



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---



**Thainá Rainho do Sacramento França**

**Monitoramento Geotécnico em Estruturas de Disposição de Rejeitos**

Ouro Preto

2023

# Monitoramento Geotécnico em Estruturas de Disposição de Rejeitos

Thainá Rainho do Sacramento França

Trabalho Final de Curso apresentado  
como parte dos requisitos para obtenção  
do Grau de Engenheiro Civil na  
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 02/05/2023

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: D.Sc. Eleonardo Lucas Pereira

Co-orientadora: M.Sc. Jéssica Pereira Duarte

Ouro Preto

2023

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F814m França, Thainá Rainho do Sacramento.  
Monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos.  
[manuscrito] / Thainá Rainho do Sacramento França. - 2023.  
86 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira Pereira.  
Coorientadora: Ma. Jéssica Pereira Duarte Duarte.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola  
de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Barragens de rejeitos. 2. Mecânica do solo - Instrumentação  
geotécnica. 3. Localização de falhas (Engenharia). I. Pereira, Eleonardo  
Lucas Pereira. II. Duarte, Jéssica Pereira Duarte. III. Universidade Federal  
de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Thainá Rainho do Sacramento França**

### **Monitoramento Geotécnico em Estruturas de Disposição de Rejeito**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Civil.

Aprovada em 02 de maio de 2023

#### Membros da banca

Prof. D.Sc. Eleonardo Lucas Pereira - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
M.Sc. Jéssica Pereira Duarte – Coorientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Prof. D.Sc. Lucas Deleon Ferreira - Universidade Federal de Ouro Preto  
D.Sc. Mariana Tonini de Araújo

Eleonardo Lucas Pereira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/06/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Eleonardo Lucas Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/06/2023, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0536812** e o código CRC **15FD2703**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus que guiou e iluminou o meu caminho durante toda a minha trajetória.

Agradeço aos meus pais, Patrícia e Robson, que me incentivaram a estudar e sempre me apoiaram nas minhas escolhas. Tudo que tenho conquistado é fundamentalmente graças a vocês.

Agradeço aos meus irmãos, Iago e Luna, por serem minha calma.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial os do período 17.1 de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto e da República Joselitas, e familiares que sempre me estimularam e apoiaram.

Agradeço a Civil Júnior, ao Núcleo Vertentes e ao Centro Acadêmico de Engenharia Civil da Escola de Minas por todas as oportunidades de aprendizado.

Agradeço aos amigos do trabalho, que propiciaram o meu aprendizado e a realização deste trabalho.

Agradeço a minha coorientadora, Jéssica Duarte, pela orientação a esta pesquisa, além de todo o apoio e motivação.

Agradeço ao meu orientador, Eleonardo Pereira, pela colaboração e solicitude.

## RESUMO

O sistema de monitoramento permite a coleta, registro e processamento dos dados obtidos a partir das leituras dos instrumentos instalados na barragem a fim de assegurar o constante monitoramento de suas estruturas, obtendo maior segurança e confiabilidade em relação a estabilidade deste empreendimento. Assim, este trabalho aborda a importância do monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos da mineração. Para isso, foram utilizadas referências bibliográficas para apresentar a aplicação, as limitações e a relevância de sistemas de monitoramento geotécnico, correlacionando as variáveis de medição com os instrumentos geotécnicos, os principais modos de falha e a evolução e tendências da instrumentação. Para tanto, a metodologia abrange: (i) revisão bibliográfica da disposição de resíduos na mineração, instrumentação geotécnica, legislação e normas brasileiras direcionadas para o monitoramento e modos de falhas; (ii) correlação entre modos de falha, medidas de controle e instrumentação; (iii) vantagens e desvantagens do monitoramento geotécnico automatizado. Assim sendo, este trabalho possibilita entender o propósito da instrumentação no monitoramento geotécnico e as tendências e limitações da evolução tecnológica, a fim de demonstrar a importância na segurança e na prevenção de acidentes, compreendendo a correlação entre os tipos de instrumentos, as variáveis a serem monitoradas e os modos de falha.

Palavras-Chave: barragens de rejeito; instrumentação geotécnica; monitoramento geotécnico; modos de falha.

## **ABSTRACT**

The monitoring system allows for the collection, recording, and processing of data obtained from readings taken by instruments installed in the dam, in order to ensure constant monitoring of its structures, achieving greater safety and reliability regarding the stability of this undertaking. Therefore, this work addresses the importance of geotechnical monitoring in mining waste disposal structures. To do so, bibliographic references were used to present the application, limitations, and relevance of geotechnical monitoring systems, correlating measurement variables with geotechnical instruments, the main failure modes, and the evolution and trends of instrumentation. The methodology includes: (i) bibliographic review of waste disposal in mining, geotechnical instrumentation, Brazilian legislation and norms directed towards monitoring and failure modes; (ii) correlation between failure modes, control measures, and instrumentation; (iii) advantages and disadvantages of automated geotechnical monitoring. Thus, this work enables us to understand the purpose of instrumentation in geotechnical monitoring and the trends and limitations of technological evolution, in order to demonstrate the importance of safety and accident prevention, understanding the correlation between types of instruments, variables to be monitored, and failure modes.

Keywords: tailings dams; geotechnical instrumentation; geotechnical monitoring; failure modes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medidor de Vazão Triangular.....	19
Figura 2 – Medidor de Vazão Retangular .....	20
Figura 3 – Medidor de Vazão Trapezoidal tipo Cipoletti .....	20
Figura 4 – Medidor de Vazão Calhas Parshall.....	21
Figura 5 - Esquema de medidor de nível d'água .....	24
Figura 6 – Medidor de Nível d'água .....	24
Figura 7 – Esquema de um Piezômetro <i>Standpipe</i> (Casagrande).....	28
Figura 8 – Piezômetro Casagrande .....	29
Figura 9 – Esquema Geral de um Piezômetro Hidráulico .....	30
Figura 10 – Piezômetro Hidráulico.....	31
Figura 11 – Esquema de um Piezômetro Pneumático.....	32
Figura 12 – Piezômetro Pneumático.....	33
Figura 13 – Esquema de Piezômetro Elétrico.....	34
Figura 14 - Piezômetro Elétrico.....	35
Figura 15 – Esquema de Funcionamento de Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante.....	37
Figura 16 – Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante.....	37
Figura 17 – Esquema de Instalação de Marco Superficial.....	40
Figura 18 – Marco Superficial .....	40
Figura 19 – Estação Total Tradicional e Estação Total Robótica, respectivamente. .....	41
Figura 20 – Esquema Geral de Funcionamento de um Inclinômetro .....	43
Figura 21 – Vista Parcial do Torpedo.....	44

Figura 22 - Fluxograma da criação automática de um MDT (Modelo Digital de Terreno) por InSAR.....	45
Figura 23 – Erosão interna no aterro e na fundação.....	56
Figura 24 – Galgamento ( <i>Overflowing</i> e <i>Overtopping</i> ).....	57
Figura 25 – Falha circular no talude de jusante .....	61
Figura 26 - Instrumentos instalados na Barragem-Piloto .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos Equipamentos de Instrumentação Geotécnica .....	46
Tabela 2 - Estatísticas de rupturas de barragens construídas entre 1800 e 1986 .....	64
Tabela 3 - Dados apresentados para 135 falhas de barragens de rejeitos para as quais as causas foram relatadas de 1917 a 2000 no ICOLD (2001).....	64
Tabela 4 - Relação entre módulo de falha, medidas de controle, justificativa de instalação e instrumento recomendado.....	68
Tabela 5 – Vantagens e Desvantagens do Sistema de Monitoramento Manual.	70
Tabela 6 – Vantagens e Desvantagens do Sistema de Monitoramento Automatizado .....	71
Tabela 7 – Parâmetros Medidos/Observados e Modos de Falha .....	74

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	10
1.1	Objetivo .....	12
1.1.1	Objetivos Específicos.....	12
2	Revisão Bibliográfica.....	13
2.1	Produção e Disposição de Resíduos da Mineração .....	13
2.2	Definição e Histórico da Instrumentação Geotécnica .....	15
2.3	Instrumentação Geotécnica.....	16
2.3.1	Princípios e Instrumentos para a Medição de Vazão .....	18
2.3.2	Princípios e Instrumentos para a Medição do Nível de Água.....	22
2.3.3	Princípios e Instrumentos para a Medição da Poropressão .....	25
2.3.4	Princípios e Instrumentos para a Medição de Deslocamentos.....	38
2.4	Automatização do Monitoramento .....	47
2.5	Legislação e Normas Brasileiras .....	50
2.6	Modos de Falha em Barragens.....	55
2.6.1	Erosão Interna ( <i>Piping</i> ) .....	55
2.6.2	Galgamento.....	56
2.6.3	Liquefação Estática e Liquefação Dinâmica.....	57
2.6.4	Instabilização .....	59
3	Metodologia.....	62
4	Resultados .....	63
4.1	Erosão Interna ( <i>Piping</i> ).....	65

4.2	Galgamento .....	66
4.3	Liquefação Estática .....	66
4.4	Instabilização .....	67
4.5	Automatização do Monitoramento Geotécnico .....	69
4.6	Monitoramento de uma Estrutura Existente.....	72
5	Conclusão .....	75
	Referências.....	77

# 1 INTRODUÇÃO

Segundo Junior *et al.* (2018), o setor da mineração gera um volume de materiais extraídos e movimentados de aproximadamente milhões de metros cúbicos no Brasil no processo de beneficiamento do minério. A elevada produção dos rejeitos minerais torna necessária a construção de diques para estocagem desse material, formando as estruturas de disposição de rejeito. Os resíduos são responsáveis por impactos ambientais e sociais, assim, é necessário ter uma atenção direcionada para o tratamento, armazenamento, monitoramento e inspeção de estruturas de disposição de rejeito, visando maximizar a segurança e evitar possíveis falhas estruturais.

No Brasil, as barragens de rejeito começaram a ser construídas na década de 1930 (CBDB, 2011) e, a partir de então, são a principal forma de armazenamento de materiais provenientes da mineração.

A instrumentação de barragens de terra e enrocamento no país foi impulsionada na década de 1950. De um total de 87 barragens de terra e enrocamento construídas e instrumentadas até o ano de 1995, 84% foram construídas partir de 1950, houve um aumento significativo na construção de usinas hidrelétricas, tanto em número como em tamanho em locais com ampla diversidade e complexidade geológico-geotécnica. Assim, exigiu-se projetos de maior complexidade, trazendo atenção aos planos de instrumentação geotécnica para acompanhamento dos parâmetros geotécnicos (SILVEIRA, 2013).

Atualmente, várias ferramentas são utilizadas no controle da segurança de barragens nas fases de execução, operação e manutenção. O monitoramento por meio da instrumentação geotécnica é uma dessas ferramentas e assume diversas finalidades, a depender da etapa da obra. De acordo com Dias (2017), durante a etapa de construção da estrutura, a instrumentação tem o objetivo de adequar as premissas do projeto ao método construtivo. Além disso, a instrumentação assume características de controle de segurança, detectando variações no comportamento estrutural, hidráulico, geotécnico e operacional na avaliação da estrutura ao longo da sua vida útil.

Outrossim, de acordo com Silveira (2013), os parâmetros a serem medidos incluem a pressão da água nos poros, a pressão da água na rocha de fundação, as pressões totais, os recalques, os deslocamentos horizontais, as cargas e a tensão nos elementos estruturais, a temperatura, as vazões de drenagem, entre outros. Cabe ressaltar que a preocupação primária, normalmente, é com a deformação, seguida de medições pontuais de pressão, esforços, cargas, tensões e temperaturas podendo representar características da estrutura em grande escala ou não.

Em relação aos tipos de instrumentos, entre os mais aplicados estão os piezômetros, os medidores de nível de água, os marcos superficiais, os inclinômetros e medidores de vazão. Machado (2007), destaca que os sistemas de coletas de dados podem ser obtidos por instrumentos elétricos, mecânicos, hidráulicos e pneumáticos.

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)” , com o intuito de regulamentar as etapas de construção e operação e definir planos de ação emergencial. Ademais, na Resolução nº 32, homologada pela Agência Nacional de Mineração (ANM) em 11 de maio de 2020, algumas estruturas devem manter o sistema de monitoramento automatizado.

Dessa forma, fica clara a importância da instrumentação geotécnica no monitoramento, para analisar de forma pontual e sistêmica, o comportamento das estruturas de disposição, armazenamento e contenção de rejeito. Tendo isso em vista, é necessário o entendimento da evolução dos instrumentos geotécnicos e do monitoramento, assim como da legislação ao longo dos anos, e as variáveis a serem monitoradas pela instrumentação para evitar possíveis falhas nas estruturas.

Evidencia-se, portanto, que o monitoramento, por meio da instrumentação geotécnica, é fundamental para a segurança e operação das barragens de mineração, visto que fornece informações sobre o desempenho da estrutura e possibilita a identificação antecipada de problemas e falhas na barragem.

## **1.1 Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma revisão bibliográfica de modo a ressaltar a aplicação, as limitações e a relevância de sistemas de monitoramento geotécnico com foco em estruturas de disposição de rejeitos para diferentes modos de falha.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Explorar a função dos principais instrumentos geotécnicos para monitoramento de vazões, nível d'água, poropressão e deslocamentos;
- Destacar a atuação dos instrumentos no sistema de monitoramento;
- Discutir a aplicação de instrumentos em estruturas de disposição de rejeito;
- Entender a função e a atuação dos instrumentos na prevenção de falhas;
- Discutir as vantagens e desvantagens do monitoramento manual e automatizado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção e Disposição de Resíduos da Mineração

A mineração é uma atividade indispensável para o desenvolvimento econômico da sociedade. Todavia, é potencial geradora de resíduos sólidos, e principalmente, de impacto ambiental, caso não seja realizado o gerenciamento adequado desses resíduos. O impacto das atividades de indústrias mineradoras em relação à capacidade de geração de impacto ambiental está associado à grande quantidade de resíduos gerados, principalmente aqueles oriundos da própria extração (estéril) e do beneficiamento (rejeito) (Araújo *et al.*, 2012).

IPEA (2012) apresentam que os estéreis são os materiais escavados, cometidos nos procedimentos de extração no decapeamento da mina, não tem valia econômica e podem ser dispostos em pilhas. Em contrapartida, os rejeitos são resíduos decorrentes do processo de beneficiamento a que são submetidas as substâncias minerais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos denomina como rejeitos os “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

No decorrer do estudo, IPEA (2012) acrescenta que o gerenciamento de resíduos é um dos instrumentos da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Ademais, o Artigo 20º da Lei Federal nº 12.305 de 12 de agosto de 2010 estabelece a elaboração do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos, deve contemplar, entre outros aspectos: origem, quantidade, classificação, acondicionamento, armazenamento e a destinação final.

Araújo *et al.* (2012) discorrem que a disposição dos resíduos da mineração pode ser realizada pela formação de pilhas (comumente para estéril) ou em estruturas de contenção em diques e barragens (para o caso dos rejeitos). Outrossim, evidencia

que as pilhas de estéril e barragens de rejeito devem ser construídas dentro dos critérios geotécnicos e constantemente monitoradas conforme definido pelas normas ABNT NBR 13028 e 13029, ambas de 2006 (VIEIRA, 2010).

IPEA (2012) apresenta que alguns dos tipos de disposição de rejeitos são a disposição subaquática, na qual os rejeitos são dispostos embaixo da água, o método de disposição em superfície, que consiste em descartar os rejeitos diretamente em praia e deixá-los secar naturalmente expostos ao ar.

Por fim, Guimarães (2012) aborda que devido às preocupações ambientais envolvidas na mineração e a dificuldade de licenciamento de áreas para a construção de novas barragens, despertou-se a necessidade de investigação de outros métodos de disposição de resíduos. Dessa forma, a disposição de rejeitos em pilhas tornou-se uma alternativa viável.

O avanço tecnológico na desidratação do rejeito expandiu para que o rejeito seja disposto em pilhas em um estado não saturado, mais conhecido como rejeito filtrado. Acrescenta também que podem ser arranjados em um estado relativamente denso, podendo ser dispostos em fundações pouco competentes e em encostas de vales (LEÃO, 2021).

De acordo com Oliveira Filho (2015), na técnica de empilhamento de rejeitos filtrados, os rejeitos são espessos até atingir uma consistência desejada utilizando espessadores e, em seguida, são filtrados por meio de filtros a verificações ou de pressão positiva. A água proveniente das etapas de espessamento e filtração pode então ser reutilizada no processamento do minério. O teor de umidade do produto resultante da filtração, conhecido como torta filtrante (*filter cake*), é um dos principais fatores a serem considerados no caminho posterior desse material, incluindo transporte, descarga e eventual compactação. A filtração acontece pela aplicação de uma força sobre as partículas por meio de um meio poroso e pode ser conseguida por meio de: vácuo, pressão, gravidade ou centrifugação (ALVES, 2020).

## 2.2 Definição e Histórico da Instrumentação Geotécnica

Conforme Fonseca (2003), a auscultação de uma barragem é o conjunto de processos que visam a observação, detecção e eventuais deteriorações que possam acarretar risco potencial à segurança global da estrutura. A auscultação pode ser feita por inspeções visuais (processo qualitativo), através de visitas periódicas de campo e por meio da instrumentação (processo quantitativo), quando ocorre aquisição, registro e processamento dos dados obtidos a partir da instrumentação geotécnica instalada no aterro ou nas fundações das estruturas.

Silveira (2013) apresentou que em 1853 medições topográficas foram realizadas na barragem em cantaria (*masonry*) de Grosbois, na França, construída entre 1830 e 1838 para observação dos deslocamentos da crista. Já no final do século XIX, piezômetros foram empregados na Índia para estudar condições de percolação na fundação de barragens para irrigação e em 1907, esse tipo de instrumento foi empregado por engenheiros na Inglaterra para determinar a superfície freática de uma barragem homogênea. Então, a partir de 1917, os piezômetros passaram a ser empregados nos Estados Unidos em barragens de terra e adaptações e modificações nesse equipamento acarretaram o projeto de células de pressão para medição da poropressão.

No ano de 1922, nos Estados Unidos, foi lançado um programa de instrumentação de barragens em arco para melhor compreensão do comportamento desse tipo de estrutura, visando aumentar a segurança e reduzir os custos. Foram utilizados fissurômetros e inclinômetros para medição das deformações internas do concreto. Outro importante marco na área da instrumentação ocorreu em 1931, na França, quando André Coyne obteve patente para um sensor de corda vibrante. A partir de então, esse tipo de sensor, que deu origem a uma grande variedade de instrumentos, tem sido amplamente utilizado em barragens pelo mundo (SILVEIRA, 2013).

De acordo com Affonso (2004), entre 1930 e 1940 ocorreram as primeiras aplicações de instrumentação em obras geotécnicas de grande porte no mundo. Nos primeiros anos de atividades de instrumentação, os instrumentos eram predominantemente simples, mecânicos e hidráulicos. Mas com o crescente avanço

da tecnologia nas décadas seguintes, os instrumentos tornaram-se mais sofisticados. E ao final do século XX, registrou-se o desenvolvimento de sistemas automatizados de aquisição de dados (ADAS – *Automated Data Acquisition System*), alguns dos quais utilizam satélites espaciais para transmissões dos dados (U.S. *Army Corps of Engineers*, 1995 *apud* AFFONSO, 2004).

No Brasil, Silveira (2013) descreve que, a partir de 1950, a instrumentação de barragens de terra e enrocamento foi impulsionada, todavia, apenas após a década de 1970 o Brasil passou a confeccionar uma grande diversidade de instrumentos de auscultação, dentre os quais se destacam novos tipos de medidores de recalque; piezômetros elétricos, hidráulicos e pneumáticos; células de pressão total; marcos superficiais; acessórios para inclinômetros e medidores de vazão. O desenvolvimento na confecção de instrumentos nacionais decorreu das dificuldades e longos prazos necessários à importação durante o regime militar no Brasil. Alguns instrumentos mais rebuscados, envolvendo princípios eletrônicos ou materiais especiais, como por exemplo os piezômetros de corda vibrante, continuaram a ser importados.

Dunnicliff (1998) afirma que o uso de instrumentação geotécnica não é apenas a seleção dos instrumentos, e sim, um processo de engenharia abrangente, desde a definição do objetivo até a implementação dos dados.

### **2.3 Instrumentação Geotécnica**

O desempenho ao longo prazo de uma barragem é um fator necessário na avaliação da segurança. Efeitos diurnos e sazonais, mudanças na pressão hidrostática e infiltrações de água podem afetar a segurança das estruturas. Deflexão da parede, assentamento e elevação, taxa de fluxo de água, infiltração, temperatura, vibração, tensão, deformação e outros parâmetros significativos requerem monitoramento para detectar mudanças no desempenho da barragem. O objetivo principal da instrumentação é fornecer informações para auxiliar na avaliação da segurança de uma estrutura, coletando dados quantitativos sobre seu desempenho e detectando problemas em um estágio inicial e evitável (DHAWAN *et al.*, 2018).

Instrumentação é o processo que permite a coleta, registro e processamento dos dados obtidos a partir das leituras dos instrumentos instalados em lugares pré-determinados na barragem, geralmente no aterro ou fundações (FONSECA, 2003).

Vieira (2017) ressalta que a instrumentação de barragens é importante para assegurar o constante monitoramento de suas estruturas, obtendo maior segurança e confiabilidade em relação a estabilidade deste empreendimento.

Todo instrumento em um empreendimento deve ser selecionado e instalado para atender a objetivos específicos. Antes de indicar os métodos de medição, é preciso saber as questões geotécnicas que provavelmente surgirão durante as fases de projeto, construção e operação. As barragens de grande porte e, mesmo algumas de pequeno porte, possuem pontos mais susceptíveis à ocorrência de problemas na fundação ou pontos de fraqueza estrutural. Por isso necessitam de instrumentação específica para a observação do desempenho da estrutura ao longo do tempo (SILVEIRA, 2013).

Ainda, de acordo com Silveira (2013), ao selecionar os instrumentos, o principal aspecto almejado é sua confiabilidade, pois está diretamente ligado à supervisão das condições de segurança de uma barragem, cuja ruptura pode trazer consequências devastadoras. Outrossim, a confiabilidade dos instrumentos está relacionada à sua máxima simplicidade.

A frequência com que os dados de instrumentação são obtidos deve ser adaptada ao objetivo do monitoramento, período de construção, operação ou fechamento, investigação ou outro interesse e condições de funcionamento do projeto (SILVEIRA, 2013).

Em barragens de terra e de enrocamento, os instrumentos podem ser instalados nos aterros e espaldares da barragem, nas fundações, nas ombreiras, em interfaces solos – estruturas, em obras auxiliares (ensecadeiras, vertedores, entre outros) ou ao longo do próprio reservatório (FONSECA, 2003).

Segundo Moura *et al.* (2022), o monitoramento através de instrumentos, como medidores de deslocamento, piezômetros, inclinômetros e marcos topográficos,

possibilitam o entendimento dos dados em alerta para facilitar a tomada de decisão em tempo de evitar acidentes que resultam em perdas de vidas, pausas na operação, impactos ambientais, sociais e financeiros.

No escopo do presente trabalho, o contexto da instrumentação geotécnica, instalada em estruturas de disposição de rejeitos, será abordado quanto aos usos e aplicações, características e funcionamento destes equipamentos, resumidos na Tabela 1 (apresentada após a descrição de todos os instrumentos). A seguir serão descritos os aspectos referentes aos instrumentos, com objetivo de monitoramento de vazões, deslocamentos e poropressões, foco do presente trabalho.

### **2.3.1 Princípios e Instrumentos para a Medição de Vazão**

Segundo Castro (2006), a medição das vazões de drenagem e das infiltrações pela estrutura de uma barragem de contenção de rejeitos é fundamental para garantir a segurança estrutural e deve ser uma das observações iniciais para supervisionar suas condições de segurança.

Conforme a Agência Nacional de Águas - ANA (2020), esses medidores são instrumentos planejados para medir as vazões de drenagem através da fundação, e as infiltrações através do aterro.

O medidor de vazão, além da medição da quantidade de água de percolação através da estrutura, possibilita também uma análise qualitativa da água passante e a identificação de um possível local comprometido. Outrossim, permite a identificação de obstrução de drenos, poropressões excessivas e erosões internas (SILVA, 2016).

Oliveira (2020) retrata, em seu estudo, que os medidores de vazão são usados para medir as vazões dos drenos e determinar as vazões de percolação pelo maciço e fundação de uma barragem. Eles são uma das primeiras observações realizadas para supervisionar a condição de segurança da barragem.

Uma placa plana, geralmente de metal, é instalada perpendicularmente ao fluxo de água em um canal livre de sólidos e sedimentos para dispositivos de medição de vazão. É preferível que sejam instalados em locais com surgência de água (SILVEIRA, 2006). O sistema de vertedouro pode ser de seção triangular, trapezoidal ou calhas

Parshall, sendo que o fluxo de água à jusante é concentrado em caixa ou galeria metálica ou de concreto (SILVA, 2016).

Cada tipo de vertedouro tem sua própria modelagem, com faixas de aplicação e dimensões específicas de acordo com os volumes a serem monitorados (GUIMARÃES FILHO, 2021).

Silva (2016) aborda que para a medição da vazão, afere-se a altura de coluna d'água passante na seção com o auxílio de uma régua fixada no equipamento.

A medida da altura da lâmina d'água (carga hidráulica) é efetuada a montante de um vertedor para cálculo da vazão, através de uma fórmula experimental, em função do ângulo da lâmina do tipo de medidor (ANA, 2019).

Silveira (2013) descreve três tipos principais de medidores de vazão de face plana empregados, que variam apenas no modelo da abertura do vertedouro: o medidor triangular (Figura 1), o medidor retangular (Figura 2) e o medidor Cipolletti (trapezoidal) (Figura 3).

**Figura 1 – Medidor de Vazão Triangular**



Fonte: Castro (2013)

**Figura 2 – Medidor de Vazão Retangular**



Fonte: Silveira (2013)

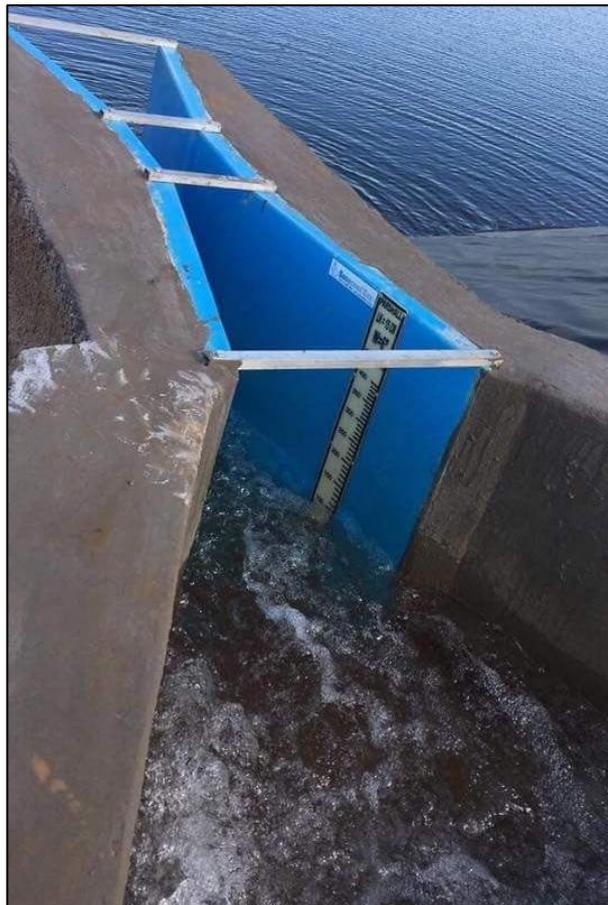
**Figura 3 – Medidor de Vazão Trapezoidal tipo Cipoletti**



Fonte: Castro (2013)

De acordo com Smirdelle (2014), o medidor de vazão triangular é recomendado para faixas de vazões entre 0 e 600 L/min, podendo atingir no máximo 8.000 L/min. Quando há vazões maiores, recomenda-se que seja utilizado o medidor de vazão retangular ou Cipolleti (trapezoidal). Já o medidor de vazão calha Parshall (Figura 4), é indicado quando as vazões de infiltrações são de grande intensidade, com centenas de litros por segundo.

**Figura 4 – Medidor de Vazão Calhas Parshall**



Fonte: SanecomFibra

A partir de um medidor de vazão é possível controlar a quantidade de materiais sólidos carregados pela água da drenagem, auxiliando na identificação do fenômeno de *piping* (SMIRDELE, 2014).

Segundo Guimarães Filho (2021), a aplicação de turbidímetros (possibilita a medição do grau de turbidez) nos medidores de vazão pode auxiliar na detecção de processo de *piping* (modo de falha descrito no item 4.1), visto que um aumento súbito de sólidos em suspensão pode indicar problemas de carreamento de sólidos.

Há grande incidência de barragens de terra ou enrocamento rompidas por erosão interna (descrito no item 2.6.1). Isso reforça a importância da medição de vazão de drenagem durante a operação do reservatório desde o primeiro enchimento, visto que pode ser possível detectar esse módulo de falha em fase ainda inicial, sendo possível implementar medidas corretivas (SILVEIRA, 2013).

Silveira (2013) ainda acrescenta que entendendo a importância da medição das vazões de drenagem a jusante das barragens de terra ou enrocamento e a possibilidade de que a partir de um eventual aumento de vazão pode ocorrer o fenômeno de erosão interna (*piping*), tem-se avançado sobre automação dos medidores de vazão, para que a detecção seja mais rápida de qualquer aumento súbito da vazão.

### **2.3.2 Princípios e Instrumentos para a Medição do Nível de Água**

O nível freático é estabelecido como a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo, na qual a pressão corresponde à atmosférica (SILVEIRA, 2013).

Segundo Santos (2019), os medidores de nível d'água são os instrumentos mais simples utilizados nas barragens. Têm como função principal indicar o nível do lençol freático em maciços de terra. Por um furo de sondagem ou poço, é possível determinar a cota do nível d'água.

O nível de água em um tubo varia de acordo com a variação média do nível de água das fases em que o furo de sondagem interceptou. O medidor de nível d'água é utilizado para determinar a profundidade ou elevação do nível de água em relação a uma referência, como a boca do furo. Esse instrumento consiste em uma trena graduada acoplada a um apito ou a uma sonda elétrica que emite sinais sonoros em contato com a água (CERQUEIRA, 2017).

Os medidores de nível d'água medem as elevações médias do nível da água em diferentes zonas subterrâneas ou grandes áreas em furos de perfuração. A água é medida por meio de um tubo com fenda ou perfurado, ou pelo fundo de um tubo aberto. A medida da água pode vir de diferentes zonas subterrâneas e não está compreendida por vedações no furo (DHAWAN *et al.*, 2018).

Machado (2007) apresenta, em seu estudo, que o uso do medidor de nível d'água é funcional quando há necessidade de determinar a linha freática ao longo do maciço. Em geral, a medição é feita de maneira manual, com um equipamento ou escala que identifique a superfície freática no interior do tubo (nível freático).

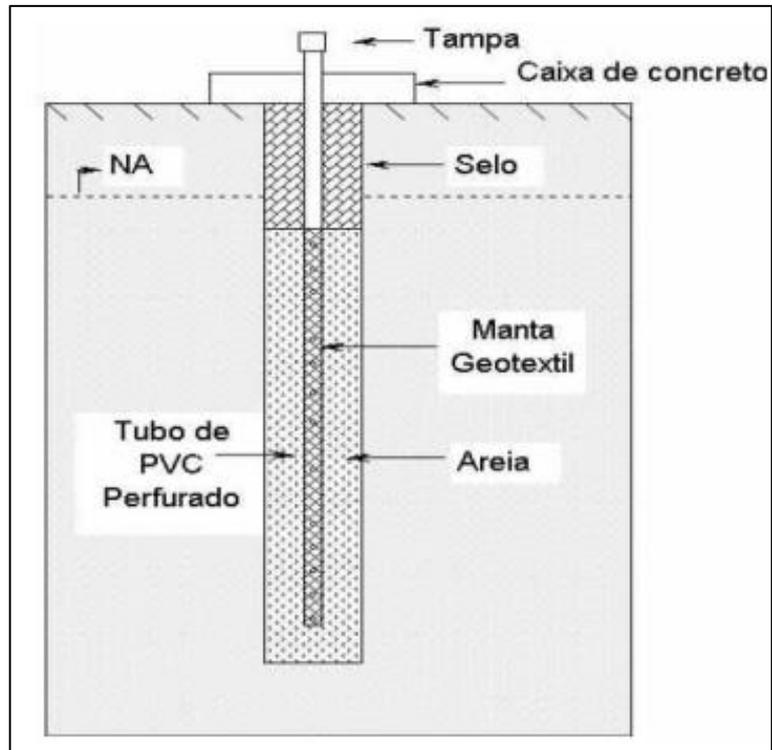
O princípio geral dos instrumentos para a medição do nível d'água em maciços de solo ou rocha consiste basicamente em se acessar diretamente a água em profundidade e medir a cota da sua superfície por meio de um dispositivo (usualmente por cabo graduado dotado de um sensor elétrico na extremidade inferior e um emissor sonoro ou luminoso na superfície) (FONSECA, 2003).

A leitura em um medidor de nível d'água pode ser efetuada com o auxílio de um dispositivo constituído de um sensor que emite som quando em contato com a água, denominado pio elétrico. Também é possível fazer leituras automatizadas. No entanto, é importante ter cuidado ao usar esse instrumento em maciços heterogêneos, pois as camadas podem ter diferentes taxas de permeabilidade, o que pode afetar a representatividade do nível d'água indicado (OLIVEIRA, 2020).

Ademais, Fonseca (2003) aborda que em barragens de terra, os medidores de nível d'água são usados para avaliar a potencial colmatção ou detectar cargas hidráulicas nos sistemas de drenagem interna, nas ombreiras e nas zonas de jusante. Eles monitoram os riscos potenciais de saturação e de redução das condições de estabilidade do talude de jusante.

A Figura 5 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 6 apresenta o medidor de nível d'água instalado em campo.

**Figura 5 - Esquema de medidor de nível d'água**



Fonte: Fonseca (2003).

**Figura 6 – Medidor de Nível d'água**



Fonte: Geothra (2023).

### 2.3.3 Princípios e Instrumentos para a Medição da Poropressão

Poropressão é a pressão da água subterrânea nos poros da rocha e do solo, resultante do peso da coluna de água nos pontos abaixo do lençol freático. É positiva abaixo do lençol freático, nula no mesmo nível e negativa acima do lençol freático quando da ocorrência de sucção no solo (CERQUEIRA, 2017).

Os piezômetros são usados para medir a pressão da água (poropressão) em locais específicos de barragens, fundações e ombreiras. O objetivo de uma medição piezométrica é medir a pressão da água em um ponto específico dentro de uma massa de terra, rocha ou concreto (DHAWAN *et al.*, 2018).

Segundo Silveira (2013), todos os piezômetros requerem algum fluxo d'água para fora ou para dentro do instrumento, até que ocorra equilíbrio com a poropressão no solo. Assim, o tempo de resposta do piezômetro para medir uma variação na poropressão depende da quantidade de água necessária para sensibilizar o instrumento, que pode ser hidráulico, pneumático ou elétrico.

De acordo com Fonseca (2003), a posição da linha freática no interior do maciço de uma barragem é importante nas análises de sua estabilidade ou na interpretação dos resultados de sua piezometria.

De acordo com Silveira (2013), a resistência e a deformação dos solos são controladas pela tensão efetiva. Dessa forma, a medição da poropressão é importante para determinar a posição da superfície freática e de toda a rede de percolação através do maciço e da fundação. As principais situações são:

- Avaliação dos fatores de segurança dos taludes, visto que as poropressões medidas em um aterro de barragem e em sua fundação podem ser utilizadas para o cálculo de estabilidade pelo método de equilíbrio-limite, considerando-se as tensões efetivas;
- Indicação de desempenho de dispositivos de vedação, pois a medição das poropressões, imediatamente a montante e a jusante do núcleo ou de uma trincheira de vedação pode indicar infiltrações preferenciais através de um núcleo de barragem e podem ser detectadas pela instalação de

piezômetros em juntas transversais, eventualmente, deixadas durante a construção.

Os piezômetros instalados em uma barragem, seja na fundação ou no aterro, após a construção, são geralmente inseridos em furos de sondagem. O elemento poroso de um piezômetro é normalmente cercado por areia, sendo a célula vedada no interior da sondagem, por um trecho de injeção, de bentonita, por exemplo (SILVEIRA, 2013).

Piezômetros instalados no espaldar de montante de uma barragem podem fornecer dados relevantes sobre as condições de estabilidade durante a operação ou o esvaziamento rápido do reservatório (SILVEIRA, 2013).

Os dados obtidos a partir dos piezômetros são importantes para alertar sobre possíveis problemas, como movimentos ou infiltrações imprevistas (DHAWAN *et al.*, 2018).

Silveira (2013) discorre que as leituras das poropressões realizadas a partir dos piezômetros em uma barragem e em sua fundação podem ser úteis para diversas aplicações, como: para o cálculo de estabilidade com a utilização de tensões efetivas para avaliar os fatores de segurança dos taludes; avaliar o desempenho de dispositivos de vedação, como o núcleo ou trincheira de vedação; piezômetros instalados em juntas transversais podem detectar infiltrações preferenciais através do núcleo e fornecer informações úteis para a manutenção e reparo da barragem; identificação de subpressão na fundação; alertar sobre a necessidade de execução ou suplementação de poços de alívio a jusante, para o alívio das subpressões na área. Os piezômetros no espaldar de montante podem fornecer dados relevantes sobre as condições de estabilidade durante o esvaziamento rápido do reservatório ou operação.

A seguir, serão apresentados os princípios de funcionamento de alguns tipos distintos de piezômetros.

### **Piezômetros *Standpipe* (Casagrande)**

Os piezômetros *standpipe*, também conhecidos como piezômetros de tubo aberto, são instrumentos confiáveis e robustos, onde o modelo construído por Casagrande é

o mais conhecido e utilizado (MACHADO, 2007). São utilizados para observação das subpressões ou poropressões, em barragens de terra, visto que são simples, apresentam baixo custo e ótimo desempenho a longo prazo (SILVEIRA, 2013).

O processo construtivo é parecido com o medidor de nível de água e as principais diferenças são: o comprimento do trecho perfurado e, na extensão do trecho do furo preenchido com material drenante geralmente limitado entre 1,0 e 1,5 metros (MACHADO, 2007).

O piezômetro de Casagrande é um dispositivo que consiste em um tubo orientado ou perfurado inserido em um furo de sondagem para medir a carga piezométrica. O nível da água dentro da tubulação representa a carga piezométrica na posição da célula de areia. Um selo de bentonita evita a influência das condições piezométricas das camadas superiores. As variações da célula de areia são medidas e submetidas às condições barométricas (CERQUEIRA, 2017).

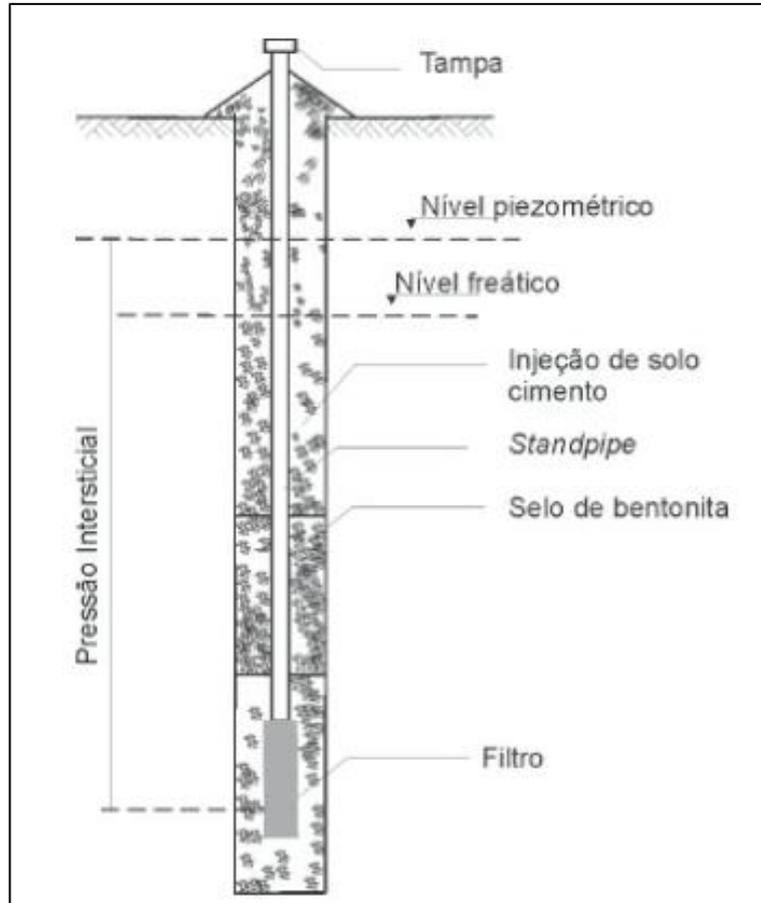
Os piezômetros de tubo vertical aberto (Casagrande) são usados para medir a pressão dos poros em solos com alta permeabilidade, como areia, e são facilmente instalados. Esses tipos de piezômetros são simples, confiáveis, baratos e fáceis de verificar (DHAWAN *et al.*, 2018).

Os piezômetros de tubo aberto, quando instalados em materiais de baixa permeabilidade, apresentam um atraso no tempo de resposta em relação a variação do nível de água do reservatório (SMIRDELE, 2014).

Cerqueira (2017) acrescenta, em seu estudo, que a automatização das leituras de um piezômetro Casagrande pode ser feita com a descida de um transdutor de pressão ou sensor de corda-vibrante saturado e calibrado dentro do tubo até atingir 30 cm acima da base do instrumento, pois a medida da carga piezométrica sofre influência das condições barométricas.

A Figura 7 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 8 apresenta um piezômetro Casagrande instalado em campo.

Figura 7 – Esquema de um Piezômetro *Standpipe* (Casagrande)



Fonte: Silveira (2013).

**Figura 8 – Piezômetro Casagrande**



Fonte: Geothra (2023).

### **Piezômetros Hidráulicos**

Os piezômetros hidráulicos são constituídos por uma pedra porosa, conectada a um painel de leitura externo por meio de dois tubos flexíveis de nylon revestidos de polietileno, que são completamente saturados com água destilada e deaerada. Por meio da pedra porosa, a água que está contida nos poros do solo ou nas fraturas da fundação da barragem fica em contato direto com a água no interior da tubulação e no painel de leituras. Dessa forma, qualquer variação de poropressão junto à célula piezométrica será automaticamente registrada no indicador externo de pressões. As medidas de pressões são feitas quando é realizada a abertura dos registros que conectam cada um dos tubos provenientes dos piezômetros ao medidor externo, aguardando a completa estabilização (FONSECA, 2003).

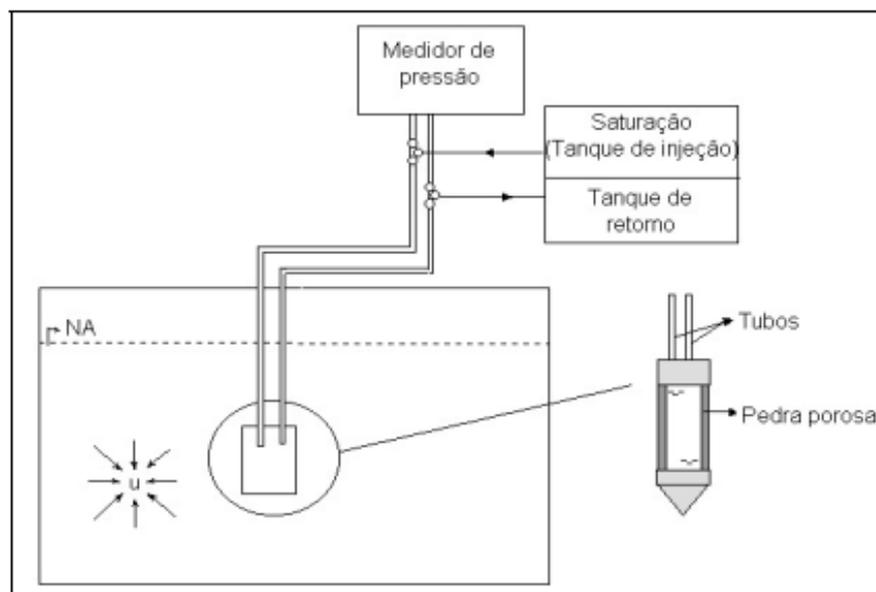
Segundo Machado (2007), os piezômetros hidráulicos foram desenvolvidos para serem instalados em fundação ou aterro durante o período de obra. A principal diferença em relação ao piezômetro pneumático (descrito a seguir) é que o ar é

substituído pelo óleo e não há membrana diafragma, entretanto, o princípio de funcionamento é o mesmo.

Sestrem (2012) afirma que em ambas as tubulações as leituras devem ser as mesmas e, caso estejam distintas, um procedimento de circulação de água deaerada deve ser realizado para remover as possíveis bolhas de ar no sistema até que a pressão seja equalizada.

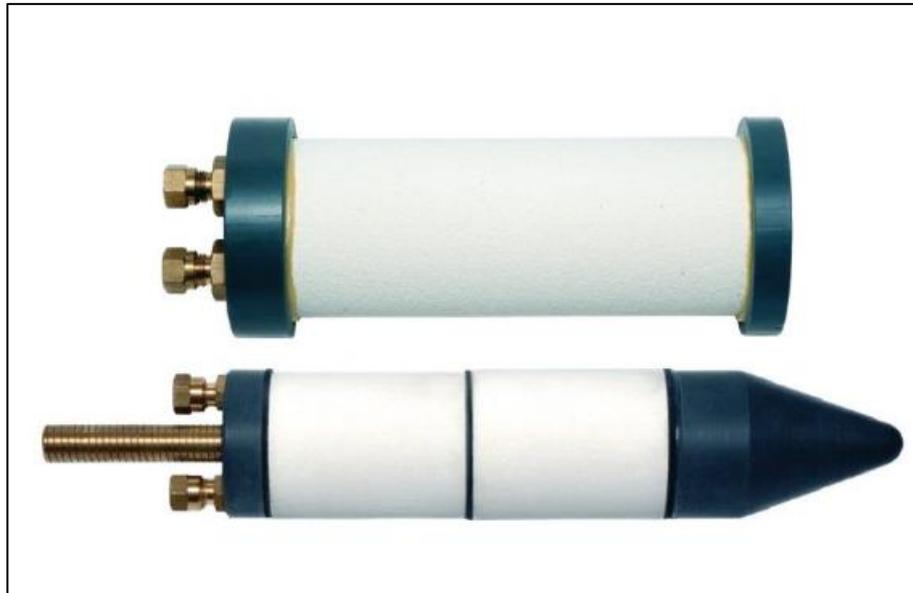
A Figura 9 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 10 apresenta o instrumento.

**Figura 9 – Esquema Geral de um Piezômetro Hidráulico**



Fonte: Fonseca (2003).

**Figura 10 – Piezômetro Hidráulico**



Fonte: Geoteknik (2023).

### **Piezômetros Pneumáticos**

Os piezômetros pneumáticos são utilizados para determinação de poropressão e subpressões em maciços de terra, taludes e fundações. O princípio de funcionamento se baseia no equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível, considerando a pressão de água a ser medida e a pressão do gás que é medida através de um manômetro (MACHADO, 2007).

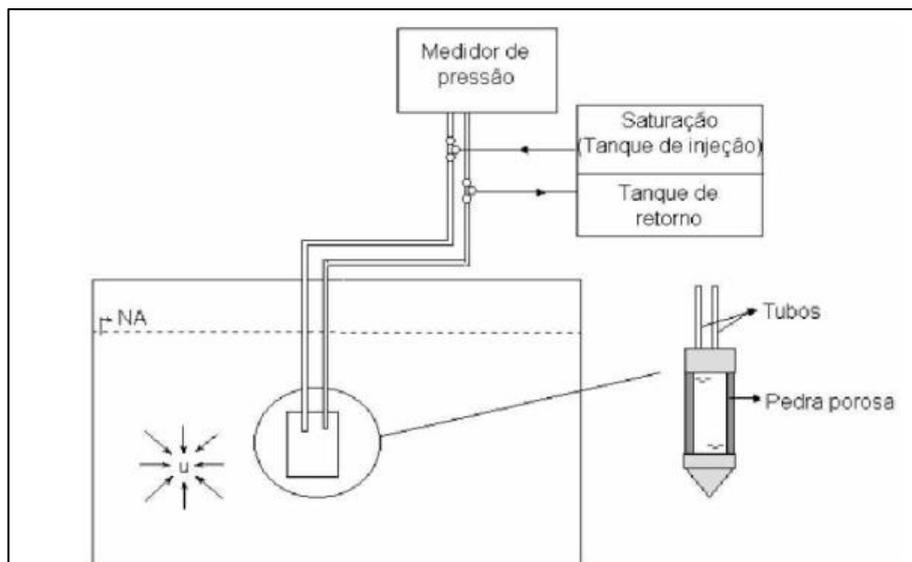
Este instrumento consiste em um sensor piezométrico pneumático, inserido em um furo de sondagem pré-perfurado por meio de uma estrutura de suporte ou até mesmo cravados em solo mole. O sensor é envolto em areia, por onde o fluxo da água subterrânea percola até atuar também no sensor, que por sua vez é submetido à uma determinada poropressão (DHAWAN *et al.*, 2018).

Segundo Fonseca (2003), os piezômetros pneumáticos efetuam as medidas das poropressões a partir de um processo pneumático (a partir da injeção de um gás, geralmente nitrogênio) que tem por objetivo propiciar um regime de equalização de pressões internas na célula piezométrica e forçar a deflexão de um diafragma associado. Então, a célula piezométrica é conectada a um medidor externo de

pressões através de dois tubos flexíveis, designados como tubo de alimentação e tubo de retorno.

A Figura 11 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 12 apresenta a foto de um piezômetro pneumático.

**Figura 11 – Esquema de um Piezômetro Pneumático**



Fonte: Fonseca (2003)

**Figura 12 – Piezômetro Pneumático**



Fonte: Soil Instruments (2023).

### **Piezômetros Elétricos**

Os piezômetros elétricos são constituídos por um diafragma de aço inoxidável no qual são fixados extensômetros elétricos de resistência. A variação na resistência dos extensômetros provocada por deflexões do diafragma produz um sinal elétrico, então a diferença é registrada por um medidor externo, obtendo-se as medições do instrumento (SILVA, 2016).

Segundo Machado (2007), os aparelhos elétricos correlacionam sinais elétricos a grandezas físicas. Esse instrumento apresenta baixo tempo de resposta, visto que, devido ao pequeno volume de água que o maciço necessita para o diagrama do transdutor deslocar. É utilizado para obtenção de poropressões e subpressões em maciços de terra, fundações e taludes. Além disso, permite efetuar medidas dinâmicas de poropressão, permitindo frequências de registro importantes para regiões que indicam sismicidade significativa. É possível também automatizar suas leituras, possibilitando o monitoramento das poropressões remotamente.

Niz (2010) aborda que o funcionamento dos piezômetros de resistência elétrica é baseado em uma ponte de Wheatstone, visto que as alterações da pressão intersticial

do solo são transmitidas mecanicamente a uma resistência elétrica que, a partir da variação de pressão, sofre uma variação equivalente no valor de sua resistência.

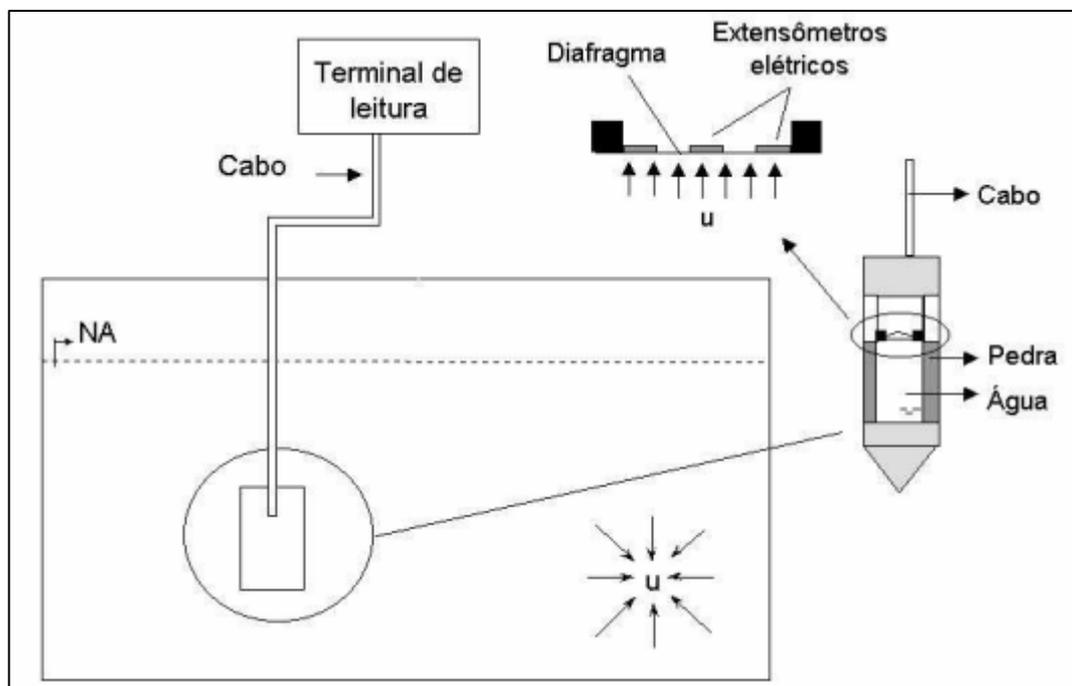
De acordo com Silveira (2013), esses instrumentos apresentam a possibilidade de realizar aferições dinâmicas, com registro contínuo dos dados, pois apresentam um tempo de resposta quase instantâneo em relação à pressão aplicada.

Os piezômetros elétricos oferecem uma resposta rápida a uma mudança no nível freático, mas podem ser caros e menos flexíveis em uso quando comparado com as alternativas hidráulicas (DHAWAN *et al.*, 2018).

Silveira (2006), aborda que esses instrumentos são frequentemente utilizados para automação dos piezômetros *Standpipe*. Entretanto, há necessidade de instalação de um transdutor para cada local a ser utilizado e ter uma rotina de calibração do equipamento.

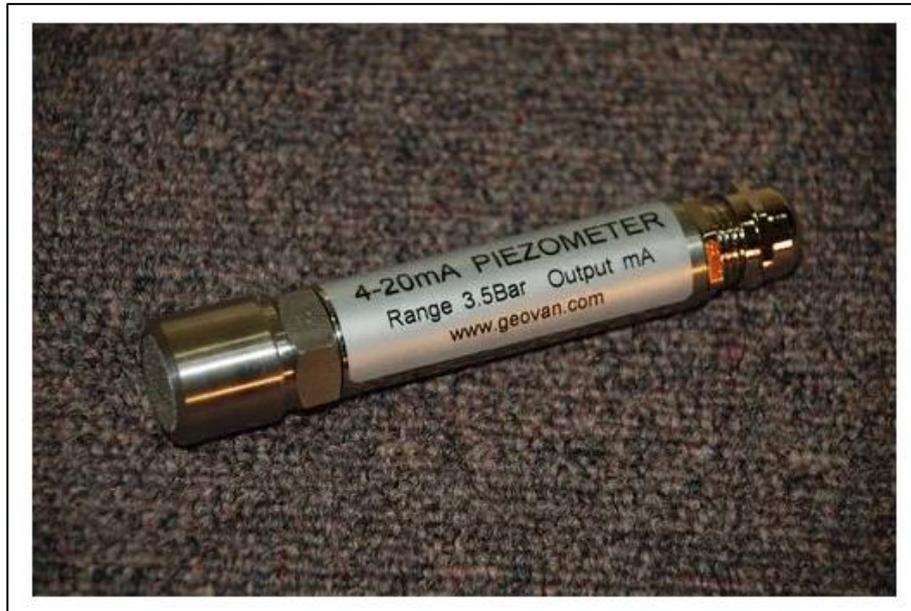
A Figura 13 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 14 apresenta a imagem de um piezômetro elétrico.

**Figura 13 – Esquema de Piezômetro Elétrico**



Fonte: Fonseca (2003)

**Figura 14 - Piezômetro Elétrico**



Fonte: DONG-A GEOVAN (2023).

### **Piezômetros de Corda Vibrante**

Segundo Smirdele (2014), o piezômetro de corda vibrante é constituído por um corpo cilíndrico de aço inox e internamente possui uma pedra porosa e uma membrana de aço inox, cuja face é fixada a um fio de aço tensionado que passa através de um eletroímã. Então, a água intersticial passa pela pedra porosa e impõe uma determinada deformação ao diafragma, vibrando a corda tensionada. Essa vibração induz uma oscilação elétrica de frequência na bobina magnética do eletroímã, que a transmite ao terminal de leituras por meio dos cabos elétricos blindados. As leituras correspondem às poropressões atuantes no diafragma.

A ponta do piezômetro de fio vibratório contém um disco poroso que deixa que a água entre e pressione contra um diafragma de aço inoxidável. Um fio de aço de alta resistência é fixado ao centro do diafragma em uma extremidade e a um “*endblock*” na outra extremidade. Então, o fio é selado dentro de uma câmara de aço inoxidável e ajustado para uma tensão pré-determinada durante a fabricação. A pressão da água aplicada ao diafragma faz com que ele se desvie, alterando assim a tensão e a frequência de ressonância do fio. Um conjunto de bobina/ímã é usado com um

dispositivo de leitura para vibrar o fio e medir a frequência de vibração. São usadas tabelas de calibração ou gráficos para calcular os valores de pressão dos poros com base nas leituras de frequência (DHAWAN *et al.*, 2018).

Nos piezômetros elétricos de corda vibrante a pressão intersticial da água é transmitida por uma pedra porosa para um diafragma interno, cuja deflexão é medida por um transdutor de corda vibrante instalado perpendicularmente ao plano do diafragma (SILVEIRA, 2013).

De acordo com Niz (2010), esses instrumentos podem ser instalados diretamente em furos de sondagem ou também utilizados para automação dos piezômetros *Standpipe*, todavia, o uso destes equipamentos impõe a necessidade de uso de um equipamento para cada painel de leitura.

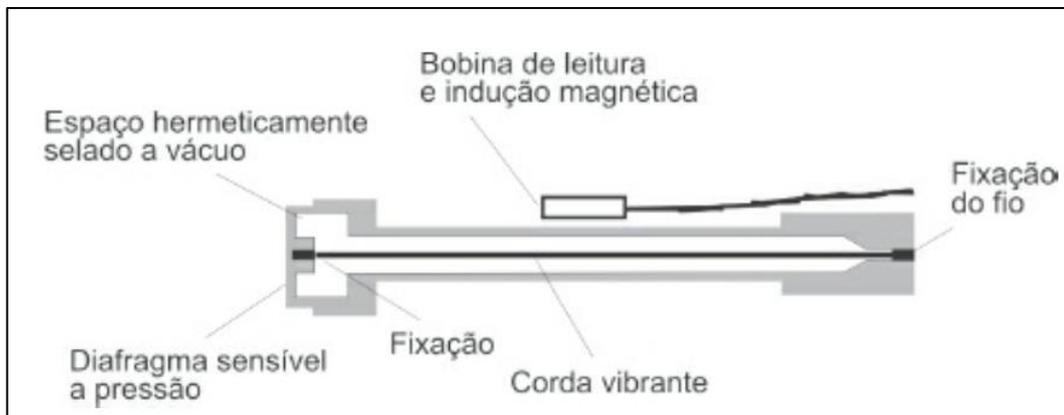
Guimarães Filho (2021) aborda que para o seu bom funcionamento, assim como os *Standpipe*, é necessária uma calibração precisa para evitar erros sistemáticos de coleta de dados.

Machado (2007) apresenta em seu estudo que os piezômetros elétricos de corda vibrante apresentam alta resolução, resposta rápida as variações de poropressão, têm possibilidade de automação das leituras e os sinais podem ser monitorados a longas distâncias.

Segundo Silveira (2013), atualmente, são muito usados na auscultação de barragens de terra, pois têm boa precisão, sensibilidade e podem ser lidos à distância, permitindo que sejam integrados a um sistema de automação.

A Figura 15 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 16 apresenta o instrumento.

**Figura 15 – Esquema de Funcionamento de Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante**



Fonte: Silveira (2013)

**Figura 16 – Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante**



Fonte: GEOTHRA (2023).

#### 2.3.4 Princípios e Instrumentos para a Medição de Deslocamentos

Vários deslocamentos e deformações ocorrem em todas as barragens. O movimento horizontal ocorre no sentido montante-jusante, mas também pode ocorrer ao longo do eixo da barragem. Pode envolver o movimento de uma barragem inteira em relação às suas ombreiras ou fundação ou uma parte de uma barragem em relação a outra. Ao avaliar o desempenho e a segurança de uma barragem, é essencial que os movimentos sejam cuidadosamente observados (DHAWAN *et al.*, 2018).

As barragens de terra estão constantemente sujeitas a deformações e deslocamentos, por agentes internos e externos, além das suas características naturais. Dessa forma, mensurar os deslocamentos é extremamente importante para que seja possível sistematizar o comportamento das estruturas (MACHADO, 2007).

Machado (2007) ainda acrescenta que é necessário o acompanhamento contínuo das diversas variáveis de projeto, em relação aos valores previstos e as leituras “*in situ*”, além de detectar possíveis fenômenos que possam comprometer a estabilidade da barragem.

Conforme Fonseca (2003), os deslocamentos horizontais devem ser medidos nas fases de construção, enchimento e operação da barragem. Outrossim, os deslocamentos verticais são verificados para definição da magnitude dos recalques e do tempo de estabilização da estrutura.

Segundo Machado (2007), os deslocamentos horizontais de uma barragem podem desenvolver:

- Fissuras transversais, trincas ou abatimentos no aterro;
- Ocorrência de erosão interna;
- A partir de uma erosão interna, pode induzir superfícies potenciais de ruptura.

Diversos instrumentos podem ser utilizados para quantificar os deslocamentos ocorridos em uma estrutura de contenção de rejeitos (FONSECA, 2003). Alguns dos principais citados por Fonseca (2003), são os marcos superficiais e os inclinômetros.

A seguir serão apresentados os princípios de funcionamento de alguns tipos distintos de instrumentos para medição de deslocamentos horizontais e verticais.

### **Marcos Superficiais**

Segundo Silveira (2016), um dos métodos mais antigos e simples para a observação dos deslocamentos de uma barragem de terra e/ou enrocamento consiste na instalação de marcos superficiais ao longo das bermas e da crista para a investigação dos recalques e deslocamentos horizontais da estrutura. As medições devem ser iniciadas durante o período construtivo e durante os períodos de enchimento do reservatório e de operação. São importantes para o acompanhamento dos recalques da barragem e para a constatação, eventualmente, de indícios de instabilidade do talude de jusante.

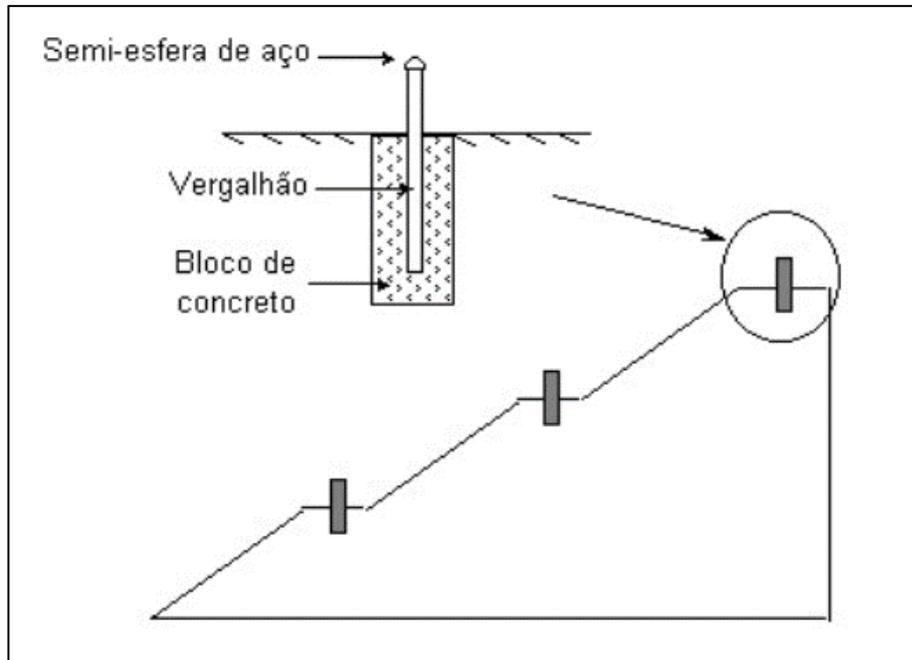
Smiderle (2014) aborda em seu estudo que os marcos superficiais permitem o monitoramento de recalques superficiais e deslocamentos horizontais durante o período construtivo e operacional de uma barragem. São geralmente instalados ao longo da crista e bermas de jusante, mas também podem ser instalados no talude de montante, quando é necessário monitorar deslocamentos durante o processo construtivo e devido ao enchimento do reservatório ou à variável do nível.

Os deslocamentos são medidos por meio de levantamentos topográficos periódicos, em relação aos marcos de referência (fixos) instalados em pontos indeformáveis fora da região de influência da barragem (FONSECA, 2003).

De acordo com Machado (2007), a distribuição espacial dos marcos superficiais é definida em função das necessidades de interpretação e avaliação do comportamento deformacional do maciço.

A Figura 17 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 18 apresenta um marco superficial instalado em campo.

**Figura 17 – Esquema de Instalação de Marco Superficial**



Fonte: Fonseca (2003)

**Figura 18 – Marco Superficial**



Fonte: CoMMetro Engenharia

Com o avanço da tecnologia, Saraiva *et al.* (2017), aborda em seu estudo a utilização de Estação Total Robótica para avaliação de deslocamentos. A Estação Total Robótica possui funções para busca automática de prismas em que esses são rastreados pelo próprio equipamento. Contrariamente, na Estação Total Tradicional, as medições são realizadas a partir da mira em cada prisma dos marcos superficiais instalados ao longo das estruturas.

Na Estação Total Tradicional os dados são salvos na própria estação, sendo necessária anotações por parte do responsável, sendo mais susceptíveis a erros humanos, tanto na medição quanto nos registros das leituras. Já a Estação Total Robótica permite gravar os dados na memória do equipamento e enviá-los a um sistema online para que as medições feitas sejam gravadas e avaliadas em um terminal remoto (SARAIVA *et al.*, 2017).

A Figura 19 mostra a Estação Total Tradicional e a Estação Total Robótica citadas anteriormente.

**Figura 19 – Estação Total Tradicional e Estação Total Robótica, respectivamente.**



Fonte: SARAIVA *et al.* (2017)

### **Inclinômetros**

Os inclinômetros consistem em uma placa de base, sensor e dispositivo de leitura. A placa de base é cimentada ou aparafusada a qualquer superfície horizontal ou vertical e mede a rotação vertical da superfície (DHAWAN *et al.*, 2018).

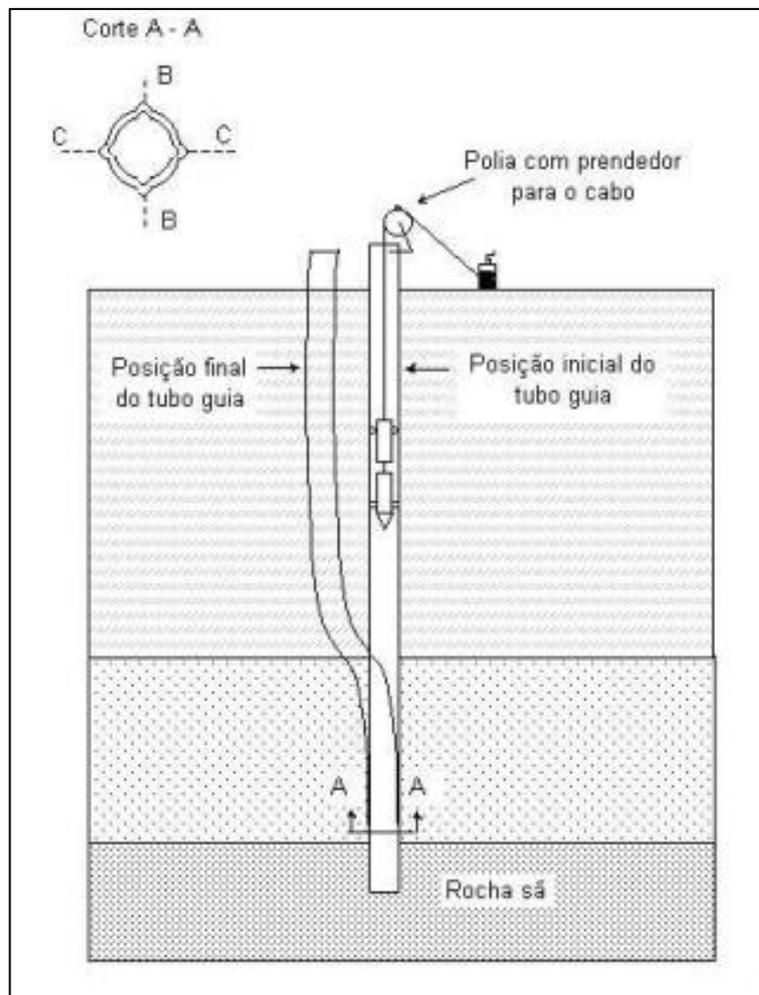
Os inclinômetros são utilizados com o objetivo de mensurar deslocamentos horizontais, em profundidade e superficiais, e de acordo com Machado (2007), os deslocamentos horizontais ocorrem devido a compressibilidade dos materiais que compõe o aterro da barragem.

Segundo Fonseca (2003), os tubos dos inclinômetros podem ser de plástico, alumínio ou PVC rígido. A leitura da deflexão é obtida por meio da introdução de um torpedo no tubo guia até o fundo do furo e que após a sua estabilização à temperatura ambiente é puxado através do cabo de ligação que passa por uma polia no topo do furo e por uma catraca. A partir de então, em cada ponto a ser medido, os deslocamentos horizontais são estimados com base na integração dos deslocamentos relativos a um ponto fixo em profundidade.

Ainda, segundo Machado (2007), os inclinômetros podem medir deformações horizontais de massas de solo para detectar regiões de concentração de deformações, ou seja, potenciais superfícies de ruptura.

A Figura 20 ilustra esquematicamente a configuração do instrumento e a Figura 21 apresenta uma imagem do inclinômetro.

Figura 20 – Esquema Geral de Funcionamento de um Inclínômetro



Fonte: Fonseca, 2003.

**Figura 21 – Vista Parcial do Torpedo**



Fonte: Geothra (2023).

### **Interferometria Radar de Abertura Sintética (InSAR)**

A Interferometria Radar de Abertura Sintética (InSAR) baseia-se na combinação de pelo menos duas imagens SAR. A natureza monocromática dos ecos refletidos permite combinar a informação de fase de duas ou mais imagens SAR obtidas sobre a mesma área em instantes diferentes ou simultaneamente (PATRÍCIO, 2018).

Rosa (2004) aborda que o Radar Interferométrico de Abertura Sintética (InSAR) pode ser explicado como “o termo interferometria expressa um fenômeno obtido pela interferência entre ondas de qualquer tipo. Logo, a tecnologia InSAR de mapeamento é capaz de gerar uma imagem interferométrica, de amplitude e fase, a partir de outras duas imagens SAR, onde a diferença de fase destas está relacionada a elevação do terreno”.

Segundo Beringuel (2017) a Interferometria SAR permite que diversos produtos de informação geográfica sejam gerados de forma rápida, econômica e precisa.

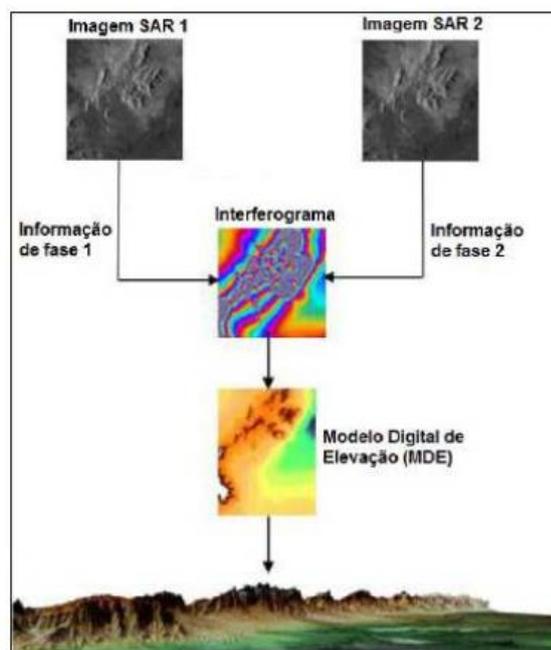
Segundo o Highland *et al.*, (2008), em o Manual de Deslizamento - Um Guia para a Compreensão de Deslizamento, o InSAR utiliza sensores ativos que emitem um

pulso de energia (a partir de um satélite) e gravam, no sensor, seu eco a partir do solo. Além disso, destaca que a maioria dos equipamentos InSAR podem atravessar nevoeiros e chuvas e podem ser utilizados em áreas de difícil acesso.

Highland *et al.* (2008) descreve que, a partir do solo, pelo eco de sinais do satélite para o radar são gerados mapas de modelo digital de elevação (MDE), o que irá exibir o terreno. Assim, duas imagens do mesmo local, de momentos distintos, são geradas, em seguida, fundidas, formando um mapa chamado de interferograma. Por fim, a fusão das duas imagens obtidas demonstra o deslocamento do solo, caso haja, indicando qualquer movimento ocorrido entre o momento no qual as duas imagens foram tiradas.

A Figura 22 ilustra o esquema de resultado do instrumento InSAR.

**Figura 22 - Fluxograma da criação automática de um MDT (Modelo Digital de Terreno) por InSAR**



Fonte: Beringuel (2017) adaptado de Keydel (2005)

A partir da contribuição de toda a pesquisa realizada no item 2.3, a Tabela 1 apresenta o resumo dos tipos instrumentos, o propósito de monitoramento, o princípio de funcionamento e exemplos de aplicação.

**Tabela 1 – Resumo dos Equipamentos de Instrumentação Geotécnica**

<b>Tipo de Instrumento</b>	<b>Propósito de Monitoramento</b>	<b>Princípio de Funcionamento</b>	<b>Exemplos de Aplicação</b>
Medidor de Vazão	Monitoramento da vazão de percolação	A medida da altura da lâmina d'água (carga hidráulica) é efetuada a montante de um vertedor para cálculo da vazão, através de uma fórmula experimental, em função do ângulo da lâmina do tipo de medidor.	Controle da percolação através de poços de alívio e filtro.
Medidor de Nível d'água	Monitoramento da posição da linha freática	Acesso diretamente a água em profundidade para medição da cota, por meio de trena graduada acoplada em um apito (pio) ou em uma sonda elétrica que emite sinais sonoros em contato com a água.	Determinar a linha freática ao longo do maciço para análises de estabilidade e interpretação de resultados de piezometria.
Piezômetro Casagrande	Monitoramento da poropressão ou subpressão	A pressão da água na região do bulbo que contém uma célula piezométrica é convertida diretamente em altura d'água equivalente.	Monitoramento de níveis de água subterrânea, pressão em barragens e estabilidade de taludes e fundações para avaliação dos fatores de segurança dos taludes e indicação de desempenho de dispositivos de vedação.
Piezômetro Hidráulico		A água contida nos poros do solo ou nas fraturas da fundação da barragem está em contato direto com a água no interior do tubo. A variação de poropressão junto à célula piezométrica é automaticamente registrada no indicador externo de pressões.	
Piezômetro Pneumático		Aplicação de uma contrapressão de gás conhecida e controlada para equilibrar a pressão da água intersticial exercida no diafragma.	
Piezômetro Elétrico		Deflexões do diafragma indicam as variações imediatas da resistência dos extensômetros afixados na sua superfície e uma consequente resposta do sinal elétrico de saída é captada em um medidor externo.	
Piezômetro Corda Vibrante		Mudança na frequência de uma corda vibrante, estendida em um corpo que se deforma com a pressão da água.	
Marco Superficial	Monitoramento dos deslocamentos verticais e horizontais	Deslocamentos são medidos por meio de levantamentos topográficos periódicos, em relação aos marcos de referência (fixos) instalados em pontos indeformáveis fora da região de influência da barragem	Acompanhar os recalques e verificar deslocamentos que podem indicar instabilidade no talude.
Inclinômetro	Monitoramento dos deslocamentos horizontais, superficiais e em subsuperfície	Sensor de inclinação em que compara as atuais leituras com as que foram realizadas após instalação.	Detectar regiões de concentração de deformações, ou seja, potenciais superfícies de ruptura.
InSAR	Monitoramento dos deslocamentos horizontais em superfície	Duas imagens do mesmo local, de momentos distintos, são geradas pelo eco de sinais do satélite, em seguida, fundidas, formando um mapa chamado de interferograma. Por fim, a fusão das duas imagens obtidas demonstra o deslocamento do solo.	Determinar de movimentos de massa de longo prazo.

Fonte: Autoria Própria.

## 2.4 Automatização do Monitoramento

Segundo o boletim de diretrizes e estudos de casos referentes à Automação de Sistemas de Monitoramento de Barragens, publicado pelo ICOLD (*International Commission on Large Dams*) (2000), o monitoramento da segurança da barragem requer a implementação dos seguintes processos:

1. Inspeções visuais periódicas das superfícies expostas e acessíveis da barragem, fundação, galerias, obras auxiliares e reservatório;
2. Monitoramento sistemático da barragem e sua fundação usando dispositivos instalados na barragem para avaliar a segurança da estrutura.

O boletim publicado pelo ICOLD (2000), apresenta as principais operações envolvidas no monitoramento de uma barragem:

- A execução de medições por meio de dispositivos de auscultação;
- Coleta e verificação de dados;
- Processamento e análise de dados;
- Interpretação e apresentação de resultados.

Antigamente, as operações citadas acima eram realizadas manualmente nos primeiros aparelhos de auscultação instalados nas barragens. Posteriormente, com o desenvolvimento de computadores o trabalho na apresentação de dados avançou, entretanto, as leituras ainda tinham que ser feitas pelo homem no local da barragem. Ademais, o acesso a aparelhos de auscultação para leituras é muitas vezes difícil e perigoso, principalmente em climas agrestes e para barragens localizadas em zonas nevadas ou quando as medições devem ser realizadas em períodos de cheia ou sismos. Então, os responsáveis pela realização das medições solicitaram meios que permitissem a aquisição de dados remotamente. Dessa forma, foi desenvolvido o Sistemas Automáticos de Aquisição de Dados (SAAD), permitindo a auscultação remota da barragem (ICOLD, 2000).

No entanto, o boletim publicado pelo ICOLD (2000), evidencia que a maioria das barragens em muitos países continua a ser monitorada manualmente e destaca que a auscultação automática de uma barragem não pretende substituir as inspeções visuais que devem continuar a ser obrigatórias.

Segundo Moura *et al.* (2022), com o aumento da produção das mineradoras e conseqüentemente aumento na quantidade de estruturas a serem monitoradas, surge a necessidade de mudanças nos recursos de coleta e análise dos dados que facilitem as análises.

De acordo com Machado (2007), os dados automatizados de instrumentação geotécnica vem sendo largamente empregados na auscultação de barragens de terra, visto que possibilitam maior precisão, alta sensibilidade e podem ser lidos a distância. Dessa forma, permitem a integração dos instrumentos ao sistema de automação das estruturas.

Os principais elementos dos sistemas de monitoramento automático são: Sistema de Aquisição de Dados (ADAS); Sistema de Transmissão de Dados (DTS) e Sistema de Processamento e Gestão de Dados (DPS) (ICOLD, 2000).

Para uma maior segurança no monitoramento de barragens, acredita-se que é necessário automatizar os instrumentos e integrá-los a um mesmo *software* ou banco de dados para melhor análise das informações, mais detalhada e com diminuição do tempo de resposta a novas informações e aumento da confiabilidade nos dados (ZUCHERATTO JÚNIOR, 2021).

Segundo Roca *et al.* (2019), os sistemas automatizados para o registro de dados de monitoramento estão se tornando muito eficazes, visto que ajudam a reduzir potencialmente os erros de leitura, além de aumentarem a qualidade e a frequência dos registros dos dados. Além disso, há aplicativos que permitem monitoramento em tempo real. As informações de monitoramento são coletadas automaticamente de forma remota e são processadas no sistema. Dessa forma, quando combinados um sistema adequado de processamento e alerta de dados, eles podem ser essenciais para reduzir efetivamente o risco de rompimento de barragens.

Quispe *et al.* (2018) em seu estudo discorre que com o desenvolvimento de microcomputadores, *dataloggers* e outros dispositivos, bem como a transmissão de dados por meio de rádio, fibra óptica e satélite, a substituição do sistema de instrumentação convencional tornou-se viável para barragens de grande porte.

Algumas vantagens citadas no boletim de diretrizes e estudos de casos referentes à Automação de Sistemas de Monitoramento de Barragens, publicado pelo ICOLD (*International Commission on Large Dams*) (2000), é que um sistema de monitoramento remoto evita limitações de acesso ligadas a condições atmosféricas e problemas na disponibilidade de equipes de intervenção em caso de imprevistos, permite a escolha de diferentes intervalos de leitura para diferentes sensores, o sistema pode ser usado para acionar alarmes ou iniciar remotamente uma mensagem de advertência. Ademais, permite a identificação de oscilações pontuais dos parâmetros avaliados pela instrumentação, visto que aumenta a sensibilidade e precisão de leituras, extingue possíveis erros humanos de leitura em campo e reduz os custos de homens para leituras de dispositivos e análise de dados.

A automatização de sistemas de monitoramento de barragens traz também limitações e desvantagens. O alto risco de confiar muito no sistema, o que pode levar os operadores a negligenciar as inspeções visuais periódicas e a análise de dados. Além disso, a alta flexibilidade das medições pode produzir excesso de dados que podem não ser analisados corretamente, ocasionando a não detecção de anomalias e implementação de medidas apropriadas (ICOLD, 2000).

Ainda, segundo o boletim publicado pelo ICOLD (2000), problemas eletrônicos podem fazer com que os dados dos dispositivos automáticos sejam errôneos, além de que esse tipo de sistema de monitoramento apresenta alto custo inicial para implementação do sistema e a necessidade de verificações regulares, calibração e manutenção no local por especialistas. Por fim, o boletim evidencia que apesar dos constantes progressos na automatização dos sistemas, continua sendo essencial a existência da possibilidade de se operar manualmente um sistema de monitoramento, afinal não se pode confiar apenas nos aparelhos de medição.

O boletim publicado pelo ICOLD (2000), ressalta a importância de avaliar continuamente alguns aspectos após a instalação dos sensores e transmissores no sistema, como a periodicidade de leituras, a qualidade da transmissão de dados, as condições de calibração e o controle das leituras em relação ao histórico anterior. Também é importante verificar os dados registrados pelo *software* integrado aos sistemas transmissores e o armazenamento permanente e temporário dos dados gerados. A equipe responsável pela operação do sistema deve realizar uma avaliação cuidadosa em todas as etapas, com ênfase nas fases de instalação, operação e manutenção, devido à complexidade na identificação de erros encontrados ou mau funcionamento do sistema.

De acordo com Quispe *et al.* (2018), vários autores recomendam que, devido ao alto custo e ao pouco conhecimento ainda existente sobre a instrumentação automatizada, ela seja instalada no máximo em 25% da instrumentação total do empreendimento. Essa abordagem fornece uma nova forma de monitoramento, permitindo a comparação entre os resultados obtidos pela instrumentação manual e instrumentação automatizada.

Segundo Rosolem *et al.* (2017), o período de teste necessário para verificar a eficácia da instrumentação automatizada varia de 2 a 5 anos. Durante esse tempo, o sistema de automação é aprimorado para alcançar a robustez, confiabilidade e precisão necessárias para uso definitivo como um produto nas barragens selecionadas e em outras onde sua instalação seja desejada.

## **2.5 Legislação e Normas Brasileiras**

Por causa do potencial risco de rompimento de barragens, começou a ser discutido com maior ênfase no final da década de 1960, maneiras de aumentar a segurança de barragens por meio do monitoramento do seu comportamento, a reavaliação das barragens e vertedouros mais antigos, os efeitos do envelhecimento e os impactos ambientais (ICOLD, 2008 *apud* SOUZA, 2019). Desde então, muitos países criaram legislações específicas de segurança de barragens, face à efetiva ocorrência de acidentes e incidentes (SOUZA, 2019)

Barragens são obras geralmente associadas a um elevado potencial de risco (BRASIL, 2002). No Brasil, a primeira norma regulamentadora voltada especificamente para barragens de rejeitos foi a Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, (DNPM, 2001), a partir de então, foram criadas diversas normas para melhorar a gestão da segurança de barragens em nível nacional (SOUZA, 2019).

Em 2003 o Projeto de Lei 1.181 começou a ser debatido no Congresso Nacional com o objetivo de ser criada a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) para o Brasil. Mas, somente em 2010 essa Política foi aprovada, ocorrendo a promulgação da Lei Nacional 12.334, de 20 de setembro de 2010. A PNSB é destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais (BRASIL, Lei nº 12.334, 2010) e como toda Política do Governo Federal, tem objetivos e fundamentos para sua criação (SOUZA, 2019).

Outrossim, essa Lei também é responsável pela criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança (SNISB) e aplica-se a barragens que atendam a ao menos um dos seguintes quesitos (SANTOS, 2019):

- Altura do maciço (contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a quinze metros;
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos;
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou perdas de vida humanas.

De acordo com Santos (2019), a PSNB tem entre seus objetivos a redução da possibilidade de acidentes e suas consequências, a regulamentação de ações de segurança, o monitoramento e acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis, coligir informações e determinar conformidades de natureza técnica.

Tendo em consideração as atribuições do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), de fiscalizar as atividades de pesquisa e lavra para o aproveitamento mineral e as estruturas destinadas a essas atividades, foi desenvolvida a Portaria DNPM (70.389, 2017) (SOUSA JUNIOR *et al.*, 2018). Representa uma exigência do Governo Federal na criação do cadastro nacional de barragens de mineração, o sistema integrado de gestão em segurança de barragens de mineração e estabelece a periodicidade de execução, atualização da qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das inspeções de segurança regular e especial, da revisão periódica de segurança de barragem e plano de ação de emergência para barragens de mineração (Lei nº 12.334, 2010).

Com o intuito de estabelecer critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório, em atendimento ao art. 7º da Lei 12.334/2010, foi desenvolvida a Resolução CNRH 143/2012 (JUNIOR *et al.*, 2018).

A partir de 2016 intensificou-se a publicação de novas normativas devido aos recentes acidentes na barragem do Fundão no município de Mariana, em 2015, e na barragem de Feijão em Brumadinho, em 2019, que ocorreram em Minas Gerais (SOUZA, 2019).

De acordo com CNRH (2012), em relação a categoria de risco, são consideradas os aspectos referentes as características técnicas, plano de segurança de barragens e estado de conservação (SOUSA JUNIOR *et al.*, 2018). O Dano Potencial Associado (DPA), relaciona o volume de rejeitos no reservatório e os impactos sociais, econômico e ambientais. Já o Plano de Segurança de Barragens avalia a situação do projeto (básico, executivo ou conceitual) em relação a estrutura organizacional, qualificação do corpo técnico, existência de manuais e procedimentos para inspeções de segurança e monitoramento, Plano de Ações Emergenciais (PAE) e relatório de inspeção e monitoramento da instrumentação e de análise de segurança (SOUSA JUNIOR *et al.*, 2018).

Em maio de 2017, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) divulgou a Portaria 70.389, determinando que as empresas detentoras de barragens de mineração devem implementar um sistema de monitoramento de segurança no prazo de 24 meses após a publicação do documento. A complexidade do sistema de monitoramento depende da classificação do Dano Potencial Associado (DPA), sendo que em caso de DPA alto, quando há presença de população a jusante da barragem com pontuação 10 e características de construção com pontuação 10, o acompanhamento deve ser integral. A escolha da tecnologia, dos instrumentos e processos de monitoramento é de responsabilidade da empresa e o empreendedor é responsável pelo monitoramento das barragens de mineração e deve manter registros e reportá-los aos órgãos competentes.

A Lei de 2020 estabelece a obrigatoriedade da confecção de um Plano de Segurança de Barragens, a fim de garantir a correta adequação do empreendimento com a Lei vigente, sendo os requisitos necessários para a elaboração, definidos do Art. 8º ao Art. 12º. Resumidamente, o Plano de Segurança de Barragens (PSB), define as seguintes obrigações necessárias para garantir a segurança (PEREIRA, 2021):

- Elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE) para as barragens que possuem DPA médio ou alto, além de incluir as barragens com alto risco, deixando essa categoria a encargo dos órgãos de fiscalização;
- Elaboração de relatórios de inspeção de segurança regular e especial;
- Manter o PSB atualizado, com um responsável técnico;
- Disponibilizar o PSB durante a construção e operação para a equipe, assim como para os órgãos de fiscalização e regulamentação na base de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

A PNSB, com a readequação proporcionada pela Lei de 2020, possibilitou uma maior abrangência quanto as responsabilidades do empreendedor, além do estabelecimento dos critérios de controle e monitoramento (PEREIRA, 2021).

A Resolução nº 32/2020, homologada pela Agência Nacional de Mineração (ANM), revogou o artigo 15º da Resolução ANM nº13, de 2019, e fez alterações pontuais na portaria DNPM nº 70.389/2017. Dentre as mudanças, as principais são relacionadas a obrigação de acionamento automatizado de sirenes e de mecanismos de alerta, além de mais critérios na classificação de categoria de risco e elaboração de estudos de ruptura hipotética mais apurados (GOV, 2020).

Outrossim, a Resolução nº 32/2020, de acordo com o artigo 7º da seção 2:

“Para as barragens de mineração classificadas com DPA alto, existência de população a jusante com pontuação 10 e características técnicas com método construtivo contendo pontuação 10, o empreendedor é obrigado a manter sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral, seguindo os critérios definidos pelo projetista.”

Vale ressaltar que a norma ABNT NBR 13.028, na seção de requisitos para a elaboração e apresentação do projeto, no capítulo 5.4.16 no item “i”, exige que sejam considerados o manual de operação da estrutura incluindo procedimentos de inspeção de campo e monitoramento geotécnico. Para o monitoramento, a norma exige que sejam indicados os elementos a serem monitorados, a frequência da inspeção de campo, as leituras dos instrumentos e os critérios de análise dos dados obtidos (SILVA, 2019).

Por fim, a Agência Nacional de Mineração (ANM), publicou no dia 07 de fevereiro de 2022 a norma nº 95, que estabelece os níveis de controle da instrumentação utilizada em instalações e equipamentos de mineração. De acordo com a norma, a instrumentação utilizada em instalações e equipamentos de mineração deve ser dividida em três níveis de controle: básico, intermediário e avançado. Cada nível corresponde a uma série de requisitos e procedimentos que devem ser seguidos para garantir a segurança da operação. Essa norma tem como objetivo principal garantir a

segurança dos trabalhadores e a preservação do meio ambiente nas atividades de mineração.

## **2.6 Modos de Falha em Barragens**

Caracterizar de forma adequada os modos de falha aos quais uma barragem está sujeita é fundamental para uma gestão de risco eficiente, e o entendimento dos fenômenos auxiliam na avaliação de desempenho dessas estruturas (ROCA, 2019). Dessa forma, é necessário entender os principais modos de falha aos quais as estruturas geotécnicas estão sujeitas.

### **2.6.1 Erosão Interna (*Piping*)**

O fenômeno de erosão interna ocorre quando as partículas de um solo são carregadas excessivamente devido ao fluxo da percolação no maciço, dado a inexistência ou o funcionamento inadequado do sistema de filtros (PIMENTA FILHO, 2013).

De acordo com Roca *et al.* (2019), o processo de erosão interna pode ser dividido em quatro fases: iniciação, continuação, progressão para formar um “tubo” e iniciação de uma brecha.

Segundo Berrones *et al.* (2011), a erosão em estruturas de terra é causada quando há fluxo de água e as forças resistentes à erosão são menores que as forças de infiltração, de forma que as partículas do solo são carregadas pelo fluxo de água.

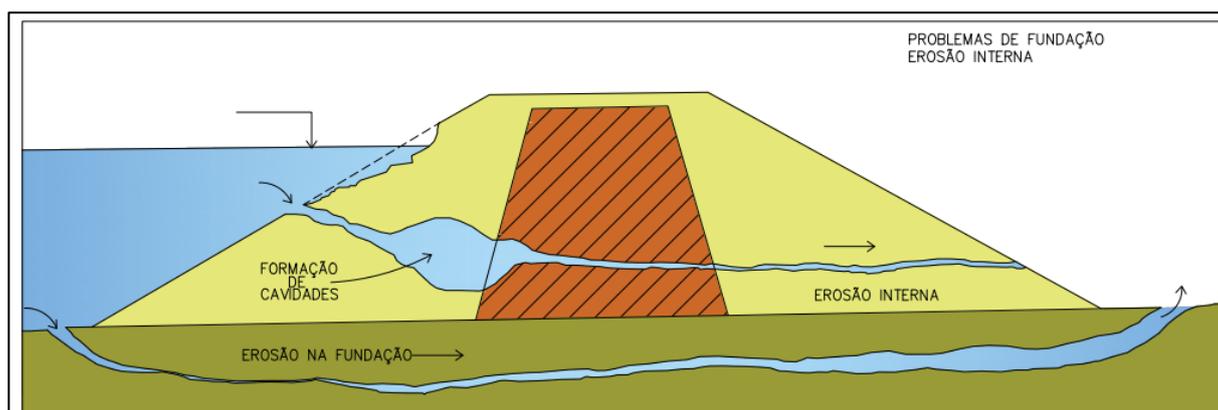
Este processo erosivo pode ocorrer em qualquer fissura existente na estrutura, devido a assentamentos diferenciais, movimentos sísmicos etc. Condições favoráveis de erosão interna também existem em contatos entre solos e paredes rígidas, estruturas de concreto, interface com o leito rochoso, fundação etc. A erosão começa em qualquer ponto onde a água de infiltração descarrega e segue em direção ao reservatório, ampliando gradativamente o canal de infiltração (BERRONES *et al.*, 2011).

De acordo com Guimarães Filho (2021), os materiais heterogêneos ou mal compactados podem favorecer o desenvolvimento de “tubos” internos na estrutura, criando linhas de fluxo preferencial de água, causando o arraste de material dentro do

talude. Ademais, o aumento desse fluxo causa um aumento de poropressões em algumas regiões e o transporte do material no duto que compõe o talude e/ou a fundação da barragem, evoluindo para a erosão interna (*piping*) e um possível rompimento.

Segundo Foster *et al.* (1998), considerando a frequência histórica das rupturas e acidentes em grandes barragens construídas entre 1800 e 1986, muitas das falhas associadas a erosão interna no maciço ocorreram quando o nível do reservatório estava em sua cota máxima ou apenas um metro abaixo desse nível, o que demonstra a importância da carga hidráulica do reservatório e, portanto, do gradiente hidráulico, para o processo de carregamento das partículas do solo do maciço.

**Figura 23 – Erosão interna no aterro e na fundação.**



Fonte: Guimarães Filho, 2021.

### 2.6.2 Galgamento

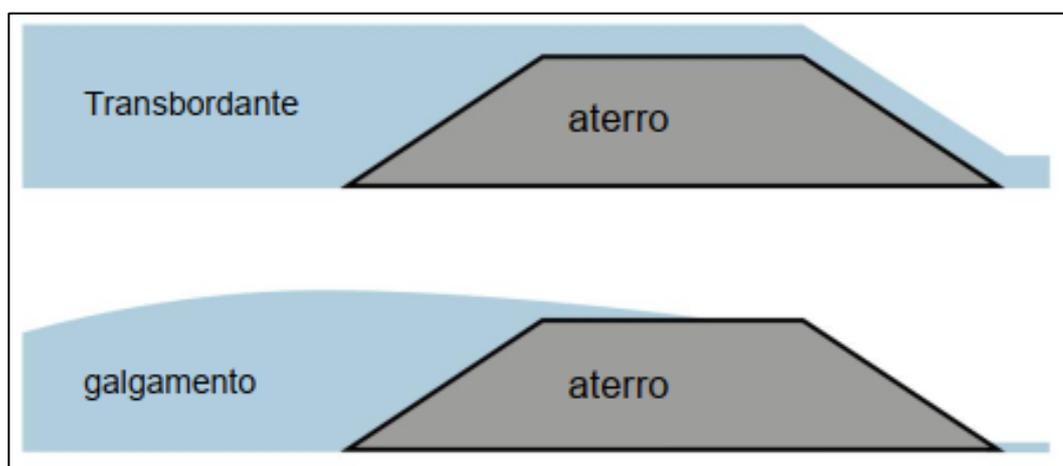
Galgamento é considerado um tipo de transbordamento da barragem. Muitas barragens estão sujeitas a esse modo de falha, seja por uma drenagem deficiente ou insuficiente, índice pluviométrico descontrolado (acima das máximas históricas registradas) ou mau dimensionamento de vertedouros de drenagem. A carga hidrostática (e conseqüentemente a carga total) ultrapassa a capacidade de resistência da barragem. Dessa forma, o talude de jusante fica saturado, perde a sua resistência e causa a ruptura da barragem (GUIMARÃES FILHO, 2021).

Segundo Roca *et al.* (2019), o galgamento pode ocorrer de duas maneiras devido as diferentes causas: o *overtopping* (transbordante) e o *overflowing* (galgamento).

O *overtopping* ocorre pela ação das ondas na crista da barragem. O galgamento das ondas normalmente resulta de um vento forte, deslizamento de terra (instabilidade no talude) ou erros de projeto no dimensionamento da estrutura (ROCA, 2019).

De acordo com Guimarães Filho (2021), já o *overflowig* ocorre quando o fenômeno de *overtopping* é mantido acima da crista da barragem, e então o nível de água ultrapassa a cota do aterro e causa a ruptura.

**Figura 24 – Galgamento (*Overflowing* e *Overtopping*)**



Fonte: Roca *et al.*, 2019 (adaptado).

### 2.6.3 Liquefação Estática e Liquefação Dinâmica

A liquefação, estática ou dinâmica, ocorre pela perda significativa da resistência ao cisalhamento (alta fragilidade), quando da ocorrência de um gatilho que induza o fenômeno, especialmente em solos arenosos saturados (SANTOS JÚNIOR, 2021).

De acordo com Castilho (2017), os gatilhos da liquefação são normalmente divididos em estáticos ou dinâmicos. Os gatilhos estáticos referem-se a um carregamento monotônico no solo, como o carregamento em função do aumento relativamente rápido de uma barragem de rejeitos, infiltração de água durante chuvas intensas e lançamentos de rejeitos. Já os gatilhos dinâmicos referem-se a um

carregamento cíclico, como os provocados por abalos sísmicos, detonações ou tráfego de veículos.

Em seu estudo, Freire Neto (2009), define a liquefação como um processo no qual os solos saturados, sem coesão e contráteis apresentam perda de resistência com a deformação durante o cisalhamento não drenado. Esse processo ocorre devido à tendência do solo em se deformar durante o cisalhamento, ou que resulta em variações nas poropressões durante o carregamento não drenado.

De maneira geral, pode-se compreender a liquefação como um fenômeno que ocorre quando um material perde sua resistência devido ao aumento da pressão nos poros, em resposta a absorção que não permite a drenagem. Esse fenômeno é comumente observado em solos finos, de baixa coesão, alta saturação e que tendem a se contrair quando manifestam esforços de cisalhamento (SILVA, 2010).

Silva (2010) complementa ainda que a liquefação pode ser um fenômeno crítico em depósitos de rejeitos de mineração. Isso ocorre porque a construção de diques ou aterros sobre uma fundação que contém rejeitos fofos e saturados pode resultar em aumentos rápidos nos níveis de tensão em condições não drenadas.

De acordo com Penna *et al.* (2010), o fenômeno da liquefação dos solos acontece quando depósitos granulares saturados, com baixa capacidade *in situ*, são solicitados por um esforço repentino capaz de produzir uma situação não drenada, dessa forma, as poropressões se elevam bruscamente, de modo que a tensão efetiva do material caia consideravelmente, provocando uma redução considerável da sua resistência ao cisalhamento.

Segundo Guimarães Filho (2021), a liquefação estática ocorre quando o material que compõe a barragem é muito fino e possui baixa condutividade hidráulica. Também acontece em materiais granulares como areias ou areias siltosas ao atingir o limite de saturação. Ao submeter a estrutura a elevadas poropressões e cargas verticais, o material se move de forma repentina, devido a isso, os drenos não conseguem aliviar a pressão a tempo.

O autor complementa que, na interface água-ar-sólido, as regiões mais comprimidas do material se comportam como um fluido e conseqüentemente apresentam uma redução significativa de sua resistência, causando a ruptura da estrutura. A liquefação é um fenômeno difícil de detectar, visto que ocorre de forma súbita (GUIMARÃES FILHO, 2021).

A liquefação dinâmica pode ser ativada por um gatilho estático ou dinâmico e é mais comum em países onde é frequente a ocorrência de abalos sísmicos. No caso do Brasil, em que a ocorrência de terremotos não é uma situação frequente, a avaliação do potencial de liquefação estática é mais relevante (FREIRE NETO, 2009).

#### **2.6.4 Instabilização**

A falha por instabilidade do talude ocorre quando a tensão de cisalhamento em uma barragem excede a resistência ao cisalhamento do material da barragem, ocorrendo mais frequentemente uma falha rotacional ou deslizamento de uma parte do talude, o que pode ocasionar na ruptura local ou global da estrutura (ROCA, 2019).

De acordo com Caputo (1988), o aumento do peso do talude e a redução da resistência ao cisalhamento são considerados instabilizantes de um talude e possíveis causas de sua ruptura. O autor afirma que a concomitância desses fatores em estações chuvosas, quando a saturação do material aumenta seu peso específico e o excesso de umidade reduz sua resistência ao cisalhamento devido ao aumento da poropressão, é capaz de explicar a ocorrência de eventos de ruptura e escorregamentos em períodos de grande precipitação pluviométrica. É importante ressaltar que a perda de resistência do solo nessas condições é um fator preponderante em relação ao aumento de peso como agente originário dos fenômenos de ruptura.

Em muitos casos é necessário levar em consideração as forças geradas pelos fluxos de água para avaliar a estabilidade do talude de uma estrutura, pois o aumento da poropressão reduz as tensões efetivas e conseqüentemente a resistência do solo ao cisalhamento. Dessa forma, o aumento do fluxo de água, pode diminuir o fator de segurança de uma estrutura e gerar falhas (BERRONES *et al.*, 2011). O fenômeno pode ser observado na Figura 25.

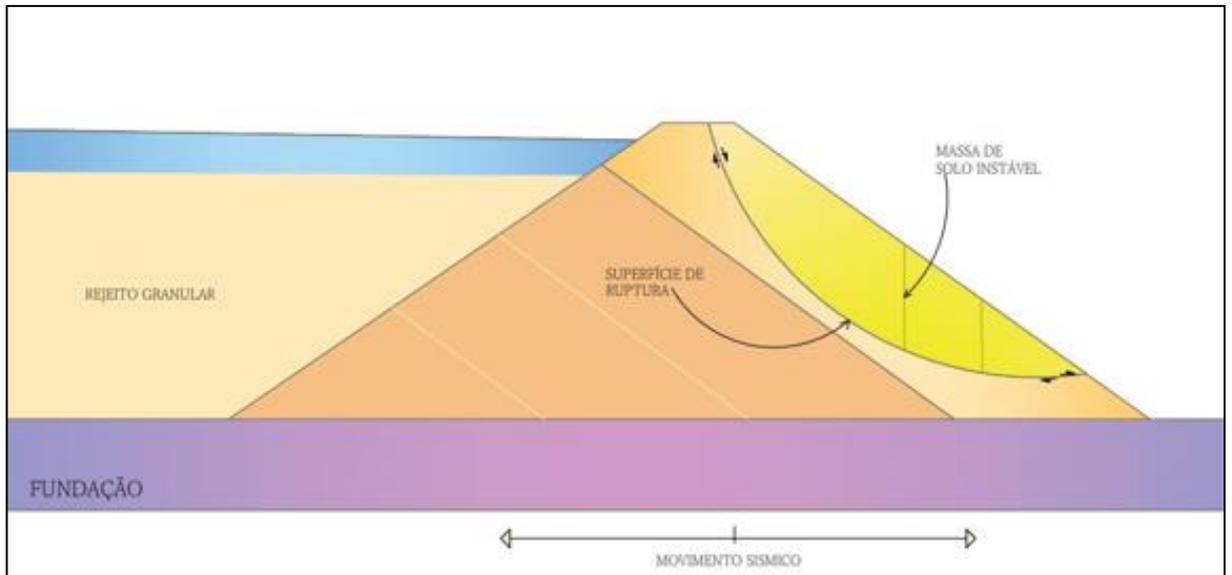
Guidicini *et al.* (1983) considera que as causas externas de ruptura de taludes são aquelas que resultam em um aumento da tensão de cisalhamento sem que haja diminuição da resistência do material. Entre essas causas, destacam-se as mudanças na geometria do sistema, que são consideradas uma das causas mais inesperadas de instabilidade de taludes. O autor ainda acrescenta que a vibração transmitida ao substrato por meio de eventos como terremotos, explosões, tráfego intenso, cravação de estacas e operações de máquinas pesadas pode ser considerada uma das causas externas de instabilidade de um talude.

Já as causas internas são responsáveis pelo colapso do talude sem mudanças na geometria do sistema e resultam na diminuição da resistência interna do material. Entre essas causas estão o aumento da pressão hidrostática, a redução da coesão e o ângulo de atrito interno. O autor acrescenta ainda que as reduções nos parâmetros de resistência decorrentes do intemperismo também podem ser consideradas como causas internas de ruptura de taludes. Isso ocorre porque o processo de desgaste da rocha ou do solo pode levar a um enfraquecimento gradual dos materiais (GUIDICINI *et al.*, 1983).

As fundações, especialmente, as aluvionares são suscetíveis a recalques diferenciais no aterro, com o aparecimento de zonas em tração e fissuras. Uma porção do maciço pode se mover com a movimentação ou com o rompimento da fundação, causando um deslocamento no maciço (ANA, 2016).

Existem zonas ao longo da barragem que se mostram mais suscetíveis a trincas e fissuras, chamadas zonas críticas (mais perigosas). São as que ocorrem transversalmente ao eixo, criando uma concentração de fluxo através do núcleo da estrutura, podendo causar a ruptura da barragem por erosão interna. Tais fissuras são geralmente causadas por recalque diferencial entre trechos adjacentes do maciço. Ademais, são particularmente perigosas quando ocorrem internamente e não apresentam reflexos na superfície. Dessa forma, a medição dos recalques diferenciais transversais se faz necessária para pontuar o recalque diferencial máximo tolerável para aquela barragem e evitar a estabilização do talude (SILVEIRA, 2006).

Figura 25 – Falha circular no talude de jusante



Fonte: Guimarães Filho, 2021.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica na área de geotecnia, com o objetivo de compreender a produção de resíduos da mineração, os princípios e os tipos de instrumentos geotécnicos para a medição de vazão, nível d'água, poropressão e deslocamentos, a automatização da instrumentação geotécnica, a legislação e as normas brasileiras relacionadas e os modos de falha em barragens.

A primeira etapa da revisão bibliográfica foi a definição do tema e dos objetivos da pesquisa. Nesse caso o tema é Monitoramento Geotécnico em Estruturas de Disposição de Rejeito e o objetivo é a ressaltar a aplicação, as limitações e a relevância de sistemas de monitoramento geotécnico com foco em estruturas de disposição de rejeitos para diferentes modos de falha.

Em seguida, foi feita uma busca por artigos científicos, livros e outros materiais que abordam o tema em questão. A busca foi realizada em bases de dados, foram realizadas pesquisas em Periódico CAPES e SciELO, repositórios das Universidades do Brasil, além de livros e normas.

A partir disso, foi elaborada uma tabela resumo contendo os instrumentos geotécnicos referenciados, os propósitos de monitoramento, os princípios de funcionamento e alguns exemplos de aplicação.

Em seguida, com os materiais selecionados, foi possível identificar os modos de falha e as variáveis a serem monitoradas por meio da instrumentação geotécnica e realizar um comparativo entre os monitoramentos manual e automatizado, considerando suas vantagens e limitações. Para, por fim, entender a importância dos instrumentos no monitoramento geotécnico e na prevenção de falhas.

## 4 RESULTADOS

A segurança de uma barragem e da população a jusante da estrutura depende não somente da qualidade do seu projeto e construção, mas também de uma perfeita manutenção durante a operação e de um monitoramento eficaz no controle do comportamento da barragem (ICOLD, 2000).

Tendo em vista o grande volume de materiais extraídos e movimentados no setor da mineração e, conseqüentemente, a elevada produção de rejeitos minerais tornou-se necessária a formação de diques para estocagem desse material, formando as estruturas de disposição de rejeito. Sabe-se que os resíduos são responsáveis por impactos sociais e ambientais e por isso é indispensável a atenção direcionada para o monitoramento de tais estruturas, visando maximizar a segurança e evitar falhas estruturais.

O monitoramento das estruturas de disposição de rejeito tem como objetivo principal fornecer dados, a partir dos diversos tipos de instrumentos geotécnicos, em relação a efeitos diurnos e sazonais, mudanças da pressão hidrostática, infiltrações de água, deflexões da parede, assentamento, taxa de fluxo, vibração, tensão e outros parâmetros significativos que auxiliem na avaliação da segurança de uma estrutura, detectando assim, problemas e falhas em estágios iniciais e mitigáveis.

Cabe ressaltar a importância de um sistema de monitoramento adequado, pois em um empreendimento os instrumentos devem ser selecionados e instalados para atender a objetivos específicos. Ou seja, antes de indicar os métodos de medição, é necessário conhecer as questões geotécnicas que provavelmente surgirão durante as fases de projeto, construção e operação.

A partir do estudo realizado, conhecendo possíveis modos de falha que as estruturas estão sujeitas, torna-se relevante o entendimento das medidas de controle que devem ser feitas, a partir da instrumentação geotécnica, a fim de indicar comportamentos anômalos em uma estrutura, antes que conseqüências graves e onerosas catástrofes ocorram.

O estudo realizado por Pimenta Filho (2013), apresenta que 94% das rupturas de barragens construídas entre 1800 e 1986 foram por erosão, sendo 48% pelo modo de falha de galgamento e 46% pelo modo de falha por erosão interna, como mostra a Tabela 2.

Roca (2019) avaliou em sua pesquisa que para 135 falhas de barragens de rejeito, relatadas de 1917 a 2000, a maioria ocorreu pelas falhas de galgamento (28 registros) e instabilidade de taludes (31 registros), apresentado na Tabela 3.

**Tabela 2 - Estatísticas de rupturas de barragens construídas entre 1800 e 1986**

Mecanismo de Ruptura	Erosão		Escorregamento de Talude	
	Galgamento	Erosão Interna	Instabilidade Estática	Instabilidade Sísmica
% de ocorrência	48	46	4	2
	94		6	

Fonte: Pimenta Filho, 2013 adaptado de Foster *et al.*, 1998, 2000.

**Tabela 3 - Dados apresentados para 135 falhas de barragens de rejeitos para as quais as causas foram relatadas de 1917 a 2000 no ICOLD (2001)**

Modo de Falha	Número de falhas em barragens de rejeitos		
	Barragens Ativas	Barragens Inativas	Total
Galgamento	20	8	28
Instabilidade de Talude	30	1	31
Terremoto	18	0	18
Falha de Fundação	11	1	12
Infiltração e Erosão interna	10	0	10
Falha Estrutural	12	0	12
Erosão	3	0	3
Subsidência de Mina	3	0	3
Desconhecido	15	3	18
<b>TOTAL</b>	<b>122</b>	<b>13</b>	<b>135</b>

Fonte: Adaptado de Roca, 2019.

A partir das estatísticas apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3, é possível observar que as falhas por galgamento, erosão interna e instabilidade de taludes são as mais recorrentes. Os itens 4.1, 4.2, 4.4 e 4.4 descrevem os modos de falha e os instrumentos indicados para monitorar as variáveis correspondentes, a Tabela 4 sintetiza as informações e conclusões entre os modos de falha, as medidas de controle e os tipos de instrumentos recomendados,

O item 4.5 aborda a automatização da instrumentação e as vantagens e desvantagens do monitoramento manual e automatizado são sintetizados na Tabela 5 e Tabela 6. Por fim, o item 4.6 exemplifica o monitoramento geotécnico em uma estrutura real.

#### **4.1 Erosão Interna (*Piping*)**

A erosão interna ocorre quando a poropressão no solo causa o transporte de finos por meio de um fluxo interno de água, gerado em um canal subterrâneo.

A pressão da água pode aumentar devido a vários fatores, como a chuva intensa, subida do lençol freático ou alterações no uso do solo que podem modificar sua permeabilidade. Quando a pressão hidráulica da água se acumula em camadas mais fracas do solo, a força pode arrastar a partícula de solo mais fina e leve, criando o canal de tubulação. Dessa forma, o monitoramento da poropressão é fundamental e pode ser feita por meio de piezômetros em diferentes profundidades do solo.

As deformações podem gerar “canais” no solo quando há deslocamentos verticais e horizontais, criando espaços vazios que podem ser preenchidos com água e a pressão da água nesses espaços vazios pode causar o transporte de partículas de solo e a formação de canais subterrâneos. Por conseguinte, os deslocamentos devem ser monitorados a partir de instrumentos geotécnicos como os marcos superficiais, os inclinômetros e o InSAR, para medir a deformação do solo e identificar áreas que estejam sofrendo deformações significativas.

A vazão de água também é um importante parâmetro a ser monitorado na prevenção de falhas por *piping*, visto que a pressão da água é o principal fator que impulsiona o carreamento de partículas de solo e a identificação da vazão permite

compreender o fluxo de água subterrânea. Os medidores de vazão permitem identificar a vazão, e assim, áreas onde a água possa estar se acumulando em camadas de solo.

## **4.2 Galgamento**

O galgamento pode ocorrer por uma drenagem deficiente ou insuficiente, por um índice pluviométrico descontrolado ou mau dimensionamento de vertedouros de drenagem. A falha acontece quando a carga hidrostática (e consequentemente a carga total) ultrapassa a capacidade de resistência da barragem. Dessa forma, o talude de jusante fica saturado, perde a sua resistência e causa a ruptura da barragem.

O nível da água no solo e o fluxo de água são parâmetros a serem monitorados na prevenção do galgamento. A água pode se infiltrar no solo e criar uma pressão hidrostática e o fluxo de água pode aumentar a taxa de penetração no solo e tornar a estrutura vulnerável ao galgamento. Por isso, o monitoramento do nível do reservatório (com réguas limnimétricas) e da pluviometria (por estações pluviométricas e pluviômetros) são fundamentais.

Destaca-se que a vazão no sistema extravasor é uma variável importante para prevenir o galgamento, haja vista, que o aumento do súbito da vazão pode indicar um aumento do fluxo de água que pode levar ao galgamento. A vazão pode ser monitorada a partir dos medidores de vazão, sendo o tipo definido de acordo com as características da estrutura.

## **4.3 Liquefação Estática**

A liquefação, estática ou dinâmica, ocorre pela perda significativa da resistência ao cisalhamento (alta fragilidade), quando da ocorrência de um gatilho que induza o fenômeno.

O nível de água no solo deve ser monitorado regularmente, pois o aumento repentino do nível de água pode indicar um risco iminente de liquefação. A poropressão no solo também deve ser monitorada para avaliar o risco de liquefação, visto que a resistência do solo pode diminuir devido ao aumento da pressão da água

ou ao carregamento da estrutura. Assim, instrumentos como medidores de nível d'água e piezômetros são fundamentais para indicar um risco iminente de liquefação.

A medição da vazão, por meio dos medidores de vazão, é importante para prevenir a liquefação, pois é possível identificar a quantidade de água que está infiltrando no solo e se há alguma anomalia na distribuição da água, visto que a redução da permeabilidade do solo é um dos fatores que podem levar à ocorrência da liquefação.

A deformação em profundidade do solo também é um sinal importante de que a liquefação pode estar ocorrendo. Ao medir o deslocamento do solo, é possível detectar anomalias e variações que podem indicar a presença de água acumulada e, portanto, a possibilidade de liquefação. Tais deslocamentos do solo podem ser monitorados usando instrumentos geotécnicos, como os marcos superficiais, inclinômetros e o InSAR.

#### **4.4 Instabilização**

A instabilidade no talude ocorre quando os esforços de cisalhamento da estrutura ultrapassam o limite de resistência do material, o que pode desencadear o rompimento da barragem. Ademais, a ruptura na fundação pode se manifestar por meio de fissuras, trincas, deslocamentos e deformações visíveis na estrutura, causando perda de resistência e instabilidade estrutural.

A deformação do talude deve ser monitorada regularmente para avaliar a estabilidade da estrutura, visto que, deformações significativas podem indicar a presença de cargas excessivas ou a perda de resistência do solo, o que pode levar à instabilidade do talude. Instrumentos como medidores de deslocamento, inclinômetros e o InSAR auxiliam na identificação de deformações e conseqüentemente ajudam na prevenção de falha por instabilização.

O monitoramento da variação do nível freático e da pororessão também são importantes, pois a água pode enfraquecer o solo e causar instabilidade. O aumento do volume de infiltração pode indicar uma falha na drenagem ou a presença de uma fonte de água não prevista, que pode levar à instabilidade do talude. Medidores de

nível d'água e piezômetros são fundamentais, visto que auxiliam na avaliação da performance de funcionamento do sistema de drenagem interna, auxiliando na identificação de uma eventual colmatação do sistema de drenagem e uma possível instabilização do talude.

A Tabela 4 apresenta a relação entre módulo de falha, medidas de controle, justificativa de instalação e instrumento recomendado, após contribuição de toda a pesquisa realizada nos itens 2.3 e 2.6.

**Tabela 4 - Relação entre módulo de falha, medidas de controle, justificativa de instalação e instrumento recomendado**

<b>Modo de falha</b>	<b>Medida de Controle</b>	<b>Justificativa de Instalação</b>	<b>Tipo de Instrumento</b>
Erosão Interna ( <i>Piping</i> )	Medidas de vazões	Identificar vazão permite compreender o fluxo de água subterrânea.	Medidor de Vazão
	Medidas de deslocamentos verticais e horizontais	Identificar deslocamentos que podem gerar “tubos” no solo, criando espaços vazios que podem ser preenchidos com água.	Marco Superficial / Inclinômetro / InSAR
	Medidas de poropressão	Medir a pressão hidráulica da água que se acumula em camadas mais fracas do solo, a força pode arrastar partículas de solo mais finas e leves, criando o canal de tubulação.	Piezômetro
Galgamento	Medidas de vazões	Medir o aumento súbito da vazão.	Medidor de Vazão
	Leituras do nível freático	Medir o nível de água, visto que a água pode se infiltrar no solo e criar uma pressão hidrostática e o fluxo de água pode aumentar a taxa de penetração no solo.	Medidor de Nível d'Água

Liquefação Estática	Leituras de poropressão	Identificar se houve aumento da pressão da água, pois a resistência do solo pode diminuir.	Piezômetro
	Medidas de deslocamentos em profundidade	Detectar anomalias e variações que podem indicar a presença de água acumulada.	Inclinômetro
	Medidas de vazões	Identificar a quantidade de água que está infiltrando no solo e se há alguma anomalia na distribuição da água.	Medidor de Vazão
Instabilidade no Talude	Leituras de deslocamentos verticais e horizontais	Detectar deformações significativas que podem indicar a presença de cargas excessivas ou a perda de resistência do solo.	Marco Superficial / Inclinômetro / InSAR
	Medidas de poropressão	Medir as poropressões para auxiliar na avaliação da performance de funcionamento do sistema de drenagem interna.	Piezômetro
	Leituras do nível freático	O aumento do volume de infiltração pode indicar uma falha na drenagem ou a presença de uma fonte de água não prevista.	Medidor de Nível d'Água

Fonte: Autoria própria.

#### 4.5 Automatização do Monitoramento Geotécnico

No Brasil, a primeira norma regulamentadora voltada especificamente para barragens de rejeitos foi a Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, (DNPM, 2001), a partir de então, foram criadas diversas normas para melhorar a gestão da segurança de barragens em nível nacional (SOUZA, 2019).

Enfatiza-se a Resolução nº 32/2020, homologada pela Agência Nacional de Mineração (ANM) em 11 de maio de 2020, que revogou o artigo 15º da Resolução ANM nº13, de 2019, e fez alterações pontuais na portaria DNPM nº 70.389/2017. Dentre as mudanças, destaca-se, de acordo com o artigo 7º da seção 2:

“Para as barragens de mineração classificadas com DPA alto, existência de população a jusante com pontuação 10 e características técnicas com método construtivo contendo

pontuação 10, o empreendedor é obrigado a manter sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral, seguindo os critérios definidos pelo projetista.”

Entendendo a relevância da instrumentação geotécnica no monitoramento das estruturas de disposição de rejeito e a recente mudança na Resolução nº 32/2020 de acordo com o artigo 7º da seção 2, fica evidente a importância de um monitoramento automatizado de instrumentação, com um acompanhamento em tempo real e período integral para uma maior segurança no monitoramento de barragens.

A aquisição de dados de forma remota é fundamental para que o monitoramento seja de fato automatizado. Dessa forma, é necessário automatizar os instrumentos e integrá-los a um mesmo *software* ou banco de dados para melhor análise das informações. Os principais elementos dos sistemas de monitoramento automatizados são: Sistema de Aquisição de Dados, o Sistema de Transmissão de Dados e o Sistema de Processamento e Gestão de Dados.

Os sistemas de monitoramento automatizados estão se tornando muito eficazes, mas é preciso compreender que o que essa mudança traz de limitações. Assim, após contribuição da pesquisa realizada nos itens 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5, a Tabela 5 e a Tabela 6 apresentam de forma resumida algumas vantagens e desvantagens do monitoramento manual e do monitoramento automatizado.

**Tabela 5 – Vantagens e Desvantagens do Sistema de Monitoramento Manual**

<b>SISTEMA DE MONITORAMENTO MANUAL</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Custo mais baixo em relação aos instrumentos automatizados.	Suscetível a erros humano.

Facilidade de instalação.	Possuem uma frequência de leitura menor do que os instrumentos automatizados, o que pode atrasar a detecção de problemas.
Possibilitam uma interação direta do operador com o instrumento, permitindo inspeção visual.	Não permitem a realização de leituras contínuas, o que pode resultar em lacunas nos dados coletados.
Permitem a realização de leituras em tempo real e a obtenção de resultados imediatos.	A precisão das leituras pode ser afetada pela habilidade e experiência do operador.

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 6 – Vantagens e Desvantagens do Sistema de Monitoramento Automatizado**

<b>SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Evita limitações de acesso ligadas a condições atmosféricas e problemas de disponibilidade de equipes de intervenção em caso de imprevistos.	Alto risco de confiar muito no sistema, o que pode levar os operadores a negligenciar as inspeções visuais periódicas e a análise de dados.
Permite a escolha de diferentes intervalos de leitura para diferentes sensores.	Alta flexibilidade das medições pode produzir excesso de dados que podem não ser analisados corretamente, o que pode ocasionar a não detecção de anomalias e implementação de medidas apropriadas.
O sistema pode ser usado para acionar alarmes ou iniciar remotamente uma mensagem de advertência.	Vulnerabilidade a falhas técnicas, que podem comprometer a precisão e confiabilidade dos dados coletados.
Identificação de oscilações pontuais dos parâmetros avaliados pela instrumentação, visto que aumenta a sensibilidade e acurácia de leituras.	Alto custo inicial para implementação do sistema.
Extingue possíveis erros humanos de leitura em campo e reduz os custos de homens para leituras de dispositivos.	A necessidade de manutenção e calibração regular dos equipamentos para garantir o seu bom funcionamento.
Possibilidade de armazenamento de dados em larga escala, o que permite análises mais complexas e a comparação de dados ao longo do tempo.	O risco de problemas de segurança cibernética, uma vez que os dados coletados são transmitidos eletronicamente.

Redução do tempo necessário para coletar dados, já que os sensores podem coletar informações continuamente.	A dependência de energia elétrica para alimentar os equipamentos, o que pode ser um problema em caso de falhas na rede elétrica.
---	--

Fonte: Autoria Própria

Ressalta-se que ao implementar o processo de automatização no monitoramento geotécnico, é importante que seja realizado com cautela para prever possíveis falhas que já foram observadas pelo sistema convencional de monitoramento e que possam afetar os sistemas eletrônicos, além de falhas que comprometam o funcionamento dos sensores e da transmissão eletrônica, como panes elétricas, calibração ou problemas nos próprios sensores. Todavia, quando bem implementado, o sistema automatizado pode melhorar significativamente a qualidade e confiabilidade da obtenção de dados de monitoramento, permitindo a rápida identificação de anomalias que possam afetar a estabilidade das estruturas.

É importante destacar que o monitoramento automatizado não é suficiente para uma avaliação completa da segurança da estrutura. A instalação de um sistema de monitoramento mais avançado não substitui as inspeções visuais regulares e a análise dos dados coletados. As inspeções visuais de campo são fundamentais, pois permitem identificar falhas e anomalias na estrutura que podem não ser registradas pelos sensores do sistema automatizado. Ademais, mesmo com o avanço da tecnologia de sensores e transmissores, é crucial manter a opção de operação manual do sistema de leituras como uma medida de segurança adicional.

#### **4.6 Monitoramento de uma Estrutura Existente**

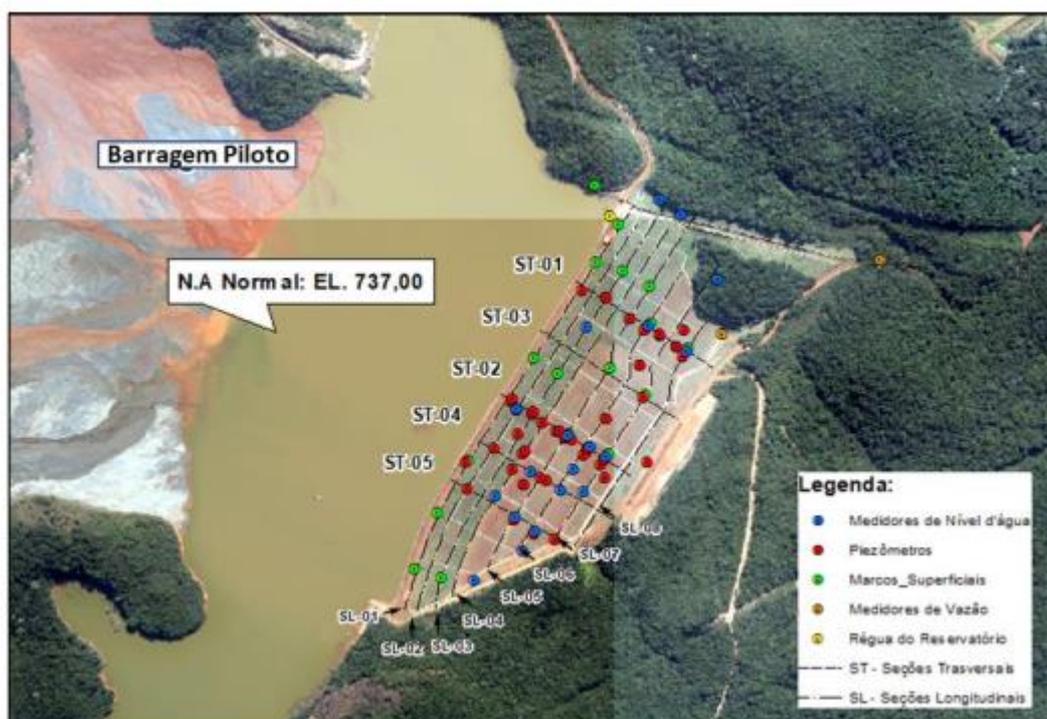
Ao realizar um projeto de monitoramento geotécnico é necessário considerar diversas variáveis, como por exemplo, as características do solo, tipo de estrutura, objetivos do monitoramento, frequência de monitoramento, análise de dados, orçamento, dentre outros. Por conseguinte, cada barragem tem um plano de instrumentação geotécnica distinta.

A seguir é apresentado, de forma resumida, o sistema de monitoramento de uma Barragem-Piloto da empresa Vale, concebida com a finalidade de conter os rejeitos gerados na usina de processamento de minério de ferro, bem como servir de reserva

hídrica para o abastecimento de água para utilização em processos industriais da usina, estudo realizado por Marinaro (2022).

A Barragem-Piloto apresenta 01 régua limnimétrica com 2 segmentos, 45 piezômetros, 19 indicadores de nível d'água, 17 marcos superficiais, e 02 medidores de vazão. Ademais, são realizadas campanhas topobatimétricas periodicamente para o acompanhamento da ocupação do reservatório (MARINARO, 2022).

**Figura 26 - Instrumentos instalados na Barragem-Piloto**



Fonte: Tetra Tech (2018) *apud* Marinaro (2022).

É possível observar a partir da instrumentação instalada na Barragem-Piloto que há monitoramento do nível d'água (Medidor de nível d'água), de cargas piezométricas e poropressão (Piezômetros), de deslocamentos (marcos superficiais) e das vazões (medidores de vazão). Marinaro (2022), evidencia em seu estudo a importância da avaliação da instrumentação implantada, o seu funcionamento, bem como sua suficiência quanto ao monitoramento do comportamento da barragem.

Marinero (2022) apresenta em seu estudo a Tabela 7 que traz a relação de parâmetros observados/medidos e modos de falha.

**Tabela 7 – Parâmetros Medidos/Observados e Modos de Falha**

Parâmetro medido/observado	Modos de Falha					
	Galgamento	Instabilidade do Talude	Ruptura de Fundação	Erosão Interna	Liquefação Estática	Liquefação Dinâmica
Nível de Água do Reservatório	Direta	Direta	Direta	Direta	Suporte	Suporte
Precipitação	Suporte	Direta/Suporte	Direta/Suporte	Suporte	Suporte	Suporte
Poropressão/Nível d'água	-	Direta	Direta	Direta	Direta	Suporte
Percolação (Fluxo de Água)	-	Suporte	Suporte	Direta	Suporte	Suporte
Deformação e Movimento	Suporte	Direta	Direta	Suporte	Suporte	Suporte
Sismicidade e Vibração	Suporte	Direta	Suporte	Direta	Suporte	Direta

Fonte: Adaptado de Pimentel *et al.* (2021) *apud* Marinero (2022).

## 5 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa permitiu compreender a importância do monitoramento geotécnico para prevenir falhas em estruturas de disposição de rejeitos. A metodologia adotada possibilitou identificar os princípios e os tipos de instrumentos geotécnicos utilizados para medir vazão, nível d'água, poropressão e deslocamentos, além de analisar a automatização da instrumentação geotécnica.

Com o estudo dos instrumentos geotécnicos, os propósitos de monitoramento correspondentes, os princípios de funcionamento e exemplos de aplicação, foi possível identificar as variáveis a serem monitoradas em uma barragem a fim de evitar os modos de falha.

Identificou-se que para o modo de falha Erosão Interna, a vazão, os deslocamentos verticais e horizontais e as medidas de poropressão devem ser monitoradas. Já o modo de falha Liquefação Estática, deve-se monitorar a poropressão, os deslocamentos em profundidade e as vazões. Para o modo de falha de Galgamento as medidas de controle devem ser as vazões e o nível freático. Por fim, para o modo de falha de Instabilidade, é necessário monitorar os deslocamentos verticais e horizontais, o nível freático e as poropressões. Ressalta-se que para cada variável a ser observada há um instrumento geotécnico correspondente.

Portanto, evidencia-se que o monitoramento geotécnico é de extrema importância na prevenção de falhas em estruturas de disposição de rejeitos e pode ser realizado de forma mais eficiente e precisa com a utilização de um monitoramento automatizado. Entretanto, é importante levar em consideração, ao realizar um projeto de instrumentação, as limitações de um sistema automatizado para que o objetivo seja alcançado de forma confiável e estratégica.

A pesquisa realizada permitiu compreender a evolução e as tendências tecnológicas do monitoramento geotécnico e o papel da legislação e das normas brasileiras relacionadas ao assunto. Esses conhecimentos são fundamentais para

aprimorar a segurança em empreendimentos de mineração ao possibilitar a redução de falhas em estruturas de contenção de rejeito.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Guidelines for instrumentation and measurements for monitoring dam performance. Reston: 2000

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-. NBR 13.028: Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragem para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reservação de Água. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Congresso. Senado. Lei nº 12.334, de 2010. Institui a Política Nacional de Segurança de Barragens. Coleção de Leis da República Federativa do Brasil. Brasília – DF, 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: 12 de jun. 2022.

SNISB. Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens. [S. I.]. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>. Acesso em: 4 ago. 2019.

SILVEIRA, João Francisco Alves. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. 2. Ed. [S. I.]: Oficina de textos, 2013.

SILVEIRA, João Francisco Alves. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

DE ÁVILA, Joaquim Pimenta *et al.* Segurança de barragens de rejeitos no Brasil: avaliação dos acidentes recentes. Geotecnia, n. 152, p. 435-464, 2021.

SOUZA JÚNIOR, T. F. D., MOREIRA E. B., & HEINECK, K. S. (2018). Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. Holos [recurso eletrônico]. Natal, RN. Vol. 5 (2018), p. 1-39.

DIAS, Marcus Vinicius Lima. Avaliação da segurança de barragens por meio da análise de instrumentação geotécnica. 2017.

OLIVEIRA-FILHO, W. L., ABRÃO, P. Disposição de rejeitos de mineração. In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). Geotecnia Ambiental. Elsevier, Rio de Janeiro, 2015.

PEREIRA, Flávio Godinho; FIRME, Paulo Henrique Camargos; COTTA, João Paulo Vieira. Plano de Ação de Emergência de barragens de mineração: evolução, conceito e discussões. Territorium, n. 28 (I), p. 53-66, 2021.

ADAMO, Nasrat *et al.* Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, v. 11, n. 1, p. 145-202, 2021.

FONSECA, Alessandra da Rocha. Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - estudo de caso das barragens da UHE São Simão. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FREIRE NETO, João Pimenta. Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. 2009.

FOSTER, M.; FELL, R.; SPANNAGLE, M. Analysis of embankment dam incidents UNICIV. Report nº. R-374, September 1998. The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia. 282 p. 1998.

MACHADO, G. de F. Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – MG, 2007.

SMIDERLE, Camila de Souza Dahm. Segurança de barragens: análise da instrumentação da barragem de Itaúba. 2014.

AFFONSO, H. M. M. Instrumentação para Medir Deslocamentos em Barragens de Enrocamento. Dissertação (Mestrado). Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 90. 2004.

TAYLOR, PW. Engenharia e Projeto: Instrumentação para Avaliações de Segurança de Projetos de Obras Civis; Relatório técnico; USACE: Washington, DC, EUA, 1985.

EBERHARDT, Erik; STEAD, Doug. Geotechnical instrumentation. SME mining engineering handbook, v. 1, n. 8.5, p. 551-572, 2011.

MULLER, Tais; VIEIRA, Alex Sandre Campos. RESPONSABILIDADE SOCIOAMBIENTAL E A IMPORTÂNCIA DOS APARELHOS DE MEDIÇÃO EM BARRAGENS. 2019.

CRUZ, Martha de Sousa. Avaliação Dos Processos De Manutenção E Inspeção De Segurança De Barragem Em Usina Hidrelétrica Estudo De Caso. 2021.

WILLINGHOEFER, Matheus *et al.* Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma pequena central hidrelétrica na Bacia do Rio do Peixe. Santa Catarina, p. 86. 2016.

SANTOS, Laryssa Cortes. Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

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.

CERQUEIRA, Hélio Márcio Lopes de. Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas de mineração. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2017.

MÁRCIO LEÃO, 2021, O Mínimo que Você Precisa Saber Sobre Projetos de Pilhas de Rejeito Filtrado [online]. Disponível em <https://institutominere.com.br/blog/O-minimo-que-voce-precisa-saber-sobre-projetos-de-pilhas-de-rejeito-filtrado> [citado em 03 de março de 2023].

FROEHLICH, D.; DHAWAN, D. Guidelines for Instrumentation of Large Dams. 1. ed. Índia: Dam Rehabilitation and Improvement Project, 2017.

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.

DE OLIVEIRA, Davidson Miguel Avelar; DA SILVA, Camila Aparecida Lebron Xavier. Estudo da Arte de Instrumentação Geotécnica, Modos de Falha e Recomendações para Auscultação. 2020.

ALVES, Pedro Ivo Amaro. Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. Ouro Preto, MG, 2020.

SILVA, Lays Capingote Serafim *et al.* Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. Caderno Técnico de Economia e Gestão Ambiental, v. 4, n. 1, pág. 91-104, 2016.

SOUSA JÚNIOR, TF; MOREIRA, EB; HEINECK, KS. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

ZUCHERATTO JÚNIOR, Luiz Nelson. Revisão bibliográfica sobre segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica. 2021.

SILVA, Lays Capingote Serafim *et al.* Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. Anais do IX SIMPROD, 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Águas – ANA. Cursos e Capacitação. [Online]. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/programas-e-projetos/cursos-e-capacitacao>>. Acesso em 16 de outubro de 2020

Sestrem, L. P. (2012) Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea. Dissertação apresentada como requisito parcial da Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil. Curitiba: UFPR.

Niz, M. A. K. Análise da viabilidade da medição de níveis piezométricos por meio da técnica de borbulhamento. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

Vieira, M. F., *et al.* (2017) Influência do lago da UHE Tucuruí sobre a barragem de concreto: um estudo sobre os MTJ' s. Revista CIATEC-UPF.2017, Vol.9 Issue 1, p1-14. 14p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria n° 70.389, de 17 de maio de 2017. Segurança de Barragens. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/portaria-dnmp-n-70389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens/view>>. Acesso em: 29 de junho de 2018.

ROSA, Rafael Antonio da Silva Rosa. Desenvolvimento de um Algoritmo de Desdobramento de Fase para Radar de Imagens Interferométrico Aerotransportado

Utilizando uma Linha de Base. 2004. 106f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) –Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

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.

Quispe, C. C., Fontes, M. M. M., Cardoso, J. C. M., (2018) Instrumentação em barragens: a automatização é realmente uma necessidade? XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG): 28 de agosto a 1 de setembro. Salvador, Bahia, Brasil.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 1. v.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 2.v.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos Manoel. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. 2. ed., rev. e ampl. São Paulo: E. Blücher, 1983.

SANECOM FIBRA. Calha Parshall Padrão. Disponível em: <https://www.sanecomfibra.com.br/calha-parshall-padrao> . Acesso em: 13 mar. 2023.

GEOTRA. Medidor de nível de água. Disponível em: <https://geothra.com/ensaios-campo/medidor-nivel-agua/> . Acesso em: 17 mar. 2023.

INSTRUMENTOS DE SOLO. Piezômetro pneumático. Disponível em: <https://www.soilinstruments.com/products/water-monitors-piezometers-meters/pneumatic-piezometer/>. Acesso em: 17 mar. 2023.

GEOTEKNIK. Piezômetro hidráulico. Disponível em: <https://geoteknik.com.pe/producto/piezometro-hidraulico/>. Acesso em: 17 mar. 2023.

COMMETRO. Recalque — Marcos Superficiais (MS). Disponível em: <http://www.commetro.com.br/instrumento-detahes/5/recalque—marcos-superficiais-ms>. Acesso em: 17 mar. 2023.

GEOTHRA. Inclinômetro. Disponível em: <https://geothra.com/ensaios-campo/inclinometro/>. Acesso em: 17 mar. 2023.

DONG-A GEOVAN CO., LTD. Displacement transducer for civil engineering - PINDST series. Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/dong-a-geovan-co-ltd/product-126171-1511855.html>. Acesso em: 17 mar. 2023.

SNISB. Guia de Diretrizes para Elaboração de Projeto de Barragens e Revisão Periódica - Módulo 4: Plano de Monitoramento e Instrumentação. Disponível em: [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/capacitacao/Arquivos\\_Cursos/curso-guia-de-diretrizes-para-elaboracao-de-projeto-de-barragens-e-revisao-periodica-modulo-4-plano-de-monitoramento-e-instrumentacao.pdf/view](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/capacitacao/Arquivos_Cursos/curso-guia-de-diretrizes-para-elaboracao-de-projeto-de-barragens-e-revisao-periodica-modulo-4-plano-de-monitoramento-e-instrumentacao.pdf/view). Acesso em: 17 mar. 2023.

CASTRO, L. M. A. de; MOREIRA, J. A. L.; GAMA, K. K. da; LIMA, A. A. de; COSTA, T. C. M. T. Avaliação das curvas-chaves de vertedores instalados para monitoramento de vazões de cursos de água de pequeno porte. [S.l.]: [s.n.], 2013. 7 p.

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. O Manual de Deslizamento—Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. Reston, Virginia, US Geological Survey Circular, v. 1325, 2008.

SOUZA, J. C. Avaliação da qualidade da água do Ribeirão Canaã em Uberlândia - MG. 2019. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 17 mar. 2023.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Segurança de Barragens. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/portaria-dnmp-n-70389-de-17-de-maio-de-2017-seguranca-de-barragens/view>. Acesso em: 27 de março de 2023.

Agência Nacional de Mineração (ANM). Resolução nº 32, de 10 de abril de 2019. Dispõe sobre os procedimentos para a elaboração de planos de fechamento de mina

e dá outras providências. Disponível em: <http://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-32-de-10-de-abril-de-2019-84736639>. Acesso em: 17 mar. 2023.

MOURA, Juliana Ester Martins; LEÃO, Márcio F. Automatização de instrumentos de monitoramento em barragens de rejeito no Pará—método construtivo, aplicabilidade e custo para mineradoras. In: XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2018, Belo Horizonte. Anais do XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2018. p. 1-10. Disponível em: <https://www.abas.org/cbhsf2018trabalhos/194.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2023.

SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Guia de diretrizes para elaboração de projeto de barragens e revisão periódica: módulo 4 - Plano de monitoramento e instrumentação. Brasília, DF: ANA - Agência Nacional de Águas, 2019. Disponível em: [https://www.snisb.gov.br/Entenda\\_Mais/capacitacao/Arquivos\\_Cursos/curso-guia-de-diretrizes-para-elaboracao-de-projeto-de-barragens-e-revisao-periodica-modulo-4-plano-de-monitoramento-e-instrumentacao.pdf](https://www.snisb.gov.br/Entenda_Mais/capacitacao/Arquivos_Cursos/curso-guia-de-diretrizes-para-elaboracao-de-projeto-de-barragens-e-revisao-periodica-modulo-4-plano-de-monitoramento-e-instrumentacao.pdf) . Acesso em: 28 mar. 2023.

Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 17 mar. 2023.

PENNA, Lorena Romã *et al.* Liquefação Estática em Depósitos de Rejeitos de Mineração. COBRAMSEG 2010: Engenharia geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade. Liquefação estática em depósitos de Rejeitos de Mineração-COBRAMSEG 2010, p. 1-7, 2010.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Guidelines for Instrumentation of Large Dams. Paris: ICOLD, 2003. Disponível em: [https://www.icold-cigb.org/GB/Publications/online%20book%20store\\_guidelines.htm](https://www.icold-cigb.org/GB/Publications/online%20book%20store_guidelines.htm). Acesso em: 17 mar. 2023.

Guimarães, N. C., Valadão, G. E. S., & Peres, A. E. C. (2016). Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. REM-revista Escola de Minas, 69(4), 455-461.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem. Brasília: ANA, 2016.

DUNNICLIFF, J. Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Wiley, 1988. 577p

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. Brasília, 2012.

QUISPE, C. C., Fontes, M. M. M., Cardoso, J. C. M., (2018) Instrumentação em barragens: a automatização é realmente uma necessidade? XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG): 28 de agosto a 1 de setembro. Salvador, Bahia, Brasil.

ROSOLEM, J.B., Gregatti A.C.M., Carvalho G. M. Melegari L. F P. (2017). Avaliação do Desempenho de Sensores de Fibra Óptica Multiparâmetros nas Barragens das UHES Barra Grande e Foz do Chapecó, XXXI – Seminário Nacional de Grandes Barragens, Belo Horizonte – MG.

SILVA, W. P. da. Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

CASTILHO, Breno de Matos. Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.