração é feita por tanques ou barramentos (MACHADO, 2007). Como ainda podem apresentar considerável quantidade de água, majoritariamente vê-se como necessária a estocagem deste material em estruturas de contenção projetadas, as Barragens de Rejeito.

Barragens de rejeito são aterros normalmente construídos com solo e material não aproveitável da lavra (estéril), para armazenar os rejeitos gerados numa planta de beneficiamento de minério. As barragens de rejeito variam consideravelmente em termos de métodos construtivos, tipo de rejeito que armazenam, suas respectivas características particulares e como funcionam suas gestões e operações (MARTA ROCA, 2019).

As barragens são estruturas complexas e sensíveis a erros, por isso é necessária atenção especial no desenvolvimento de um projeto, um planejamento detalhado e que envolve muitas áreas de estudo, desde os fatores de projeto, operação e ao longo de toda a sua vida útil. De uma forma geral, são parte do processo produtivo em uma mina, sendo muitas vezes fundamentais na viabilização de um projeto de mineração.

#### **2.1.1 CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO**

Em geral, as barragens de rejeito são construídas através de um dique de partida, que utiliza material impermeável. Caso o solo local não apresente as características adequadas para a construção do dique, pode-se usar material argiloso compactado para que essa região se torne uma zona impermeável, livre de zonas de percolação. Zonas localizadas de percolação geram transferência de energia da água para o solo. A energia transferida é medida pela perda de carga e a força correspondente a energia é chamada de força de percolação, e esta tem o mesmo sentido do fluxo. É necessário o conhecimento e medida desta força, pois ela pode ser

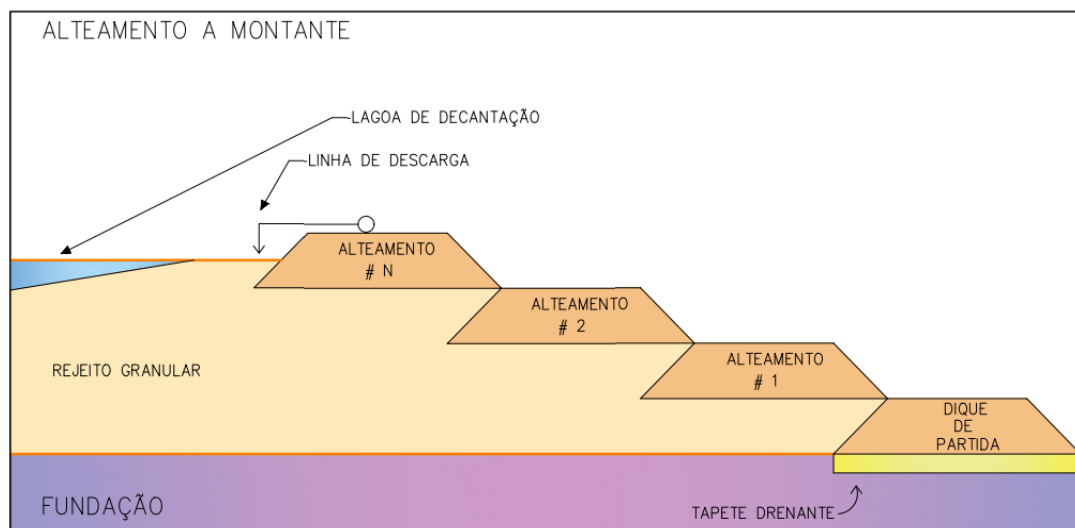
responsável por instabilidade no talude do barramento. Caso ocorra um fluxo de gradiente elevado na fundação, pode ocorrer o arraste dos grãos e o rompimento da estrutura. Em barragens de solo, como ocorre em maioria para rejeitos, a erosão interna é um problema muito comum, devido a ação da força de percolação (MACHADO, 2007).

### 2.1.2 MÉTODOS DE ALTEAMENTO

Nos métodos de construção, é comum que a barragem seja feita primeiramente com uma altura inicial. De acordo com o aumento da produção de rejeitos, a barragem é então alteada, para aumentar a sua capacidade. Esta concepção permite que o investimento total na barragem seja feito em etapas. Nos fatores de projeto deve-se levar em consideração qual método de alteamento será utilizado naquela estrutura, para avaliar sua viabilidade.

- **Alteamento à Montante:** representado na Figura 1, este método utiliza o próprio rejeito como base para executar o alteamento. O rejeito é lançado à montante ao longo da crista, onde se forma uma “praia”, que será a fundação do próximo alteamento (MACHADO, 2007).

Figura 1 - Modelo de alteamento a montante.



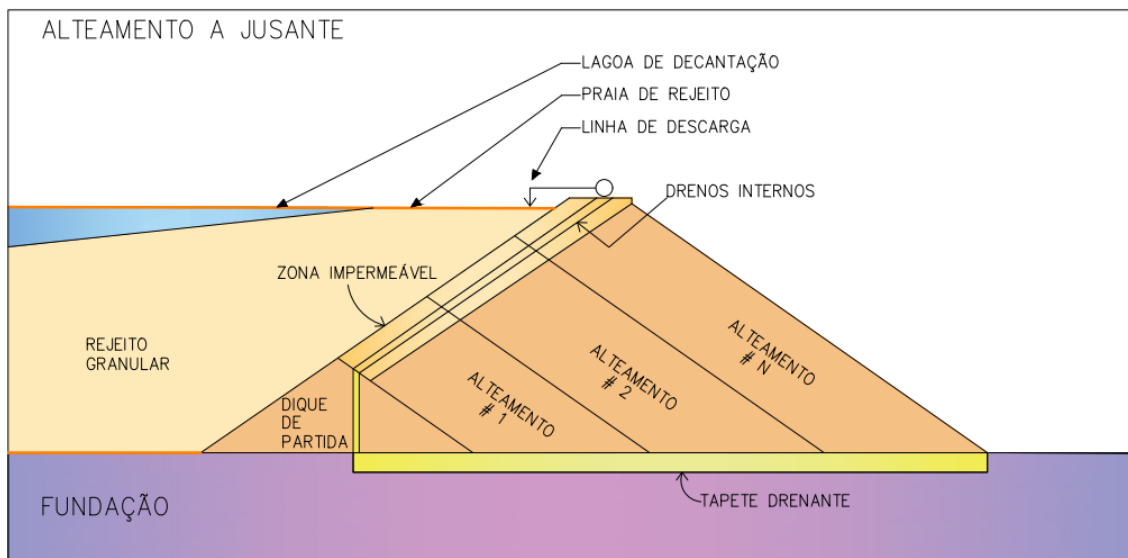
Fonte: Autoria própria.

Procede-se a disposição do rejeito utilizando ciclones sobre o dique, de modo a separar as frações grosseiras das mais finas. A separação tem intuito de formar o talude de jusante do aterro, pois esta tem maior coeficiente de permeabilidade e maior resistência, enquanto a fração de finos fica no interior do reservatório. Este método é majoritariamente aplicado pois

apresenta maior viabilidade em termos econômicos. Em contrapartida, apresenta depósitos com menor coeficiente de segurança, estando sujeito ao fenômeno de liquefação estática de difícil antecipação (OLIVEIRA, 2014).

- Alçamento à Jusante: esta modalidade apresenta um deslocamento do eixo do dique a jusante do barramento, como mostra a Figura 2. Não envolve obras dentro do reservatório. É o método mais eficiente em termos de controle das forças de percolação. As forças se dissipam a uma distância segura da face em construção.

Figura 2 - Modelo de alçamento a jusante.



Fonte: Autoria própria.

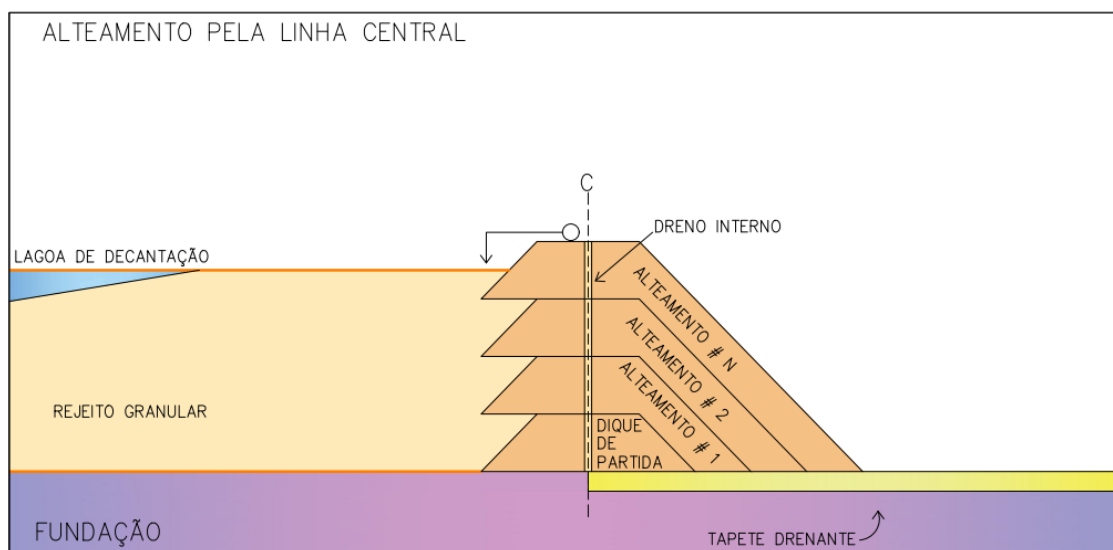
Este método se mostra mais caro em termos de investimento, pois utiliza-se maior volume de material para a sua realização, também necessita de maior área a jusante do talude do barramento. Além disso, é também necessário o deslocamento do sistema de monitoramento, levando os instrumentos para a nova face construída (MACHADO, 2007). Devido ao alto investimento, esse método é menos utilizado que o de montante.

- Alçamento por Linha de Centro: se mostra como uma alternativa intermediária entre os métodos de alçamento a montante e a jusante, em termos de segurança e investimento. O seu comportamento se aproxima mais do método de jusante. Neste caso, o eixo do barramento não é deslocado. Assim, o material mais grosseiro é lançado a jusante, e a montante da estrutura é depositado o material mais fino, tendo como referência a linha posicionada sobre o dique de partida. O lançamento de material é usualmente feito após a classificação por

hidrociclones, que ficam posicionados no eixo central da barragem, o que dá o nome ao método: “Linha de Centro”.

O controle da linha de saturação é aceitável utilizando zonas de drenagem interna em todas as fases do alteamento (MACHADO, 2007). É um método intermediário entre custo e segurança entre os dois previamente citados, representado na Figura 3:

Figura 3 - Modelo de alteamento por linha de centro.



Fonte: Autoria própria.

### 2.1.3 LEI Nº 12.334 E A POLÍTICA NACIONAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS

Devido à ocorrência de acidentes e vistos os riscos associados a essas estruturas, o Governo Federal sancionou a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010: “Art. 1º - Esta Lei estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB)” (BRASIL, 2010). Foram criados então o PNSB e o SNISB, com objetivo de, basicamente registrar, classificar e normalizar as situações de todas as barragens do Brasil. De acordo com a Seção 1 da supracitada lei:

As barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). A classificação por categoria de risco em alto, médio ou baixo será



feita em função das características técnicas, do estado de conservação, e do atendimento ao Plano de Segurança de Barragem. A classificação por categoria de dano potencial associado à barragem em alto, médio ou baixo será feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (BRASIL, 2010).

Um ponto importante da Lei nº 12.334 é a delimitação de quais barragens estão ou não incluídas na PNSB. A estrutura deve apresentar pelo menos uma das seguintes características:

- 1 Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>;
- 2 Altura do maciço, do ponto mais alto até a crista, maior que 15 m;
- 3 Reservatório que contenha resíduos perigosos, conforme normas técnicas aplicáveis;
- 4 Categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º (BRASIL, 2010).

Ficaram estabelecidos os instrumentos da PNSB e, de acordo com o Art. 6º da Lei nº 12.334 (BRASIL, 2010),

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

- O sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
- O Plano de Segurança da Barragem;
- O Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
- O Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA);
- O Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental;
- O Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais;
- O Relatório de Segurança de Barragens (RSB); (BRASIL, 2010).

A partir de então, tem-se como obrigatórias diretrizes como o Plano de Segurança da Barragem, um documento que contém informações específicas, sendo, no mínimo:

- 1 Identificação do empreendedor;
- 2 Dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, e “as built” (para barragens construídas após a promulgação da Lei nº 12.334);
- 3 Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança de barragens;
- 4 Manuais de procedimentos dos roteiros de inspeção, e relatórios de segurança;
- 5 Revisões periódicas de segurança;

- 6 Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e a operação da barragem;
- 7 Plano de Ação Emergencial (PAE), quando necessário;
- 8 Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem.

#### 2.1.4 CLASSIFICAÇÃO DE BARRAGENS PELA PNSB

O sistema de classificação de barragens é um dos sete instrumentos da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Ele determina os procedimentos a serem adotados, e a periodicidade das inspeções das estruturas, e condicionar a elaboração do Plano de Ação critérios gerais de classificação de barragens por aspectos como dano potencial associado, categoria de risco e capacidade volumétrica da barragem. Como características técnicas que podem ser ressaltadas a altura da barragem, o comprimento, o tipo de barragem (quanto ao material de construção e ao resíduo nela depositado), o tipo de fundação, a idade da barragem, a vazão de projeto e o estado de conservação da estrutura. O Quadro 1 mostra como acontece a classificação de barragens no Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA):

Quadro 1 - Categoria de Risco e Dano Potencial Associado.

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

Fonte: Anexo 1 da Resolução ANA nº 91/2012.

Tem-se então que, as classes A, B, C, D e E são os níveis de risco, onde A representa o maior risco, e E o menor. A Categoria de Risco (CRI) representa a probabilidade de falha e inclui o tipo de material estocado, as características físico-químicas dos rejeitos e o Dano Potencial Associado (DPA) seria a consequência de uma ruptura. As barragens de classe A e B estão obrigatoriamente enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Foram classificadas 723 barragens com DPA e CRI alto (RSB, 2017), como mostra a Tabela 1, uma tabela de situação de classificação também disponível no Relatório de Segurança de Barragens (RSB) enviado ao Congresso nacional em 2017.

Figura 4 - Classificação de barragens pelos órgãos fiscalizadores.

| UF  | Órgão Fiscalizador | Classificadas quanto ao DPA | Classificadas quanto à CRI | DPA alto | CRI alto | DPA e CRI altos |
|-----|--------------------|-----------------------------|----------------------------|----------|----------|-----------------|
| AC  | IMAC               | 58                          | 58                         | 0        | 21       | 0               |
| AL  | SEMARH             | 87                          | 87                         | 12       | 21       | 07              |
| AM  | IPAAM              | 0                           | 0                          | 0        | 0        | 0               |
| AP  | IMAP               | 2                           | 2                          | 1        | 0        | 0               |
| BA  | INEMA              | 328                         | 320                        | 286      | 204      | 186             |
| CE  | SRH                | 119                         | 98                         | 117      | 8        | 8               |
| DF  | ADASA              | 50                          | 0                          | 0        | 0        | 0               |
| ES  | AGERH              | 19                          | 19                         | 8        | 4        | 2               |
| GO  | SECIMA             | 0                           | 0                          | 0        | 0        | 0               |
| MA  | SEMA               | 32                          | 8                          | 8        | 1        | 1               |
| MG  | SEMAD              | 56                          | 52                         | 30       | 1        | 1               |
| MS  | IMASUL             | 210                         | 176                        | 42       | 29       | 12              |
| MT  | SEMA               | 180                         | 0                          | 7        | 0        | 0               |
| PA  | SEMAS              | 22                          | 23                         | 5        | 6        | 5               |
| PB  | AESA               | 236                         | 445                        | 203      | 399      | 162             |
| PE  | APAC               | 429                         | 427                        | 74       | 99       | 62              |
| PI  | SEMAR              | 13                          | 31                         | 13       | 31       | 13              |
| PR  | AGUASPARANA        | 49                          | 49                         | 19       | 8        | 4               |
| RJ  | INEA               | 29                          | 8                          | 6        | 3        | 2               |
| RN  | IGARN              | 244                         | 242                        | 244      | 216      | 215             |
| RO  | SEDAM              | 71                          | 71                         | 9        | 15       | 2               |
| RR  | FEMARH             | 11                          | 6                          | 1        | 1        | 0               |
| RS  | SEMA               | 1.345                       | 0                          | 1.072    | 0        | 0               |
| SC  | SDS                | 0                           | 0                          | 0        | 0        | 0               |
| SE  | SEMARH             | 19                          | 19                         | 9        | 10       | 3               |
| SP  | CETESB             | 1                           | 0                          | 1        | 0        | 0               |
| SP  | DAEE               | 0                           | 0                          | 0        | 0        | 0               |
| TO  | NATURATINS         | 31                          | 17                         | 3        | 3        | 3               |
| FED | ANA                | 138                         | 70                         | 84       | 21       | 14              |
| FED | ANEEL              | 890                         | 890                        | 527      | 16       | 15              |
| FED | ANM                | 790                         | 425                        | 204      | 7        | 6               |
|     | TOTAL              | 5.459                       | 3.543                      | 2.985    | 1.124    | 723             |

Fonte: Relatório de Segurança de Barragens 2017.

Quando exigido, o Plano de Ação Emergencial (PAE) precisa ser elaborado. Em suma, o PAE estabelece as diretrizes necessárias de atuação em situações de emergência, como num caso de ruptura de barragem. O PAE tem por finalidade coordenar e integrar as ações de todos, em todos os setores da empresa e até em outras instituições que estão possivelmente envolvidas em situações que podem ter alto dano potencial, a fim de se reduzir danos a pessoas e/ou ao patrimônio nas decorridas ocasiões.

## 2.2 Geotecnia e Segurança de Barragens

A Geotecnia é a ciência que estuda os materiais disponíveis na crosta e suas respectivas características, para usos e aplicações na engenharia, testes/estudos envolvendo geologia, mecânica dos solos, mecânica das rochas, hidrogeologia e sismografia para interpretar determinada situação e embasar uma possível solução.

As primeiras preocupações relativas ao monitoramento do comportamento de barragens e estruturas geotécnicas foram iniciadas na década de 50. Nos anos de 1960 dá-se o ponto de partida em medições de deslocamentos horizontais por meio de inclinômetros, e a instalação de medidores de pressão total na interface fundação/barramento. Pela década de 70 iniciaram-se as preocupações e estudos relacionadas a tensão e deformação (MACHADO, 2007).

### 2.2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

A Segurança de Barragens é uma área de estudos multidisciplinar. Os fatores de projeto de uma barragem são fundamentais para o sucesso da estrutura, e serão definidos em função da finalidade da barragem. Alguns parâmetros prévios são definidos para um bom planejamento e execução de uma obra de barragem, revisados em sala durante a matéria Geotecnia Aplicada a Mineração, ministrada pelo professor Dr. Felipe de Moraes Russo, no primeiro semestre do ano de 2018. Dentre os mais importantes, podem ser citados:

- Estudos geológicos, definição da geologia local, das características geológicas, os tipos de estruturas que ali se encontram, desde a gênese até os eventos que ocasionam as falhas, levantamento de falhas e orientações das descontinuidades das estruturas geológicas.
- Estudos geotécnicos, para um conhecimento aprofundado sobre as características geotécnicas daqueles materiais, como resistência uniaxial, ao cisalhamento, entre outros. As barragens são sensíveis a problemas de fundação, então erros nestes estudos podem implicar em danos severos a estrutura posteriormente. Para o material que irá compor o barramento, essas propriedades auxiliam a determinar os módulos de falha que a barragem estará sujeita.
- Estudos hidrológicos para a definição dos volumes em casos de cheias, para dimensionar bacias de amortecimento e vertedouros. Um mau dimensionamento pode causar um transbordo que leva a estrutura a se romper por galgamento. Além disso, um estudo hidrológico fornece regularização de cheia da região, de forma a definir o volume de água disponível no sistema para atender a usina. A definição desses dados são fator de risco para a operação de barragens.

- Estudos hidrogeológicos, pois nas barragens a percolação (envolve a condutividade hídrica do material) é fator de alto risco. O modelamento hidrogeológico define parâmetros adequados para correção de problemas de fluxo pela fundação e pelo talude.
- Estudos topográficos, para a definição e locação da barragem. Uma distância maior da barragem em relação a usina pode ocasionar em maiores gastos com bombas e manutenções dos dutos. É importante também uma análise da cota da locação da barragem, onde as áreas de maior risco são definidas a jusante da estrutura. É interessante que seja estrategicamente posicionada a fim de reduzir os possíveis danos de uma eventual ruptura.
- Controle tecnológico construtivo e “as Built” - como construído. O controle tecnológico é exigido pela complexidade e dimensão da obra, um controle de construção é necessário. O “as Built” é um documento (livro) que representa tudo o que ocorre na construção da barragem. Tudo que foi feito, relocação de estruturas, escolhas de material, desenhos topográficos, qualquer coisa que for alterada deve estar documentada neste livro, que é exigido pela PNSB.
- Controle Operacional - como formação de praia, granulometria e saturação. Confecção do manual operacional da barragem, treinamento de toda a equipe envolvida, desde os operadores até a alta gerência da empresa, para que as operações unitárias sejam devidamente desempenhadas desde a construção da barragem até a sua operação ao longo de toda a sua vida útil, reduzindo chances de falha. Fatores operacionais mal desenvolvidos podem gerar problemas crônicos na estrutura.
- Controle de Instrumentação - este é determinado em função de possíveis módulos de falha a qual a estrutura está sujeita. Os fatores que controlam a estabilidade estrutural, como poro-pressão, deformações sub-horizontais, condutibilidade hidráulica do material depositado e recalque definem quais instrumentos geotécnicos mínimos serão necessários para o sucesso do programa de monitoramento e sua adequada implementação. Uma maior frequência na coleta e conseqüente leitura e interpretação de dados são importantes para a detecção de possíveis problemas estruturais.

Um monitoramento geotécnico eficiente é indispensável em termos de Segurança de Barragens, visto que nenhuma estrutura está imune ao risco de falha. Segundo Silva *et al.* (2015) “Risco de falha” está relacionado a algum comportamento anômalo, “movimentos não admissíveis” que podem ocasionar acidentes. As metodologias de monitoramento também devem ser abordadas no Plano de Segurança de Barragem, estabelecido pela Lei nº 12.334.

Além dos fatores de projeto, podem-se destacar os fatores operacionais, pois apenas seguindo o manual operacional é possível garantir a segurança atrelada a continuidade do funcionamento da estrutura ao longo de sua vida útil, e por isso treinamentos e auditorias de segurança são peças-chave para o seu bom funcionamento, mantendo elevado o nível de qualificação de funcionários, operadores e responsável técnico, alta gerência da empresa, ou seja, toda a equipe envolvida.

### **2.3 Módulos de falha em Barragens**

A caracterização apropriada dos módulos de falha a qual uma barragem está sujeita é a chave para uma gestão de risco eficiente, e o entendimento de tais fenômenos ajudam na avaliação de desempenho dessas estruturas (MARTA ROCA, 2019). Logo, é necessário tal conhecimento para determinar os métodos de monitoramento que melhor atendem as necessidades da estrutura em questão.

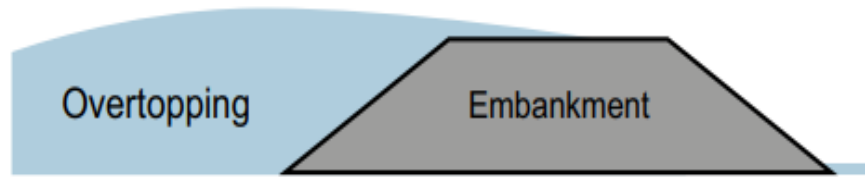
#### **2.3.1 GALGAMENTO**

Galgamento ou “Transbordo” é um módulo de falha ao qual diversas barragens estão sujeitas, seja por um mau dimensionamento de vertedouros e bacias de amortecimento, drenagem deficiente ou insuficiente, ou por um índice pluviométrico descontrolado, muito acima do esperado pela meteorologia. É caracterizado como um tipo de transbordamento da barragem. A carga hidrostática (e conseqüentemente a carga total) ultrapassa a capacidade de resistência da barragem, e o talude de jusante fica saturado, perdendo resistência, causando a ruptura da barragem.

O Galgamento pode ocorrer de duas formas, que não necessariamente são distintas no rompimento da barragem, mas podem ser distintas pela causa (MARTA ROCA, 2019):

- **Overtopping:** ocorre pela ação de ondas na crista da barragem. Dentre as principais causas, destacam-se ventos fortes, deslizamentos (instabilidade de talude), erros de projeto de dimensionamento e design da estrutura. Observa-se o seu efeito conforme a Figura 4.

Figura 5 - Galgamento (Overtopping).

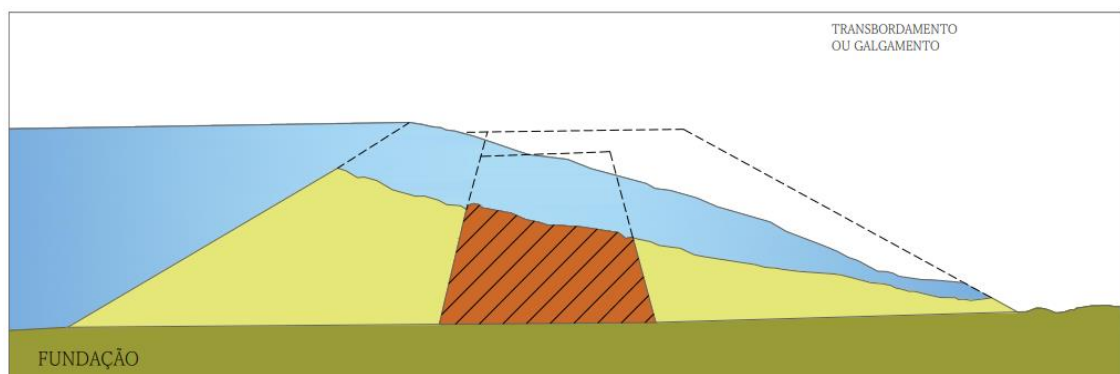


Fonte: MARTA ROCA et al., 2019.

O Overtopping pode causar o excesso de esforços antes mesmo de passar sobre o aterro, e então romper a barragem, como também pode ultrapassar a cota topográfica do aterro resultando no overflowing.

- Overflowing: A Figura 5 exemplifica o overflowing, que é o nome dado ao fenômeno de overtopping que é mantido acima da crista da barragem, e então o nível de água ultrapassa o aterro e causa a ruptura.

Figura 6 - Galgamento (Overflowing).



Fonte: Autoria própria.

### 2.3.2 LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA

Uma barragem está sujeita a Liquefação Estática quando o material é muito fino, e possui baixa condutibilidade hidráulica. Também ocorre em materiais granulares como areia e areia siltosa, quando atingem seu limite de saturação. Sob elevadas poro-pressões e elevadas cargas verticais, o material tende a se mover de forma súbita, de forma que os drenos não são capazes de aliviar a pressão a tempo.

Na interface água-ar-sólido, as áreas mais comprimidas do material adquirem então um comportamento fluido, conseqüentemente perde as principais características de resistência

mecânica e causa a ruptura. A liquefação é um fenômeno que acontece de forma rápida, e é difícil de ser detectado, causando repentinamente a perda de resistência do solo.

### 2.3.3 RECALQUE DIFERENCIAL

O Recalque Diferencial é ocasionado por movimentos anômalos ascendentes e descendentes na fundação, que podem causar trincas e rachaduras no talude, reduzir a sua resistência, ocasionando na ruptura do mesmo. De acordo com Silveira (2006), os recalques de maior magnitude ocorrem no eixo da barragem, onde ocorre o máximo de tensões verticais. Esta ação pode causar as trincas e fissuras com maior potencial de falha, que são aquelas que ocorrem numa posição transversal ao eixo da barragem. Elas criam uma concentração de fluxo e ocasionam no rompimento da barragem.

Segundo Silveira (2006) e Almeida (2010), nas fases construtivas e de enchimento de barragens de terra e enrocamento (onde se enquadram as barragens de rejeito), a estrutura sofre ação de recalques : recalque de fundação, recalque no maciço e recalques diferenciais. Estes comportamentos devem ser previstos ainda na fase de projeto, para que seus efeitos sejam minimizados e não comprometam a estabilidade.

O monitoramento de recalques é uma importante etapa no programa de monitoramento. Existem zonas ao longo da barragem que se mostram suscetíveis a trincas e fissuras, chamadas “zonas críticas”, como vales estreitos e ombreiras irregulares. Esses locais devem ser monitorados. A medição dos diferenciais transversais se faz necessária para pontuar o recalque diferencial máximo tolerável para aquela barragem (SILVEIRA, 2006).

### 2.3.4 EROSÃO INTERNA (PIPING)

O fenômeno de Piping é causado pelo material heterogêneo ou mal compactado na estrutura da barragem. Está bastante relacionado a metodologia construtiva da barragem, e do mau desenvolvimento de alguma de suas etapas. De acordo com Berrones e Acosta (2011), é um processo que envolve o carreamento de sólidos componentes do aterro, na sua fundação ou em ambos: é causado pelo fluxo de água e infiltração em barragens e outras estruturas construídas com terra.

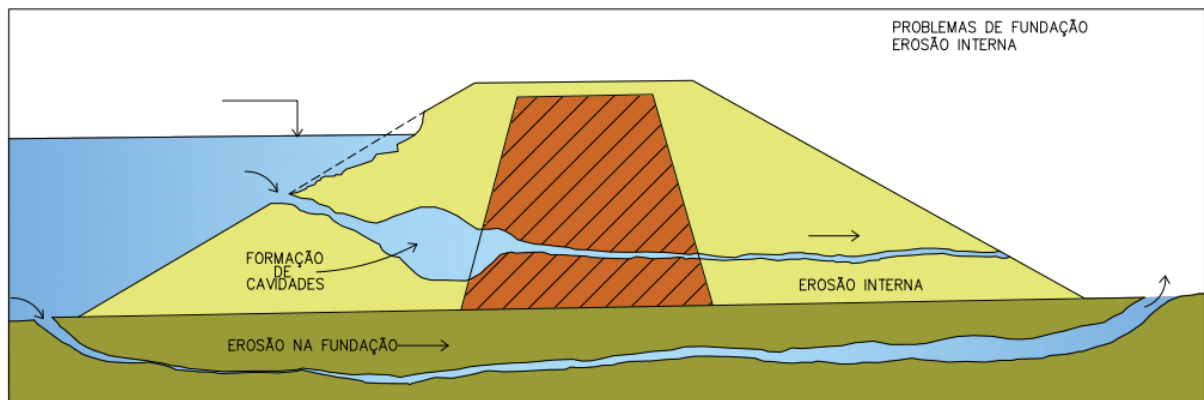


Vários fatores podem estar envolvidos nesse processo (BERRONES, 2011):

- Erodibilidade do solo;
- Velocidade da água dentro do aterro ou fundação;
- Geometria do maciço;
- Homogeneidade e anisotropia da estrutura (relacionado muitas vezes a fatores construtivos);
- Grau de compactação do solo;
- Condutividade hidráulica dos materiais constituintes do aterro ou fundação.

Os materiais heterogêneos ou mal compactados podem contribuir para o desenvolvimento de “dutos” internos, criando linhas de fluxo preferencial do fluido e causam o arraste de material dentro do talude de jusante. O aumento desse fluxo causa um aumento de poro-pressões em determinadas áreas, e carreamento do material que compõe o talude e/ou a fundação da barragem, causando a erosão interna e por consequência o rompimento, como mostrado na Figura 6:

Figura 7 - Erosão interna no aterro e na fundação.



Fonte: Autoria própria.

Alguns pontos importantes devem ser destacados para tentar reduzir a ação desse módulo de falha, como bom dimensionamento do sistema de drenagem e impermeabilização de áreas alvo (BERRONES, 2011).

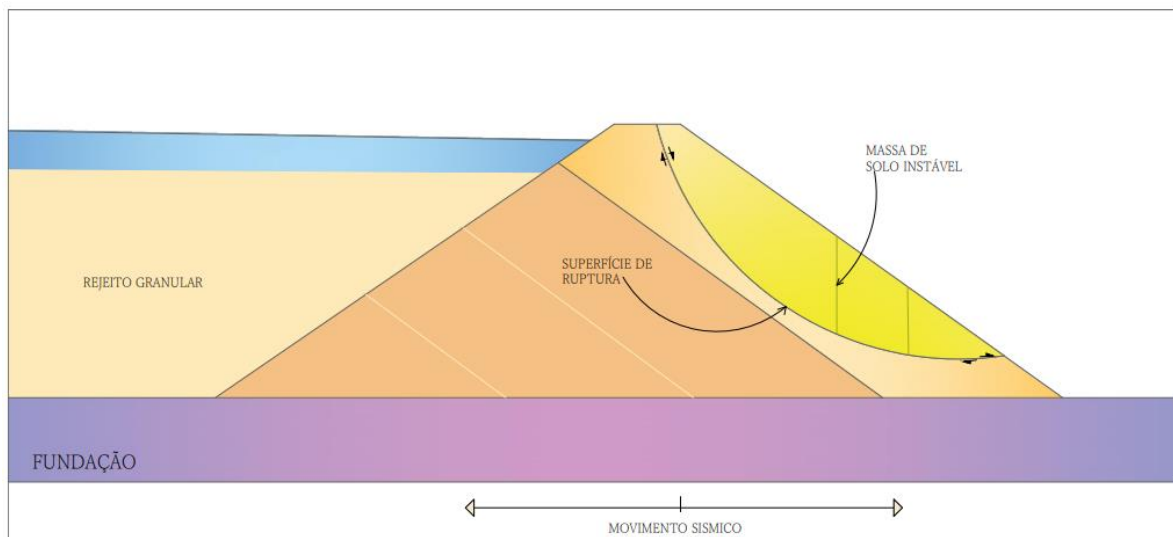
### 2.3.5 RUPTURA CIRCULAR (INSTABILIDADE DE TALUDE)

A ruptura circular ocorre quando os esforços de cisalhamento numa barragem excedem o limite de resistência do material, que resultam numa falha rotacional ou circular (por

escorregamento), o que pode acarretar Overtopping ou o rompimento da barragem (MARTA ROCA, 2019).

Existem vários casos em que é necessário considerar as forças geradas pelos fluxos de água para avaliar a estabilidade do talude de uma estrutura, pois o aumento da pressão da água trará uma redução de tensões efetivas, reduzindo conseqüentemente a resistência do solo ao cisalhamento. Um aumento do fluxo de água pode então diminuir o fator de segurança de uma barragem, e gerar uma falha (BERRONES, 2011). Tal fenômeno pode ser visualizado na Figura 7:

Figura 8 - Falha circular no talude de jusante.



Fonte: Autoria própria.

## 2.4 Monitoramento Geotécnico

Em casos de obras de engenharia de grande porte, os níveis de risco não estão relacionados apenas a perdas materiais e financeiras, mas acidentes nessas estruturas podem trazer graves perdas humanas e ambientais. Neste caso, são desenvolvidos instrumentos para acompanhar as informações mais importantes relacionadas ao comportamento de determinada barragem (MACHADO, 2007).

O planejamento de um programa de monitoramento de uma barragem de rejeito segue uma sequência de passos lógicos, que tem início com a definição de condições de instabilidade a qual a barragem está sujeita, e termina com o planejamento, seleção dos instrumentos e

implementação de parâmetros que estão envolvidos nas determinadas condições (SILVEIRA, 2006). Infere-se que é necessário um estudo rigoroso, detalhado e preciso sobre os módulos de falha que envolvem determinada estrutura, para então determinar as variáveis críticas a serem monitoradas. A partir deste ponto, determina-se o objetivo da instrumentação para um monitoramento adequado, ajudando a prevenir/antever um colapso estrutural.

#### 2.4.1 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS A SEREM MONITORADOS

Os parâmetros que envolvem a estabilidade da estrutura são diversos, e pode-se incluir a pressão da água nos poros, a pressão da água na rocha de fundação, as pressões totais, os recalques, os deslocamentos, as cargas e tensão nos elementos estruturais, a temperatura, as vazões de drenagem, entre outros (SILVEIRA, 2006).

Em geral, tais parâmetros são particulares em cada tipo de método construtivo, dependendo das respectivas características geotécnicas, granulométricas e hidrogeológicas do rejeito e do aterro.

Além destes tipos de parâmetros, também se caracteriza como situação anômala de risco os problemas de movimentação não admissíveis de uma barragem, e podem envolver (SILVA, 2015) e (MACHADO, 2007):

- Deslocamentos e Deformações na subsuperfície;
- Percolação excessiva da água dentro do talude ou da fundação;
- Distribuição de tensões;
- Níveis piezométricos da fundação;
- Pressões de água pontuais e globais;
- Vazão.

Tais dados devem ser confrontados com os valores estimados no modelamento teórico, para avaliar corretamente o desempenho da estrutura e do projeto em si. Desta forma, faz-se necessário que as leituras sejam feitas com a frequência adequada para que as devidas decisões sejam tomadas em tempo hábil.

## 2.4.2 MEDIDAS PONTUAIS

A maior parte das medições dos parâmetros monitorados envolvem pressão, tensões, cargas e temperaturas determinadas para uma pequena região da estrutura. Desta forma, são usualmente feitas medições pontuais, e podem, portanto, não representar as feições em grande escala, requerendo reunir muitos dados de diferentes pontos de medida para confiabilidade das medidas. Por outro lado, instrumentos que medem variáveis relacionadas a movimentação da barragem podem ser representativos por atuarem numa zona maior e mais representativa (SILVEIRA, 2006).

Todavia, necessita-se de uma combinação de monitoramentos: de comportamentos (movimentações da barragem) e parâmetros estruturais internos, que governam a estabilidade. Pode-se destacar (CERQUEIRA, 2017):

- Carga Piezométrica – Medida pontual. Pode ser descrita como a parte da carga total referente a pressão do líquido naquele ponto específico;
- Carga Altimétrica – Medida pontual. É a parte da carga total referente a cota em determinado ponto;
- Carga Hidrostática – É determinada pela soma da carga altimétrica e a carga piezométrica. É a carga específica do líquido;
- Poro-pressão – É a pressão do líquido existente nos poros da rocha e do solo. É o resultado do peso da coluna de líquido acima do ponto medido, atuando contra os grãos gerando pressão. É um dado sempre positivo em pontos alvo abaixo do nível freático, zero quando medida no nível freático, e negativa em cotas acima do mesmo;
- Carga total – É a soma da carga hidrostática (altimétrica + piezométrica) com a carga cinética. Como geralmente a cinética do fluido é pequena devido baixa velocidade de percolação, muitas vezes essa parcela pode não contribuir consideravelmente, e então é omitida;
- Tempo de resposta – é o tempo necessário para a equalização das variações a serem medidas por um instrumento. Pode ser definido como o intervalo de tempo que o equipamento leva para apresentar uma leitura representativa e confiável do dado em questão.

Para a seleção de um monitoramento adequado, é necessário um levantamento para se fazer previsões de escala de produção e dimensões da barragem, geralmente com base no seu

projeto. Estudos e ensaios de campo e laboratório prévio dos materiais que serão utilizados na barragem e de toda a área de fundação são fundamentais, como de mecânica dos solos, mecânica das rochas, hidrogeologia, percolação (definição do nível freático interno do talude de contenção) e geotecnia, para que então sejam estabelecidas as condições de estabilidade da determinada barragem, e o(s) módulo(s) de falha que ela estará submetida.

#### 2.4.3 PROBLEMAS E RISCOS DE LEITURAS MANUAIS

Os instrumentos envolvidos no monitoramento de barragens denominados “manuais”, estão suscetíveis a uma gama de erros que podem levar a uma má interpretação da situação de estabilidade, seja pela falta de tomada de dados ou por erros de operação, as leituras dos respectivos equipamentos estão diretamente relacionadas com a capacidade (qualificação) do operador.

- Análise de dados estruturais feitas com atraso: a frequência de leitura é fator determinante para a interpretação das condições da estrutura e importantes para a detecção de possíveis problemas estruturais antes que a estabilidade seja comprometida.
- Acessibilidade ao instrumento comprometida: os instrumentos de monitoramento são distribuídos ao longo de toda a estrutura, de acordo com o projeto implementado. Sendo assim, alguns pontos podem ter acessibilidade dificultada devido a fatores físicos, geológicos ou meteorológicos como obstrução de estradas de acesso, chuvas e alagamentos. Tais situações podem trazer dificuldade de acesso ou até inacessibilidade de determinado instrumento, trazendo complicações para o técnico encarregado de fazer a leitura, pois ele não conseguirá alcançar o instrumento e obter os dados em questão.
- Erro humano: como todo processo que depende do operador, as leituras também estão suscetíveis a erro humano como erro de tomada de leitura, erro de digitação dos dados e descontinuidade nas leituras. Erros dessa competência são muito comuns e vão apresentar uma análise errônea das reais condições da estrutura.

### 2.5 Automação e Monitoramento de Barragens

Os métodos de monitoramento manuais e visuais (utilizados majoritariamente no monitoramento no Brasil e na América Latina) dependem diretamente da experiência e qualificação do profissional responsável pela segurança da barragem, e podem apresentar falhas que comprometem a interpretação correta da situação de estabilidade.

A automação de instrumentos vem com novas propostas que tendem a minimizar os problemas e riscos da leitura manual, trazendo de forma mais precisa e frequente cada dado de cada equipamento. Com a implementação da automação bem projetada, é possível realizar leituras mais frequentes (SILVEIRA, 2006). Tais propostas podem trazer melhorias na gestão de segurança de barragens, pois a obtenção de dados correta e atual é fundamental para a detecção de comportamentos anômalos da barragem antes que se tornem irreversíveis.

## **2.6 Instrumentos de Monitoramento Geotécnico**

Ainda com as particularidades de cada caso, pode-se assimilar diversos instrumentos que tem funções correlacionadas, e são frequentemente utilizados. Destacam-se os marcos superficiais, os inclinômetros, os piezômetros, medidores de vazão.

### **2.6.1 MEDIDORES E VAZÃO**

Análises topográficas e medição de vazão são consideradas como as primeiras observações para avaliar as condições de segurança de uma barragem. Toda barragem apresenta infiltrações através do aterro compactado, e sua medição é de suma importância para o controle e bom desempenho da estrutura. Um histórico relevante de rompimentos de barragens ocasionados por erosão interna salienta a necessidade dos medidores de vazão, desde a fase construtiva, ao primeiro enchimento da barragem e durante todo o seu período operacional (SILVEIRA, 2006).

Dispositivos dessa natureza devem ser instalados preferencialmente em locais e surgência de água. Consiste em uma placa plana (usualmente metálica) instalada no sentido normal ao fluxo de água, posicionada em um canal livre de sólidos e sedimentos (SILVEIRA, 2006).

Existem 3 tipos de medidores de vazão de face plana empregados, que são de tipo triangulares, retangulares e trapezoidais (*Cipolletti*). Cada tipo tem sua própria modelagem de

vertedouro, e possuem faixas de aplicação e dimensões específicas de acordo com os volumes a serem monitorados.

De acordo com Silveira (2006), medidores triangulares, como o exemplo da Figura 8, são utilizados para conduzir vazões menores, da ordem de 0 a 1800 l/min indicados de acordo com o projeto. Podem ser dimensionados até para vazões de 8000 l/min em condições limite.

Figura 9 - Medidor de vazão triangular (exemplo).



Fonte: ROCHA, [2010 -].

A montante do medidor, é necessário que o regime hidráulico seja constante e uniforme. Se isso não ocorrer, é necessária uma aplicação de tranquilizador de fluxo, que é uma espécie de “amortecedor” feitos com enrocamento para permitir a passagem da água. A jusante, é necessário que o nível de água esteja abaixo do vértice do vertedouro triangular, para evitar o afogamento do medidor (SILVEIRA, 2006).

Os medidores de vazão do tipo retangulares e trapezoidais são indicados para maiores vazões do que os triangulares. Sua faixa de medição vai de 0 l/min (litros por minuto) a 40.000 l/min (SILVEIRA, 2006). Vazões desta ordem indicam que são mais aplicados em barragens do tipo de concreto para armazenamento de água, sendo menos empregados em barragens de rejeito.

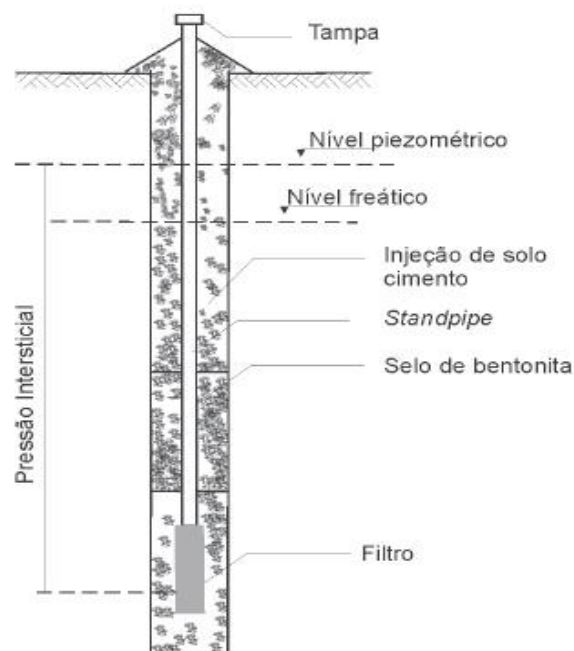
A aplicação de turbidímetros nos medidores de vazão pode também auxiliar na detecção de processo de piping: um aumento súbito de sólidos em suspensão pode indicar problemas de carreamento de sólidos.

### 2.6.2 PIEZÔMETROS CASAGRANDE OU *STANDPIPE*

Os piezômetros do tipo Casagrande ou Standpipe são instrumentos tradicionais no monitoramento de barragens de rejeito pela robustez, simplicidade, confiabilidade e baixo custo. São utilizados principalmente na observação de poropressões, subpressões e cargas piezométricas em barragens de terra e enrocamento (SILVEIRA, 2006).

Consiste basicamente num tubo de PVC, metálico ou geomecânico, ranhurado ou perfurado em trechos, inserido num furo feito previamente (em geral, para sondagem). Oferece uma medida da carga piezométrica influenciada por ações barométricas, ou seja, uma medida da carga piezométrica atuante em uma área alvo. Nas etapas de projeto, é necessário estudar o material que constitui a área alvo, e o tempo de resposta necessário para nivelar as variações em determinadas condições de fluxo (CERQUEIRA, 2017).

Figura 10 - Esquema de um Piezômetro Standpipe Instalado.



Fonte: SILVEIRA, 2006.



Os Piezômetros Standpipe (Figura 9), são, de uma forma geral, uma versão aperfeiçoada dos indicadores de nível de água (INA) tradicionais. O que os difere é principalmente o comprimento da perfuração necessária para introdução do instrumento e o extremo inferior do tubo é envolvido em material filtrante, areia grossa, brita e areia fina em camadas. O instrumento mede a pressão hidrostática no nível da ponta porosa, e para o seu bom funcionamento, é necessário que esteja isolado hidráulicamente, através de uma barreira acima do ponto de medição, que é preenchida com calda de cimento, argila plástica ou betonita (MACHADO, 2007).

Piezômetros Standpipe apresentam boa confiabilidade a longo prazo, boa sensibilidade e durabilidade. Seus componentes de baixo custo chamam a atenção para o seu uso. Porém, não são adequados para determinar poro pressão em períodos construtivos da barragem, além de possuírem a limitação de não serem adequados para mudanças bruscas de variações nos níveis de água - podem apresentar atraso na resposta a essas variações (MACHADO, 2007).

### 2.6.3 INCLINÔMETROS

Em se tratando de materiais, é correto afirmar que todos estão sujeitos a sofrer deformação quando submetidos a esforços (tensões). Em solos, pelo seu caráter compressível, as deformações ocorrem ao longo do tempo e não no mesmo instante em que se aplica a tensão. Existem na geotecnia muitos métodos para se medir o deslocamento e deformações das estruturas, com base no seu posicionamento inicial e com ajuda de aparelhos e metodologias (como por exemplo o GPS – a variação das coordenadas indica movimento planimétrico e/ou altimétrico, resolução de triângulos retângulos pela topografia). Com a necessidade cada vez mais acentuada de obtenção de dados precisos e frequentes de deslocamentos, vem-se desenvolvendo instrumentos de medição cada vez mais sofisticados (MACHADO, 2007).

O instrumento denominado “inclinômetro” foi criado pelo fundador da empresa norte americana Slope Indicator Co., que se tornou referência no monitoramento de estruturas geotécnicas a partir da década de 1950 (SILVEIRA, 2006).

Inclinômetros são instrumentos de monitoramento que medem deslocamentos horizontais de aterros de barragens, taludes e escavações. É basicamente um torpedo dotado de um pêndulo interno, que detecta os deslocamentos angulares nas direções estabelecidas ao longo de um

tubo-guia (SILVEIRA, 2006). Também são capazes de detectar regiões específicas com concentração de deformações. São utilizados para determinação de zonas de risco de ruptura, por este motivo possuem vasta aplicação também nas obras de engenharia civil, por exemplo no monitoramento de taludes rodoviários com risco de queda, pois tais deslocamentos podem causar (MACHADO, 2007):

- Fissuras transversais ao longo do talude;
- Erosão interna;

Tais problemas podem gerar potenciais superfícies de ruptura. Os inclinômetros que medem deformação são compostos por um tubo-guia, normalmente composto de um conjunto de material plástico (resina, ou PVC e fibra de vidro) feito exclusivamente para essa finalidade, com plano de ranhuras internas ortogonais. São instalados num furo de sondagem vertical, e deve ficar até a profundidade 1m dentro da fundação ou rocha firme, que funciona como um referencial fixo para o aparelho. Deve ser longo ou profundo o suficiente para monitorar verticalmente uma zona estrutural que precisa ser observada.

Durante a operação, o inclinômetro é baixado orientado até a base fixa do tubo-guia, e então suspenso. No processo de elevação, são detectados os deslocamentos angulares nos trechos desejados. A inclinação do trecho é então convertida em desvio horizontal (SILVEIRA, 2006).

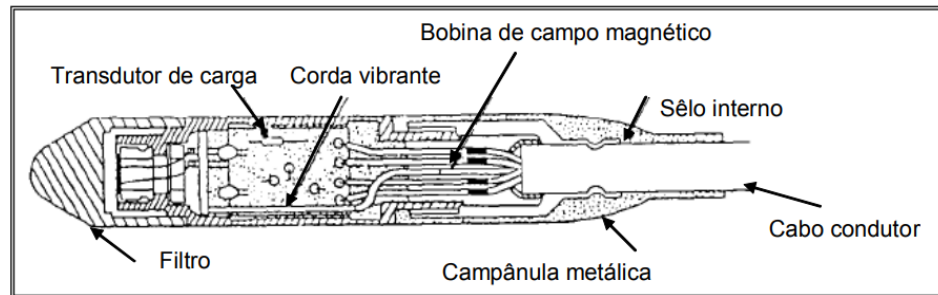
Existe, para alguns casos, a necessidade de aplicação de cadeias de inclinômetros, que atuam em uma zona fixa ao longo do furo de sondagem. Nesta modalidade, busca-se medir deslocamentos cisalhantes que podem ser ocasionados em situações de fundações que apresentam camadas horizontais de baixa resistência intercaladas. Apresenta, neste caso, a vantagem de poder ser operado sem a necessidade de um operador no local da leitura, podendo ser lidos remotamente (SILVEIRA, 2006).

#### 2.6.4 PIEZÔMETROS DE CORDA VIBRANTE

A Figura 10 demonstra o princípio empregado para medição com este tipo de equipamento (com o uso de corda vibrante), que foi desenvolvido na década de 1930 na França e Alemanha. Seu funcionamento ocorre da seguinte forma (SILVEIRA, 2006):

- A pressão da água é transmitida através da pedra porosa, que dependendo do modelo pode estar localizada em diferentes pontos do equipamento, para um diafragma interno;
- A deflexão é então medida por um transdutor de pressão tipo corda vibrante muito sensível, que se localiza perpendicularmente ao plano do diafragma interno;

Figura 11 - Esquema de transdutor de Corda Vibrante



Fonte: MACHADO, 2007.

Estes equipamentos possuem hoje grande utilização no mercado. Sua alta sensibilidade possibilita leituras precisas dos dados. Além disso, em suas versões elétricas trazem a possibilidade de automação, juntamente a alguns benefícios, como a leitura dos dados à distância, permitindo serem integrados em sistemas automatizados de monitoramento, o que reduz drasticamente os erros de leitura e coleta de dados. Para o seu bom funcionamento, assim como no caso dos Standpipe, se faz necessária uma calibração precisa para evitar erros sistemáticos de coleta de dados. Alguns exemplares da fabricante RST Instruments podem ser visualizados nas figuras a seguir:

Figura 12 - Modelo VW2100.



Fonte: RST INSTRUMENTS LTD, 2021.

Alguns modelos disponíveis no mercado, como o exemplar da Figura 11 que é denominado VW2100, da fabricante RST Instruments foram concebidos especialmente para a automação de piezômetros standpipe, e substituição de piezômetros elétricos, pois é imune a ruídos

elétricos externos. Segundo Silveira (2006), esses equipamentos não só substituem diretamente o modelo antigo, mas também permitem que o equipamento manual se torne autônomo. Ainda assim, o funcionamento do standpipe não é alterado. Caso haja necessidade de verificação do desempenho da versão autônoma empregada, pode-se retirar o mesmo do tubo e verificar a correspondência dos dados de ambos os instrumentos.

Figura 13 - Modelo VW2100-DPC.



Fonte: RST INSTRUMENTS LTD, 2021.

O piezômetro indicado na Figura 12, denominado VW2100-DPC da fabricante RST Instruments, é um modelo construído para utilização em solos moles como argilas, solos compactados e também para solos saturados. Sua terminação cônica característica permite que ele seja cravado no solo apenas com a força humana. Seu filtro é localizado na lateral, identificável pela faixa branca. Ele é conectado a hastes metálicas e então inserido no solo onde se deseja realizar o monitoramento (RST, 2021).

Piezômetros de corda vibrante permitem um menor tempo de resposta aos comportamentos da barragem, são sensíveis a variações bruscas de níveis de água e não apresentam atrasos nas leituras.

#### 2.6.5 *SHAPE ARRAY ACCELEROMETER (SAA)*

Este equipamento é uma patente da empresa Measurand (Figura 13), possui alguns modelos que atendem de acordo com a necessidade do monitoramento. O SAA tem a proposta de substituição dos inclinômetros, usado para medir deformações internas. Este instrumento monitora o movimento da subsuperfície, detectando planos e cisalhamento, ou outras deformações que podem comprometer a estabilidade de uma estrutura. Consiste, basicamente numa fita instrumentada de fibra de vidro, com considerável flexibilidade, que se deforma de acordo com a deformação da estrutura. Ao longo desta fita, são instalados sensores triaxiais

de deformação de dimensões que podem ser acoplados em cadeia e espaçados de acordo com a necessidade da zona de monitoramento (MEASURAND, 2021):

Figura 14 - Seção sensorizada Shape Array Accelerometer.



Fonte: MEASURAND, 2021.

As deformações internas medidas pelos sensores são enviadas para um datalogger, que os processa e armazena num banco de dados. Este, por sua vez pode ser acessado localmente e remotamente, através de dataloggers equipados com rádio, ou através de um datalogger fixo conectado à uma rede de intranet. O histórico dos dados também pode ser armazenado de maneira programada. A face externa de dois modelos de SAA podem ser vistas na Figura 14 (MEASURAND, 2021):

Figura 15 - Modelos Measurand SAAV e SAAScan.



Fonte: MEASURAND, 2021.

O seu pequeno diâmetro e peso reduzido permite que esses equipamentos sejam instalados em locais que inclinômetros fixos tradicionais não podem, pois são demasiadamente pesados. Também se aplica em diversos tamanhos e diâmetros de tubos, inclusive em tubos de inclinômetros previamente instalados.

Tecnicamente, foram projetados para ser mais versáteis, podendo ser aplicados em direções

horizontais, verticais ou em arco (MEASURAND, 2021). Por isso, além no monitoramento de barragens, o SAA tem aplicações também em túneis (como em minas subterrâneas) e obras de engenharia civil, como em taludes e túneis rodoviários, onde se necessita monitorar deformações estruturais. Foram criados pela fabricante Measurand, que detém patentes de pelo menos 3 tipos de SAA, cada um com suas particularidades técnicas. Suas leituras reproduzem os mesmos parâmetros de medida dos inclinômetros, profundidade vs deformação horizontal, mas suas maiores vantagens são monitoramento triaxial, simplicidade de instalação pelo peso reduzido, e menor custo para monitoramento em grandes zonas longitudinais.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Roteiro**

O trabalho partiu da elaboração de um roteiro com tópicos a serem pesquisados e respondidos, com intuito de orientar as pesquisas e obtenção de fontes:

- Tragédias/colapsos de barragens de rejeito no Brasil e a insegurança destas estruturas – danos sociais e ambientais permanentes. Como são construídas as barragens de rejeito?
- Entender os módulos de falha estruturais de barragens de rejeito – módulos de falha em barragens de terra e enrocamento. Quais comportamentos destas estruturas afetam a segurança estrutural?
- Tipos de instrumentos manuais – como funcionam? Quais os principais riscos relacionados a este tipo de monitoramento?
- Tipos de instrumentos automatizados – Como funcionam? Quais benefícios podem trazer?
- Prescrição de instrumentação mínima para um monitoramento adequado de uma barragem de rejeito.
- Custo da automação.

### **3.2 Fontes de pesquisa**

O trabalho realizado tem características de uma revisão bibliográfica dentro da geotecnia, que envolve revisões dos principais instrumentos de monitoramento geotécnico. Para isto, foram feitas pesquisas em Periódico CAPES, repositórios das Universidades de Minas Gerais, Ouro Preto e São Paulo, cursos disponibilizados pelo Instituto Minere, e também contou com a aquisição do livro Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento, do autor João Francisco Silveira. Além disso, foram consultados manuais de fabricantes de instrumentos geotécnicos, para que fosse possível entender melhor o funcionamento de cada um.

Então, foi montado um panorama dos módulos de falha, seguido da revisão dos instrumentos geotécnicos, pautando suas funções, funcionamentos, principais problemas e limitações enfrentadas pela realização do monitoramento de forma manual e o que pode ser melhorado com propostas de automação.

### 3.3 Estruturação

No primeiro momento foi feito um levantamento bibliográfico dos principais módulos de falha que envolvem barragens de rejeitos e suas causas: Liquefação Estática, Galgamento, Saturação do Talude de Jusante, Elevação de Poro-pressão, Erosão Interna (Piping) e Recalque Diferencial. A partir da investigação dos mesmos, foram selecionados os equipamentos considerados adequados de instrumentação desse tipo de barragem, apresentando seus respectivos modus operandi e aplicabilidade. Diante dessas informações, foi montado um quadro, que relaciona os módulos de falha, as variáveis a serem monitoradas para cada um, e a instrumentação básica capaz de realizar esse trabalho.

Para os equipamentos automatizados, manuais e artigos científicos recentes embasam os princípios de funcionamento dessas novas tecnologias. Para cada equipamento de monitoramento manual existem um ou mais correspondentes automatizados projetados com propostas de trazer melhorias nos sistemas de monitoramento de estruturas geotécnicas. Desta forma, viu-se como necessária a elaboração de quadros comparativos, que unem conhecimentos empíricos, documentos de pesquisa científica nacionais e internacionais e correlacionam métodos, módulos de falhas e equipamentos. Buscou-se então elaborar um quadro com a seguinte configuração:

| <b>MÓDULO DE FALHA</b>         | <b>VARIÁVEIS A MONITORAR</b> | <b>TIPO DE INSTRUMENTO</b> |
|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <b>Galgamento</b>              |                              |                            |
| <b>Liquefação Estática</b>     |                              |                            |
| <b>Recalque Diferenciado</b>   |                              |                            |
| <b>Erosão Interna (Piping)</b> |                              |                            |
| <b>Ruptura Circular</b>        |                              |                            |

Após essa etapa, foi feita uma comparação direta entre os instrumentos manuais e automatizados citados no trabalho, levantando vantagens e desvantagens dos métodos e instrumentos, qual a influência dentro do programa de gestão, e como a detecção rápida do desenvolvimento de uma falha pode prevenir uma catástrofe. As tragédias que o Brasil vivenciou pela ruptura das barragens de rejeito de Fundão e Feijão em 2015 e 2019 respectivamente, a iminência de falha de outras barragens e a insuficiência de instrumentos geotécnicos mostram que existe uma necessidade de revisão dos métodos de construção e



monitoramento de barragens de rejeito. O desenvolvimento e emprego de novas tecnologias, como disposição de rejeitos a seco, e automatização de equipamentos de monitoramento podem se mostrar novos seguimentos para criação de modelos de maior confiabilidade.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a revisão das variáveis, módulos de falha e instrumentos geotécnicos, foi possível organizar as informações, resultando no Quadro 2. Este quadro apresenta a relação entre os módulos de falha, as variáveis e o tipo de instrumento recomendado para leitura dos dados a ser feita. Este ponto é muito importante para uma gestão de segurança de barragem bem-sucedida, pois um bom planejamento de instrumentação de uma barragem é o ponto de partida para um programa de gestão de segurança adequado. É através da coleta e interpretação destes dados que se torna possível avaliar o real comportamento e saúde estrutural de uma barragem.

Quadro 2 - Correlação entre módulo de falha, variáveis e instrumentação recomendada.

| <b>MÓDULO DE FALHA</b>         | <b>VARIÁVEIS A MONIARAR</b>  | <b>TIPO DE INSTRUMENTO</b>   |
|--------------------------------|--|--|
| <b>Galgamento</b>              | Vazão de vertedouro e de drenagem  | Medidores de vazão e estações meteorológicas   |
| <b>Liquefação Estática</b>     | Poropressão, deformações/movimentação, vazão de drenagem                               | Piezômetros, inclinômetros, medidores de vazão   |
| <b>Recalque Diferenciado</b>   | Movimentação diferencial (fundação), trincas transversais                              | Inclinômetros, medidores de recalque, inspeção visual (observação de trincas e rachaduras) |
| <b>Erosão Interna (Piping)</b> | Poropressão, vazões de drenagem e carreamento de sólidos                               | Piezômetros, medidores de vazão, turbidímetros, inspeções visuais                          |
| <b>Instabilidade de Talude</b> | Deformação interna, deformação na subsuperfície, poropressão, coesão, ângulo de atrito | Piezômetros, inclinômetros, extensômetros de multipontos                                   |

Fonte: Autoria própria.

Todavia, pode-se notar que para os módulos de falha citados, ocorre uma maior frequência do uso de Piezômetros e Inclinômetros, pois as variáveis de poropressão e alguns tipos de deformações estão associadas diretamente aos mecanismos de falha da estrutura, e consideradas críticas para avaliação e acompanhamento da situação de estabilidade de barragens de rejeito.

Tendo em vista que cada estrutura tem a sua particularidade, seu método construtivo, diferentes materiais constituintes, diferentes condições geológicas e até mesmo o tipo de rejeito armazenado, não é possível dizer que esse será o planejamento do programa de monitoramento completo. Mas, em termos de barragens de terra e enrocamento, mostra-se como uma base de instrumentação para que o acompanhamento e a avaliação da estabilidade sejam feitos de forma correta e efetiva. A insuficiência de instrumentos geotécnicos, que não atendem aos requisitos mínimos no programa de monitoramento, acarretará numa análise não representativa das condições operacionais de uma barragem de rejeito, o que impedirá que ações preventivas/corretivas sejam tomadas caso haja algum comportamento anômalo ou risco de falha.

Entendendo a importância dos Piezômetros e Inclinômetros na configuração base de um programa de monitoramento bem-sucedido, buscou-se propor equipamentos alternativos que atendam aos requisitos técnicos destes instrumentos. Foi então elaborado o Quadro 3, que visa iniciar uma perspectiva de comparação entre os equipamentos: comparar o seu uso num parecer técnico, buscando pautar as melhorias que essas novas tecnologias apresentam:

Quadro 3 - Correspondências de Instrumentação.

| <b>Instrumento Manual</b> | <b>Alternativa Automatizada</b> |
|---------------------------|---------------------------------|
| Piezômetros Casagrande    | Piezômetros de Corda Vibrante   |
| Inclinômetros             | Shape Array Accelerometer       |

Fonte: Autoria própria

Piezômetros Casagrande apresentam boa confiabilidade e durabilidade a longo prazo, e o nível piezométrico dentro do tubo é medido através de um indicador de nível de água (INA). Seus elementos são robustos e apresentam baixo custo de investimento. Possuem boa sensibilidade na medição de poro-pressão, mas não são indicados para detecção de variações bruscas de pressão, necessitando de um maior tempo para medir comportamentos anômalos súbitos na barragem (tempo de resposta lento).

Já para Piezômetros de Corda Vibrante, têm-se que esses modelos apresentam as mesmas características dos Casagrande em questão de durabilidade, mas apresentam maior

sensibilidade, sendo sensíveis a variações bruscas de pressão. Em termos de confiabilidade, mostra-se superior com a grande vantagem de poderem ser integrados a sistemas remotos de monitoramento. Esses sistemas permitem uma maior frequência de leituras, um armazenamento de dados mais confiável. Seu custo de investimento, por sua vez, é mais alto.

Isso também acontece no caso dos inclinômetros, que apresentam um bom desempenho quando lidos e interpretados da maneira correta. São equipamentos consolidados no mercado pela sua boa funcionalidade, repetibilidade, precisão e acurácia, na maior parte das vezes atendem aos requisitos técnicos mínimos. Possuem duas maneiras de serem lidos: de forma manual ou por inclinômetros fixos. Existem casos que a necessidade de aplicação de cadeias de inclinômetros fixos por grandes áreas se mostra técnica e economicamente inviável. Da parte técnica, sua desvantagem diz respeito ao seu peso próprio: as estruturas necessárias para instalação desses instrumentos são muito pesadas, necessitando de guincho hidráulico para instalação ou remoção. Do ponto de vista econômico, o investimento se torna mais alto de acordo com o número de instrumentos que precisam ser instalados. O SAA, por sua vez, apresenta uma maior versatilidade nos projetos de monitoramento, uma instalação e operação simplificada. Seu peso reduzido permite que sejam feitas leituras pontuais de 30 em 30cm por grandes distâncias. Quando existe necessidade de monitoramento de zonas críticas ou áreas de potencial ruptura onde seriam aplicáveis vários sensores de inclinômetros em cadeia, o SAA mostra-se uma alternativa mais viável.

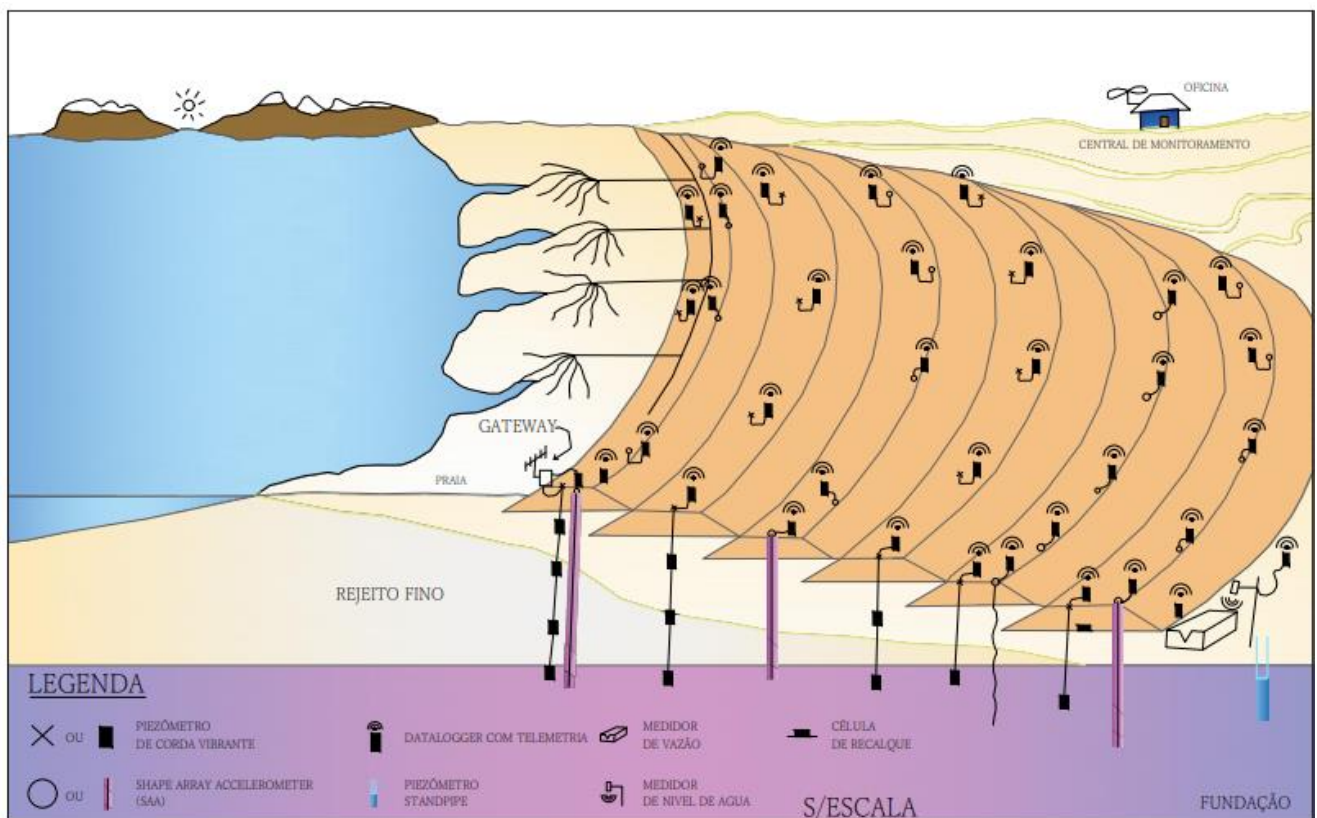
Inclinômetros fixos também possuem uma desvantagem relacionada a capacidade do circuito de leitura, que é limitado pelo número máximo de sensores digitais. O SAA permite monitoramento de perfis verticais mais longos, cujo custo-benefício é superior ao inclinômetro fixo, sua logística de instalação é mais simples e envolve menos custo. Quando instalado horizontalmente, pode substituir também os medidores de recalque, realizando a função de monitorar os recalques diferenciais que resultam na formação de rachaduras e trincas no aterro de uma barragem.

Outra vantagem do SAA está no monitoramento dinâmico da estrutura: ele pode ser usado para monitorar uma deformação contínua, como num caso em que a estrutura está prestes a romper, pois tem a capacidade de fazer leituras imediatas e programadas com armazenamento de dados no datalogger. Isso permite que medidas emergenciais previamente definidas pelo Plano de Ação Emergencial possam ser tomadas em tempo hábil.

Portanto, pode-se ressaltar que com a automação, é possível manter uma frequência adequada de leituras dos instrumentos. A baixa de frequência de coleta de dados periódica ao longo de toda a vida da estrutura, e sua respectiva interpretação, traz uma ausência de informações sobre o comportamento da estrutura ao longo do tempo. Isso impede que exista um histórico para uma avaliação da saúde estrutural da barragem, pois não há parâmetros para serem observados e confrontados.

A partir das informações reunidas, buscou-se representar através da Figura 15, o exemplo de um modelo de uma barragem alteada a montante, com os instrumentos automatizados adequados instalados. A representação não apresenta escala, portanto os instrumentos são apenas ilustrativos em sua distribuição numérica. O método de alteamento a montante foi escolhido para a representação, pois, apesar do menor coeficiente de segurança, apresenta baixo custo para ser realizado, e é muitas vezes o modelo construtivo escolhido para o alteamento.

Figura 16 - Exemplo de aplicação de monitoramento remoto em uma barragem alteada a montante.



Fonte: Adaptado de GUIMARÃES, 2021

O uso de datalogger é necessário para cada instrumento, pois é através dele que os dados são lidos e armazenados. No modelo representado, os dataloggers com telemetria enviam remotamente os dados para um Gateway, que reúne as leituras e então as envia para a central de monitoramento. O uso de inclinômetros é muito comum, portanto também são representados no exemplo juntamente aos SAA. Esses instrumentos são usados em conjunto para a redundância de informação, de forma que sejam confirmadas as medidas de deformação. Sugere-se que, para a automação de medidores de vazão, utilize-se um medidor de nível de água ultrassônico para que sua leitura seja feita também de forma remota, e enviada para a central de monitoramento.

## 5 CONCLUSÃO

Os fatores de projeto, contando com uma boa elaboração de planejamento, métodos construtivos, com caracterização geológica e estrutural da fundação, monitoramento estrutural durante e após a construção são primordiais para o sucesso de um programa de Segurança de Barragem. Os instrumentos geotécnicos por si só não garantem a segurança estrutural, pois esses são apenas componentes para observação do comportamento da barragem. O emprego de novas tecnologias tem se tornado cada vez mais presente no mundo da mineração, não só no monitoramento geotécnico, mas em todas as áreas e operações. Existe, por exemplo, uma tendência de emprego de métodos de disposição de rejeito a seco, que permitem uma melhor condição de estocagem, com menos riscos de colapso estrutural. Estes avanços direcionam o desenvolvimento de modelos de maior segurança e confiabilidade para a sociedade.

Após a revisão dos módulos de falha de barragens e variáveis críticas a monitorar, foi possível pautar os principais instrumentos utilizados na configuração básica de um plano de monitoramento de barragens de rejeito: Piezômetros de Corda Vibrante, Inclinômetros ou SAA. Todos com leituras de dados automatizada. A ausência ou insuficiência de instrumentação geotécnica automatizada pode trazer uma avaliação errônea da real situação de estabilidade de uma barragem, onde um eventual colapso pode afetar o empreendimento mineiro, como também a integridade social, ambiental e econômica de uma região.

Muitas vezes, os instrumentos mais comumente instalados no monitoramento geotécnico (Casagrande e piezômetros com leitura manual) podem gerar uma gestão de monitoramento inapropriada, pois estão suscetíveis a uma gama de erros que podem impedir a avaliação do desempenho da estrutura: erros humanos, interpretação defasadas das leituras, erros de processamento de dados. Além disso, a gestão de monitoramento pode ser afetada por condições adversas como meteorológicas e físicas que dificultam o acesso ao instrumento. Isso afeta negativamente a frequência de tomada de leitura, que é fator determinante para o bom acompanhamento do desempenho da barragem.

Tendo em vista uma tendência de instalação de instrumentos de tecnologia avançada com a automação, esses se mostram componentes críticos para mitigar as deficiências da gestão de monitoramento estrutural de uma barragem. Os dados dispostos de maneira contínua e uma interpretação precisa geram mais segurança, eficiência e confiabilidade na gestão de segurança.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Marínis Maria de. **Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

BERRONES, R. F.; ACOSTA, N. P. L. (2011). **Internal Erosion due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures**. Soil erosion studies. Chapter 14. InTech.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei 9984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Casa Civil, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm). Acesso em: 22 maio 2019.

CERQUEIRA, Hélio Márcio Lopes de. **Critérios de Projeto para Instrumentação Piezométrica de Diversas Estruturas Geotécnicas em Mineração**. 2017. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

LEPROUDE, Chad. (2015). Examples, Statistics and Failure Modes of Tailing Dams and Consequence of Failure. SNC Lavalin. *In: REMTECH*, Oct, 15, 2015. Disponível em: <https://pdfslide.net/documents/examples-statistics-and-failure-modes-of-tailings-dams-tailings-dam-failures.html>. Acesso em: 25 maio 2019.

MACHADO, William Gladstone de Freitas (2007). **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MEASURAND. **Products**. Shape Array. 2021. Disponível em: <https://measurand.com/products/shapearray/>. Acesso em: 21 mar. 2021.

NEVES, L. P. (2019). **Segurança de Barragens: Legislação Brasileira Comentada**. Instituto Minere. E-book. Disponível em: <<https://institutominere.com.br/materiais/e-book-seguranca-de-barragens-legislacao-federal-brasileira-comentada>>. Acesso em: 27 maio 2019.

OLIVEIRA, José Carlos de. **Gestão Operacional das Barragens de Terra do Complexo Minerário das Minas de Ferro em Carajás da Vale**. 2014. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

ROCA, Marta. *et al.* (2019). **A Review of the Risks Posed by the Failure of Tailings Dams**. HR Wallingford, Howbery Park, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BA, UK SPACE



AGENCY. 2019. Disponível em: <https://damsat.org/wp-content/uploads/2019/01/BE-090-Tailings-dams-R1-Secured.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2021.

ROCHA, Hugo. Inspeção e Monitoramento de Barragens - Palestra. Segurança de Barragens: Teoria, Legislação e Prática - Curso. Instituto Minere. [2010 -]. p. 48.

RST Instruments Ltd. **Products**. Piezometers. 2021. Disponível em: <<https://rstinstruments.com/products/instruments/piezometers/>>. Acesso em: 26 mar. 2021.

SILVEIRA, J. F. (2006). **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos.