



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Samantha Casazza Basílio

REVISÃO DOS PRINCIPAIS INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA MONITORAMENTO DE OBRAS GEOTÉCNICAS DE MINERAÇÃO

Ouro Preto

2024

Samantha Casazza Basílio

Revisão dos principais instrumentos utilizados para monitoramento de obras
geotécnicas de mineração

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

Área de concentração: Engenharia Civil,
Geotecnia

Orientador: Eng^o M.Sc. Hebert da
Consolação Alves – UFOP

Ouro Preto

2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Samantha Casazza Basílio

Revisão dos principais instrumentos utilizados para monitoramento de obras geotécnicas de mineração

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

Aprovada em 23 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Eng^o M.Sc- Hebert da Consolação Alves - Orientador-Universidade Federal de Ouro Preto
Prof^o - Fernando Antônio Borges de Campos - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof^o D.Sc - Grazielle Rocha dos Santos - Universidade Estadual de Minas Gerais

Hebert da Consolação Alves, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Hebert da Consolacao Alves, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 01/04/2024, às 14:35, 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, informando o código verificador **0693581** e o código CRC **B24E02B0**.

*Dedico este trabalho a minha família,
Agradeço ao apoio e carinho e por me permitir chegar até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, expresso minha gratidão à minha família, Solange, Juarez, Sarah, João Diogo e João Vitor pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo, o que me permitiram continuar até aqui.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos de desafio e à minha república Rosa Xiclete que se tornou um lar longe de casa.

Também dedico minha gratidão à equipe da Intertecne, onde tive a oportunidade de aprender e crescer profissionalmente. Aos Engenheiros Valter, Kenneth e o Luigi pelo apoio, e partilha de conhecimento.

Ao meu orientador Eng^o M.Sc Hebert da Consolação Alves pelo apoio, paciência, e cuidado necessário para a execução deste trabalho.

À Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas pelo ensino público de excelência.

Agradeço a Deus por me iluminar e me permitir sempre seguir em frente e crescer com os obstáculos.

RESUMO

O monitoramento de obras geotécnicas por meio da instrumentação torna-se importante, pois é o que permite manter a longevidade de uma estrutura por meio avaliações periódicas. Em uma obra geotécnica, os instrumentos permitem acompanhar e compreender o comportamento das estruturas, como fundações, barragens, túneis e pilhas. São instalados em locais estratégicos da obra, permitindo a coleta de dados para avaliar deformações, tensões, pressões e deslocamentos sofridos pelas estruturas. Considerando a relevância da instrumentação geotécnica e as dificuldades na escolha, instalação e interpretação, o estudo tem como objetivo fornecer uma revisão dos instrumentos mais utilizados no monitoramento de obras da mineração e apontar vantagens que devem ser consideradas na escolha do tipo da instrumentação da estrutura. Além disso, o trabalho abrange uma apresentação das estruturas geotécnicas encontradas em ambiente de mineração, relacionando os instrumentos mais utilizados em cada uma delas. Ao realizar esse estudo abrangendo funcionamento e dados de instalação, o presente trabalho tem como resultado uma compilação de dados que abordam aspectos como aplicabilidade, precisão, limitações e considerações teóricas que irão facilitar a tomada de decisões em obras geotécnicas.

Palavras-chaves: Instrumentação, monitoramento geotécnico, obras geotécnicas, revisão, ferramentas.

ABSTRACT

Monitoring geotechnical works through instrumentation becomes important, as it allows for the longevity of a structure through periodic evaluations. In a geotechnical work, instruments enable monitoring and understanding the behavior of structures such as foundations, dams, tunnels, and piles. They are installed in strategic locations of the work, allowing for data collection to assess deformations, stresses, pressures, and displacements experienced by the structures. Considering the relevance of geotechnical instrumentation and the difficulties in choosing, installing, and interpreting it, the study aims to provide a review of the most commonly used instruments in monitoring mining works and to point out advantages that should be considered in choosing the type of structure instrumentation. Additionally, the work encompasses a presentation of the geotechnical structures found in mining environments, relating the most used instruments in each of them. By conducting this study covering operation and installation data, the present work results in a compilation of data that addresses aspects such as applicability, accuracy, limitations, and theoretical considerations that will facilitate decision-making in geotechnical works.

Keywords: Instrumentation, geotechnical monitoring, geotechnical works, review, tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de beneficiamento do minério	5
Figura 2 - Exemplos de Barragens convencionais de terra.	6
Figura 3 - Exemplos de Barragens convencionais de concreto.	7
Figura 4 – Componentes de uma Barragem	8
Figura 5 – Alçamento método a Jusante	9
Figura 6 - Alçamento método a Montante	10
Figura 7 –Projeto de Barragem de mineradora de Minas Gerais	11
Figura 8 - Alçamento método linha de Centro	11
Figura 9 – Tipos de pilhas o (a) Aterro em vale; (b) Aterro transversal a um vale; (c) Aterro de encosta; (d)Aterro de crista; e (e) Pilha	13
Figura 10 - Método ascendente de construção de pilha	15
Figura 11 – Método descendente de construção de pilha	15
Figura 12 – Ruptura por erosão interna e galgamento	17
Figura 13 - Nível freático e poropressões quando há fluxo d'água	25
Figura 14 – Medir de Nível d'água	26
Figura 15 – Piezômetro De Tubo Aberto	27
Figura 16 – Piezômetro Pneumático	30
Figura 17 – Esquema do piezômetro hidráulico de tubo duplo instalado no aterro	31
Figura 18 – Piezômetro de resistência da Kyowa	33
Figura 19 – Piezômetro de Corda Vibrante	33
Figura 20 – Sequência de instalação de piezômetro de corda vibrante	34
Figura 21 – Instalação de estação topográfica de referência em rocha	36
Figura 22 – Prismas de referência	37
Figura 23 – Inclinômetro, a seção	37
Figura 24 – Extensômetro montado horizontalmente	40
Figura 25 – Extensômetro horizontal instalado na barragem de Oroville	40
Figura 26 – Fluxograma das etapas do estudo	42
Figura 27 – Layout de instrumentação em barragem	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Causas de comportamento e monitoramentos	20
Tabela 2 – Causas e medidas corretivas dos tipos de erros	23
Tabela 3 –Relação de instrumentos por problemas	43
Tabela 4 –Resumo de instrumentos e características.....	45
Tabela 5 –Resumo dos tipos de piezômetros e características	46
Tabela 6 –Resumo dos instrumentos e características.....	47
Tabela 7 –Resumo dos instrumentos de deslocamento e características.....	48

SUMÁRIO

1.	Introdução	1
2.	Objetivo	4
2.1.	Objetivo Específico	4
3.	Revisão Bibliográfica	5
3.2.	Minério	5
3.3.	Barragens	6
3.3.1.	Barragens de rejeito	8
3.3.2.	Métodos Construtivos	9
3.4.	Pilhas	12
3.4.1.	Métodos construtivos	14
3.5.	Segurança das Estruturas	16
3.6.	Monitoramento	19
3.7.	Instrumentos	21
3.7.1.	Piezometria	24
3.7.2.	Medidor de Nível de água	26
3.7.3.	Piezômetro De Tubo Aberto Ou “Standpipe” (Casagrande)	27
3.7.4.	Piezômetro Pneumático	30
3.7.5.	Piezômetro hidráulico de tubo duplo ou aberto	31
3.7.6.	Piezômetro Elétrico	32
3.7.7.	Piezômetro De Corda Vibrante	33
3.7.8.	Medidores de Deslocamento	34
3.7.9.	Marcos de recalque superficiais	35
3.7.10.	Inclinômetros	37
3.7.11.	Extensômetros	38

3.7.12. Extensômetros de Hastes	39
3.7.13. Extensômetros de Fios	40
4. Metodologia	42
5. Resultados	43
6. Conclusão	53
Referências	55

1. INTRODUÇÃO

A atividade mineradora está presente na humanidade desde o início dos tempos, estendendo-se tanto em ambientes rurais quanto urbanos e acompanhando diretamente a evolução tecnológica. No contexto brasileiro, mineração desempenha um papel importante na construção da economia do país, por ser dotado de uma abundância de recursos minerais como minério de ferro, bauxita, manganês, ouro, nióbio, dentre outros. Esta vasta riqueza mineral posiciona o país como um dos principais atores globais na produção e exportação de minerais segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2023) .

A crescente necessidade de matérias provenientes da mineração, acarretam um aumento na demanda mundial por bens minerais. Tal fato somado ao desenvolvimento tecnológico proporcionou o aproveitamento de minério de baixo teor e/ou de difícil beneficiamento. Em contrapartida a situação proporciona um aumento na quantidade de rejeitos produzidos nos processos de lavra e beneficiamento (Soares, 2010) .

O crescimento na produção de rejeitos resultou não apenas na expansão de estruturas de armazenamento, mas também na busca por outros métodos. As barragens e pilhas de estéril destacam-se como formas predominantes adotadas pela indústria para atender a essa demanda no Brasil. (Soares, 2010)

O desafio consiste não apenas em gerenciar o volume crescente de rejeitos, mas também em fazê-lo de maneira ambientalmente responsável e economicamente viável, promovendo uma gestão eficaz dos rejeitos gerados pelas atividades mineradoras, desenvolvendo abordagens para lidar com o armazenamento eficiente desses materiais. (Soares, 2010)

Apesar de oferecerem benefícios como fornecimento de água, controle de enchentes e geração de energia, retenção e armazenamento de rejeitos, o colapso destas estruturas podem acarretar impactos significantes. Dentre os possíveis impactos negativos, destaca-se as rupturas das estruturas. Apesar de baixa probabilidade, apresentam um elevado potencial de causar danos a região, levando em consideração o alto volume armazenado de rejeito. Estão registrados em torno de

200 acidentes graves envolvendo barragens no mundo apenas no atual século que acarretaram a morte de mais de 8.000 pessoas e deixaram outros milhares desabrigadas (Balbi, 2008)

Segundo Mota (2017), as causas de rupturas podem estar relacionadas aos fenômenos de erosão interna (*pipping*), o galgamento ou falhas na fundação. A erosão interna, ocorre quando a água causa forças erosivas que carregam as partículas de solo. Já a ruptura por galgamento é definida pela ANA,2012 quando o nível de água é elevado além do nível da crista, e no caso das barragens de terra provoca um arraste de material podendo levar a ruptura quando constante.

No Brasil, dois dos mais significativos desastres ambientais estão relacionados ao rompimento de barragens da atualidade. O rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 2015, no município de Mariana, Minas Gerais, acarretou impactos no âmbito social e ambiental na bacia do Rio Doce, afetando 38 municípios ao longo do seu curso em Minas Gerais e Espírito Santo, de acordo com a ANA. O mais recente ocorreu na cidade de Brumadinho, em Minas Gerais. De acordo com a defesa civil chegou ao total de 223 mortes e 70 desaparecimentos, gerando um impacto ambiental em cerca de 269,84 hectares (IBAMA, 2023) .

Todo esse cenário proporcionou desafios relacionados à estabilidade e segurança de suas estruturas geotécnicas e a necessidade de se monitorar eficazmente levando em consideração a longevidade da estrutura e até a prevenção de desastres. Nesse contexto, a instrumentação geotécnica surge como um elemento para a monitorização e avaliação contínua do comportamento geotécnico dessas obras. Seja em barragens de rejeitos, pilhas de estéril, ou estruturas de suporte.

A instrumentação geotécnica fornece dados que ajudam os engenheiros em todas as etapas de um projeto. Como as investigações do local, verificação de projeto, controle de qualidade. Além disso, são utilizados para segurança por fornecer alertas antecipados de falhas eminentes e monitoram o desempenho de uma estrutura (Durham Geo Slope Indicator, 2004) .

De acordo com Silveira, 2006, nas últimas décadas no Brasil, foi produzido uma variedade de instrumentos voltados para a monitorização de barragens de terra e enrocamento, entre eles novos tipos de medidores de recalque; piezômetros elétricos,

hidráulicos e pneumáticos; células de pressão total; marcos superficiais; alguns acessórios para inclinômetros e medidores de vazão (de Oliveira et al., 2016) .

O processo de aplicação da instrumentação requer planejamento e conhecimentos da engenharia para atingir resultados desejados. Cada etapa é crucial para o sucesso do programa, que tem início com a definição dos objetivos, e termina com a implementação dos dados requerendo a integração das capacidades instrumentais com o conhecimento especializado humano, conforme apontado por Duncliff.

A partir da etapa de definição é necessário o conhecimento prévio das características geológico-geotécnicas como estruturas geológicas, propriedades mecânicas dos materiais, condições de drenagem. Posteriormente, deve se identificar a presença de mecanismos que influenciam o comportamento geotécnico da estrutura, como estabilização de taludes, processos de adensamento e condições de (de Oliveira et al., 2016)

Além dos conhecimentos essenciais citados acima, um monitoramento de qualidade requer uma compreensão aprofundada dos instrumentos responsáveis pela entrega dos resultados desejados. A escolha apropriada dos instrumentos exige um entendimento completo de seu funcionamento e aplicabilidade, assegurando que proporcionem os resultados esperados.

Nesse contexto, foi realizado um estudo entre diferentes abordagens de instrumentação, buscando identificar critérios essenciais para uma interpretação mais precisa dos dados obtidos. Esses critérios, que incluem aspectos como aplicabilidade, precisão, limitações e considerações teóricas, são fundamentais para facilitar a tomada de decisões em obras geotécnicas. Este enfoque visa não apenas a fase inicial de monitoramento, mas também o controle contínuo das estruturas ao longo do tempo, contribuindo para uma gestão eficaz e segura.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura envolvendo os tipos de instrumentos geotécnicos mais utilizados na mineração, a fim de compreender seu comportamento. Levando em consideração e sua funcionalidade, pretende-se apontar suas vantagens com o propósito de auxiliar no momento da escolha da instrumentação.

Desta maneira, a partir de uma revisão bibliográfica reunindo informações acerca das características e aplicações dos instrumentos, são apresentados pontos que identifique os mais pertinentes e oriente a escolha tanto em fase de projeto quanto execução. Facilitando a seleção e implementação desses instrumentos.

2.1. Objetivo Específico

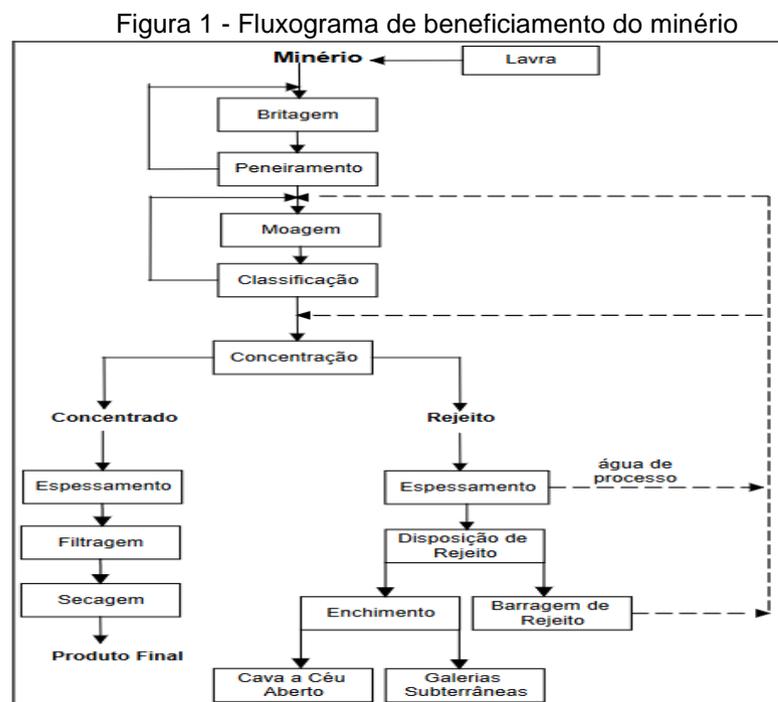
- Reunir informações a respeito dos instrumentos geotécnicos mais utilizados na mineração;
- Compreender o seu funcionamento;
- Compilar informações sobre características e aplicações dos instrumentos em diferentes contextos;
- Relacionar o monitoramento geotécnico com as possíveis causas de colapso da estrutura;
- Apresentar pontos que auxiliam na escolha em um projeto geotécnico de instrumentação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.2. Minério

Mineral, é o termo utilizado para substâncias, corpo inorgânico encontrado na crosta terrestre, que possui composição química e propriedades físicas definidas. Já o minério é a rocha que possui em sua constituição um mineral ou agregado de minério com aplicações econômicas. Os minerais valiosos recebem o nome de minerais-minérios, já os que não possuem aproveitamento é denominado canga. (Luzet al., 2010)

O processo de tratamento ou beneficiamento de minérios envolve operações aplicadas aos recursos minerais, visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem alterar a identidade química ou física dos minerais. A Figura 1 ilustra um exemplo concreto de beneficiamento por meio de um fluxograma da usina de minério de ferro de Carajás, pertencente à Vale. (Luzet al., 2010)

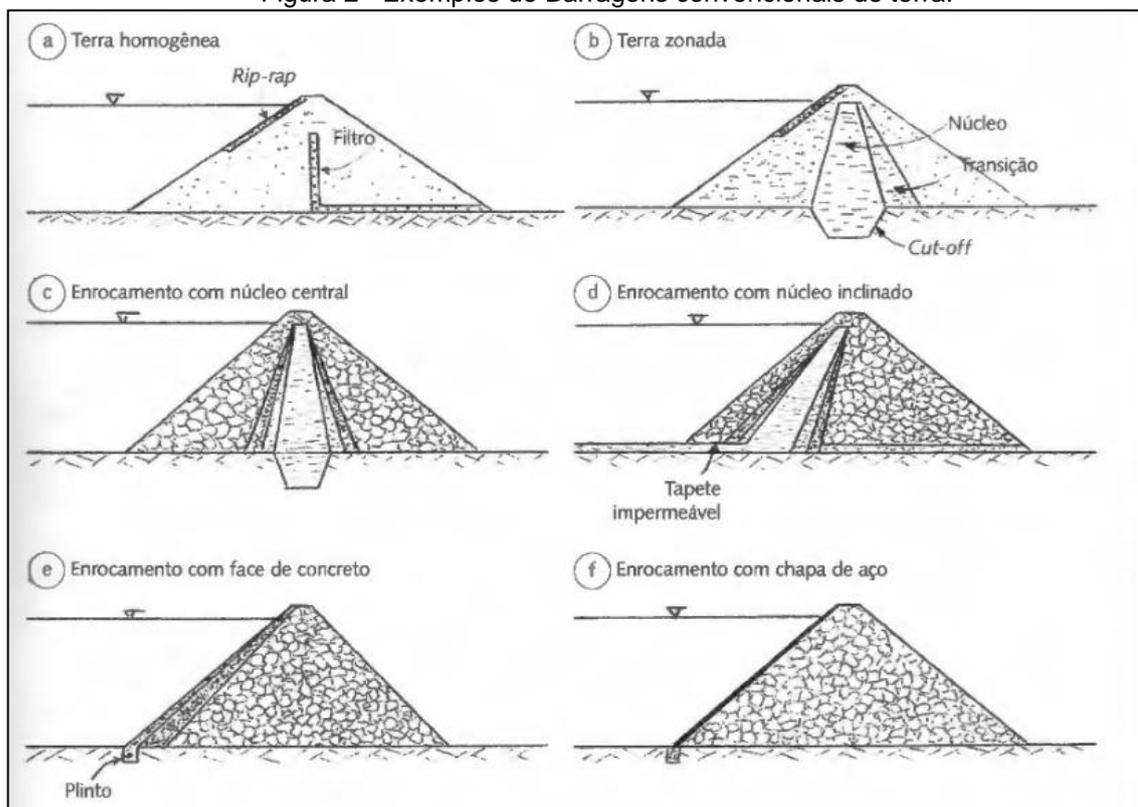


Fonte: Luzet al. (2010)

3.3. Barragens

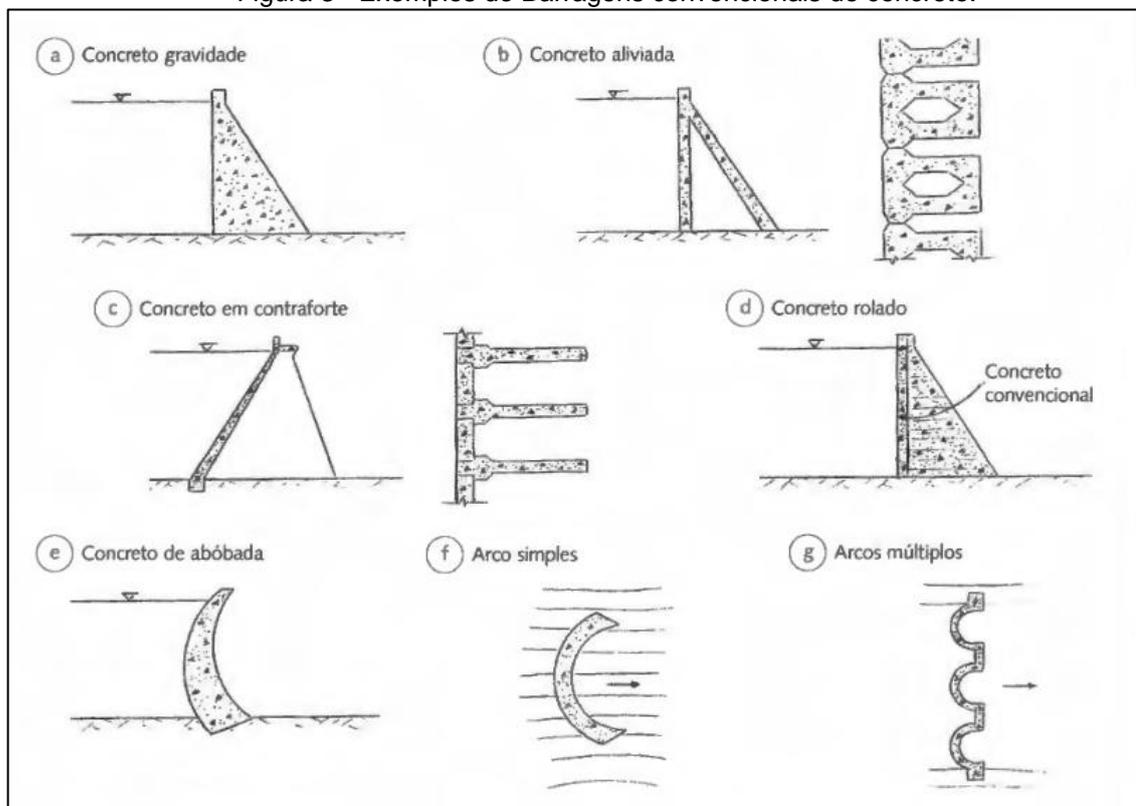
São vários os tipos de barragens existentes e podem se dividir entre dois grupos, as convencionais e não convencionais. Sendo classificadas como convencionais as mais utilizadas e de 1 utilizando madeiras por exemplo. Dentre os tipos temos: Barragens de terra (homogêneas e zonadas), de enrocamento (com núcleo impermeável e face impermeável) e Barragens de concreto (Gravidade, concreto compactado a rolo e abóboda). A Figura 2 exibe um desenho esquemático da construção dos tipos de barragens convencionais de terra, enrocamento e concreto existentes seguida pela Figura 3 exemplificando as de concreto (Costa, 2012) .

Figura 2 - Exemplos de Barragens convencionais de terra.



Fonte: Costa (2012)

Figura 3 - Exemplos de Barragens convencionais de concreto.

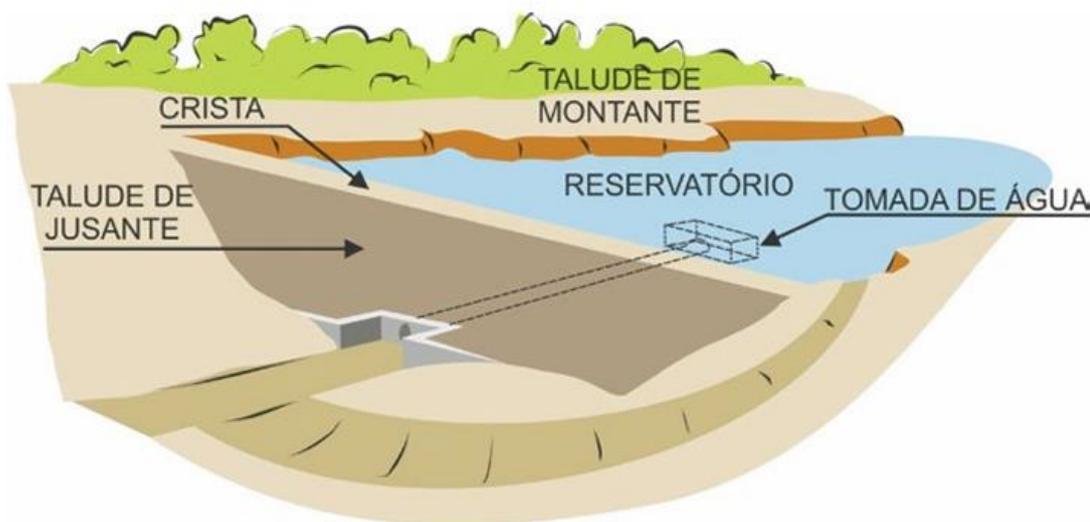


Fonte: Costa (2012)

A mais utilizada em nosso país para deposição de rejeito é a Barragem de Terra, seu projeto leva dois pontos como princípio, segurança e economia considerando os custos de manutenção da obra durante a sua vida útil. Já para segurança deve ser garantido quanto transbordamento, ao *piping* e ao fenômeno de areia movediça, a ruptura dos taludes, a ação dos ventos podendo provocar sulcos de erosão e ao efeito erosivo das águas das chuvas. (Massad, 2010)

Os componentes constituintes de uma barragem estão exemplificados pela Figura 4, e são eles: a crista situada no topo da estrutura, o talude de montante situado em contato com o reservatório, talude de jusante sendo o talude posterior ao reservatório, além disso também fazem parte as ombreiras esquerda e direita.

Figura 4 – Componentes de uma Barragem



Fonte: Agência Nacional do Águas (2016)

3.3.1. Barragens de rejeito

Barragens de rejeito são obras de terra, que se utilizam de solo e material não aproveitável proveniente da mineração (estéril) para sua construção. Seu propósito é armazenar os rejeitos gerados no processo de beneficiamento de minérios. A diversidade dessas barragens abrange diferentes métodos construtivos, tipos de rejeitos armazenados e características, além da gestão (Roca, 2019).

Já O manual de segurança e inspeção de barragens (BRASIL, 2015) caracteriza barragem de rejeitos como uma estrutura construída com a finalidade de reter rejeitos ou materiais estéreis provenientes de atividades de mineração e especialização única no âmbito das barragens convencionais.

A principal diferença está nas tecnologias empregadas: enquanto as barragens de terra convencionais utilizam materiais controlados e bem caracterizados, as barragens de rejeitos lidam com materiais que frequentemente contêm uma porcentagem mais elevada de água. Isso torna essas barragens mais suscetíveis à liquefação, com consequências potencialmente mais graves. Essa distinção ressalta a importância de práticas construtivas adaptadas e seguras para projetos de barragens de contenção de rejeitos. (BRASIL, 2015)

Os procedimentos de construção de Barragens de rejeitos envolvem a implementação de elevações sucessivas. O processo tem início com a construção de um dique de partida, que consiste em uma barragem piloto de terra compactada, caracterizada por uma altura inicial relativamente baixa, geralmente em torno de 5 metros. Os aumentos subsequentes são realizados de acordo com o acúmulo de rejeitos no reservatório, possibilitando inclusive a criação de uma margem livre que facilita o armazenamento de água para ser reutilizada no processo de beneficiamento. Adicionalmente, essa abordagem desempenha um papel contribui para minimizar os efeitos de inundações. (Soares, 2010)

3.3.2. Métodos Construtivos

A construção de alteamento de barragem de rejeitos a jusante é um processo progressivo que envolve o aumento da altura da barragem na direção do fluxo do rejeito. Iniciando com uma barragem de partida, elevações adicionais são realizadas a jusante à medida que os rejeitos se acumulam.

As vantagens conforme apontadas por Campos em 1986 estariam no Abatimento da linha freática, uma vez que se impõe um sistema de drenagem, provável superfície de ruptura passando por material resistente e compactado sua, promovendo uma menor probabilidade de ruptura e possuir baixa suscetibilidade de liquefação. Em contrapartida possui um custo mais elevado, tem menor aproveitamento da área disponível e maior volume de material compactado.

A Figura 5 representa o método construtivo a jusante, demarcado em vermelho o dique de partida:



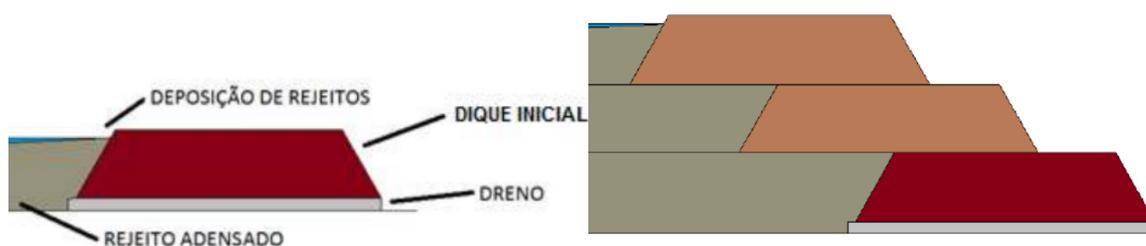
Fonte: Cardozo (2016)

De acordo com informações da Agência Nacional de Mineração (ANM), o método construtivo denominado "a montante" envolve a sustentação dos maciços de elevação pelo próprio material de rejeito ou sedimento anteriormente lançado e depositado, incluindo também os maciços formados sobre os rejeitos de reservatórios já existentes (Figura 6). Importante ressaltar que conforme publicado pela resolução 95, está proibida a construção por este método em território nacional.

Embora o método "a montante" apresente vantagens como baixo custo de construção, maior velocidade de alteamento e volumes menores em comparação com outras abordagens, é importante considerar desvantagens associadas a essa técnica. Entre elas, um menor coeficiente de segurança, geralmente devido à proximidade da linha freática em relação ao talude de jusante. Além disso, a superfície crítica de ruptura pode passar pelos rejeitos sedimentados não compactados. Tendo também como desvantagem o risco de ruptura causado pela liquefação da massa de rejeitos, induzida por sismos naturais, vibrações provenientes de explosões ou movimentação de equipamentos (Soares, 2010). Apesar das desvantagens este método foi muito utilizado pelas mineradoras.

A Figura 6 representa o método construtivo de alteamento a montante, demarcado em vermelho o dique de partida.

Figura 6 - Alteamento método a Montante

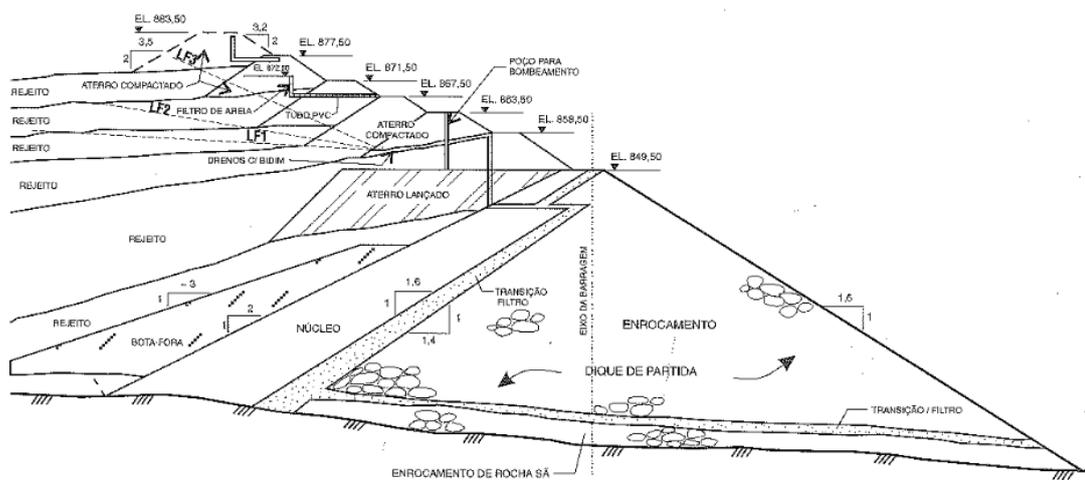


Fonte: Cardozo (2016)

Um exemplo desse método é apresentado pela Figura 7, uma barragem pertencente a uma mineradora instalada no estado de Minas Gerais, e é um típico caso de barragem de rejeito. O projeto do seu dique de partida possui com cerca de 60 m de altura e é alteada de 10 em 10 m em média. Muitas das rupturas que ocorrem

nesse tipo de barragem foram resultado de uma elevação descontrolada do Nível de Água do reservatório (Cruz, 2004) . Este cenário destaca a importância de abordagens preventivas e de instrumentação apropriada para monitorar e mitigar os riscos associados ao comportamento da barragem.

Figura 7 –Projeto de Barragem de mineradora de Minas Gerais

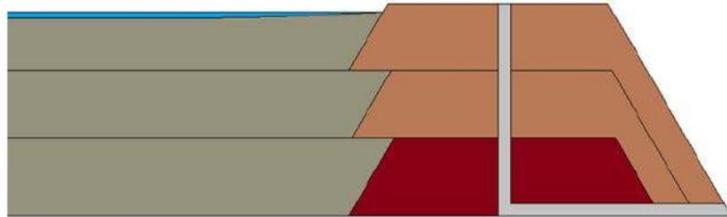


Fonte: Cruz (2004)

O método de construção ou alteamento denominado "linha de centro", é caracterizado pela resolução 95 da ANM, pelo posicionamento estratégico dos alteamentos, assegurando a manutenção do alinhamento entre o eixo da barragem e o eixo do dique inicial. Essa configuração é obtida devido à disposição do material construtivo, distribuído parcialmente a jusante e parcialmente a montante, em relação à crista da fase anterior.

A Figura 8 representa o método construtivo de alteamento por linha de centro, demarcado em vermelho o dique de partida.

Figura 8 - Alteamento método linha de Centro



Fonte: Cardozo (2016)

Sendo um caso particular do método de jusante, tem como vantagem a economia de espaço e uma drenagem interna, em comparação ao método de jusante, possui menor volume de material compactado. (Cardozo, 2016)

3.4. Pilhas

A disposição por pilhas busca otimizar a utilização do espaço disponível, minimizar impactos ambientais e facilitar futuras práticas de recuperação ambiental. Durante o procedimento, os rejeitos são empilhados de maneira ordenada e controlada, visando a estabilidade estrutural da pilha, podendo ser executadas de acordo com os tipos exemplificados pela Figura 9. Práticas de compactação e revestimento adequado podem ser aplicadas para reduzir a permeabilidade e prevenir possíveis impactos ambientais. (Central Water Commission, Ministry of Water Resources, 2017)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira (NBR) 13029:2017 estabelece diretrizes mínimas para a formulação e exposição de projetos de pilhas destinadas à disposição de resíduos estéreis, garantindo conformidade com requisitos de segurança, operacionalidade, eficiência econômica e desativação. Além disso, a construção dessas pilhas deve observar as normas ambientais e obedecer aos critérios relacionados a aspectos econômicos, estruturais, sociais, de segurança e risco.

Levando em conta a necessidade de atualizar a legislação e os procedimentos técnicos na mineração devido às novas tecnologias e tendências globais e o uso de rejeitos e estéreis na mineração, a prática de pilhas foi oficialmente reconhecida como parte integrante da atividade mineradora pelo art. 5º do Decreto nº 9.406, de 12 de

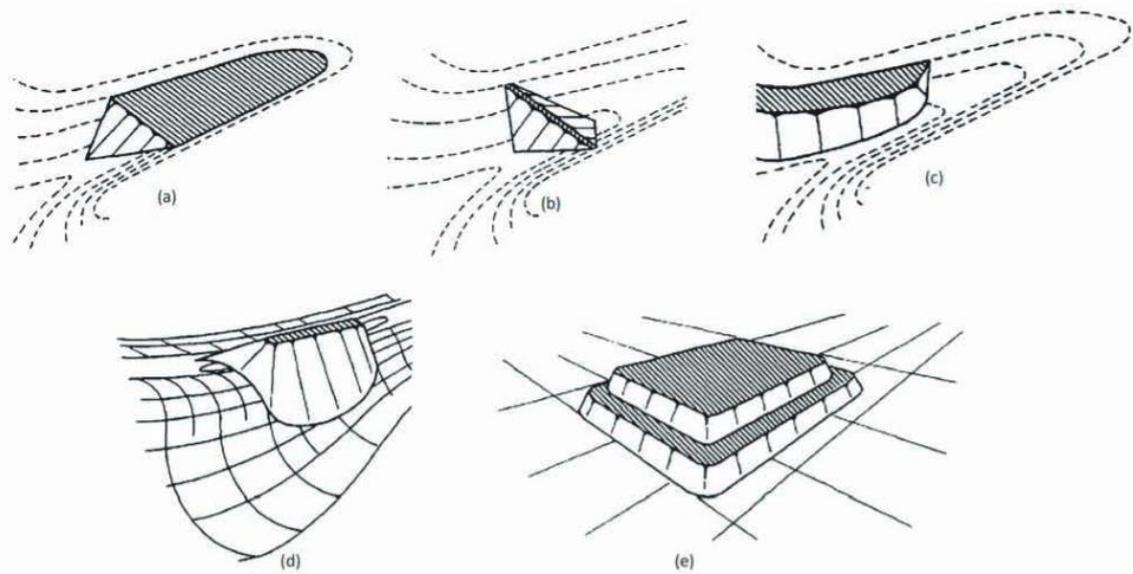
junho de 2018. De acordo com a Resolução da Agência Nacional de Água (ANM) nº 85, de 2 de dezembro de 2021, é definido que o estéril é o material descartado na operação de lavra antes do beneficiamento, e rejeito é o material descartado durante e/ou após o processo de beneficiamento.

As pilhas são categorizadas em Pilhas de Estéril (PDE), Pilhas de Rejeito (PDR) e Pilhas de Disposição de Estéril e Rejeito (PDER). Além disso, podem ser temporárias e definitivas.

Segundo Oliveira-Filho & Abrão, 2015, este método de armazenar o rejeito é adequado apenas para resíduos que demonstrem um coeficiente de permeabilidade que viabilize um fluxo de drenagem gravitacional, não sendo adequado para rejeitos muito finos. Os rejeitos arenosos são depositados sob a forma de pilha em locais de meia encosta ou em vales dotando de um sistema de drenagem interna.

A disposição do estéril geralmente envolve a execução de camadas espessas, configurando uma série de plataformas de lançamento distribuídas a intervalos de 10 metros ou mais. Conforme sua configuração como largura, comprimento das plataformas e seu espaçamento vertical são controladas, melhor sua estabilidade. Posicionada entre as plataformas estão as bermas que possibilitam o acesso, a drenagem superficial, controle de erosão, além de suavizar o talude geral da pilha. (Eatonet al., 2005)

Figura 9 – Tipos de pilhas o (a) Aterro em vale; (b) Aterro transversal a um vale; (c) Aterro de encosta; (d)Aterro de crista; e (e) Pilha



Fonte: Central Water Commission, Ministry of Water Resources (2017)

A construção da pilha pode se dar da forma descendente (Figura 10) ou ascendente (Figura 11). O segundo métodos sendo o preferível por cada elevação posterior ser sustentada pela anterior, cujo desempenho pode ser registrado e compreendido.

3.4.1. Métodos construtivos

A implementação do método ascendente na disposição de estéril revela-se uma estratégia altamente eficiente em termos de otimização do espaço disponível. Essa abordagem considera que cada nova elevação da pilha é sustentada pela anterior. Em locais onde a disponibilidade de espaço é um bom recurso, permitindo uma maximização notável da utilização do terreno disponível.

A Figura 10 apresenta um exemplo de método ascendente de construção de pilha em que é executado por meio de taludes.

Este método em comparação com o outro contribui mais com a segurança, levando em consideração que para ocorrência de uma ruptura é necessário passar o banco anterior, que desempenha também o papel de apoio para o pé do talude do banco, proporcionando um confinamento adicional para os solos de fundação. Uma outra vantagem é que o pé de cada banco encontra suporte em uma superfície plana, especificamente na berma superior, conforme destacado por Eaton et al. (2005).

Figura 10 - Método ascendente de construção de pilha



Fonte: Freitas (2004)

A construção da pilha ocorre exclusivamente por meio do basculamento do material por caminhão e da dispersão por trator de esteira no ponto mais elevado da estrutura (Figura 11). Não são implementados procedimentos de controle geotécnico, compactação do aterro ou preparação da base para a disposição do material, conforme indicado por (Costa, 2017)

A construção da pilha por este método não compreende um sistema de drenagem apropriado e não possui proteção superficial dos taludes contra a erosão, o que o torna altamente susceptível a rupturas (Costa, 2017)

Figura 11 – Método descendente de construção de pilha



Fonte: Freitas (2004)

A Norma Reguladora de Mineração do Departamento Nacional de Produção Mineral/ Ministério de Minas e Energia (DNPM/MME) 19/2001 estabelece diretrizes para a disposição de estéril, rejeitos e produtos na atividade mineradora. Dentre os critérios destacados, inclui-se a necessidade de adotar medidas para evitar o arraste de sólidos para cursos de água, a conformidade com legislação vigente na construção de depósitos próximos a áreas urbanas visando mitigar impactos ambientais, restrições à construção em limites de segurança das pilhas, especialmente em áreas não recuperadas, e proibição de edificações em locais de deposição de rejeitos tóxicos ou perigosos sem autorização prévia.

A norma também destaca a obrigatoriedade de estudos técnicos para avaliar o impacto sobre recursos hídricos em caso de disposição sobre drenagens, cursos d'água e nascentes, a preservação de captações de água a montante e a importância de adotar medidas de segurança para prevenir situações de risco, além de respeitar os limites autorizados do empreendimento.

3.5. Segurança das Estruturas

A Lei nº 12334, criada no Brasil em 2021, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) com o objetivo de disponibilizar informações a respeito da segurança de barragens no país fornecendo diretrizes, normas e critérios para gestão e fiscalização. É aplicável a barragens destinadas, seja para geração de energia, controle de enchentes ou atividades de mineração.

A partir disso ficou instituído como órgão fiscalizadores como a Agência Nacional de Águas (ANA), responsáveis por implementar Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e por fornece diretrizes técnicas para o monitoramento e a segurança das barragens em nível nacional. Já os Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) desempenham papéis na fiscalização e no licenciamento de barragens, realizando inspeções regulares, monitoramento dos relatórios de segurança e aplicação de medidas corretivas quando necessário.

Para que se enquadre na lei a barragem deve obedecer um dos critérios fornecidos, sendo a altura do maciço da barragem, medida da cota de coroamento até sua fundação, deve ser igual ou superior a 15 metros; a capacidade do reservatório deve ser igual ou superior a 3 milhões de metros cúbicos; o reservatório contenha resíduos perigosos, independentemente de sua capacidade; ou a barragem seja classificada como tendo um Dano Potencial Associado (DPA) "Médio" ou "Alto".

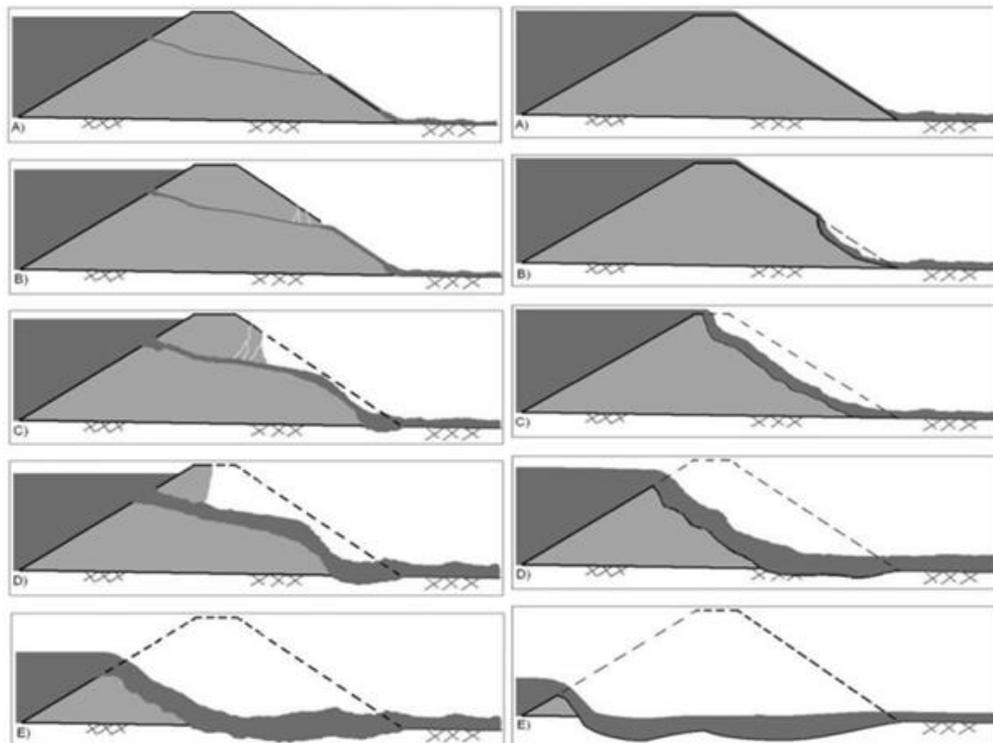
De acordo com a PNSB, são estabelecidos diretrizes para regularização das estruturas. São fornecidos quadros classificatórios que definem a categoria de cada estrutura, como a classificação da Categoria por Risco (CRI) e do Dano Potencial Associado (DPA), a elaboração do Plano de Segurança de Barragem (PSB), a integração com o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima). (Agencia Nacional de Águas, 2016)

O gerenciamento de riscos é baseado na adoção do plano de segurança que define situações que ameacem a segurança da estrutura e caso necessário descrever a adoção de medidas estruturais para a reabilitação. Somado a isso, o plano define áreas de salvamento, zonas de risco para ocupação, sistemas de alerta e treinamentos. (Balbi, 2008)

Como recomendação de análise de ruptura, o Comitê Internacional de Grandes Barragens define a elaboração de hidrograma de ruptura, propagação da onda de cheia, geração dos mapas de inundação e elaboração de Planos de Contingências como etapas de estudo. (ICOLD, 1998)

Dentre as causas de rupturas descritas por Mota em 2017, temos a erosão interna relacionada a infiltração de água pelo solo compactado ou fundação e formam um canal no interior da barragem, já as rupturas por galgamento a associação de todas as vazões geradas na estrutura concorre para elevar o nível acima da crista da barragem. As figuras a seguir exemplificam a ruptura por *piping* e galgamento respectivamente. (Mota,2017)

Figura 12 – Ruptura por erosão interna e galgamento



Fonte: USAC-U.S (1995)

No estado de Minas Gerais, em 2015, ocorreu um dos maiores desastres ambientais no Brasil, o rompimento da barragem de rejeito de mineração de Fundão no município de Mariana (MG) e de parte da barragem de Santarém. As estruturas pertenciam as empresas BHP Billiton Brasil Ltda e pela Vale S.A. (SAMARCO, 2016). O rompimento gerou o escoamento de cerca de mais de 55 milhões de metros cúbicos de rejeito do processo de beneficiamento do minério de ferro. Além da destruição de um distrito, ribeirões e rios sofreram impactos, índios da tribo krenak que viviam sobre a margem do rio doce ficaram sem água para consumo e sem alimento. (Carneiro, 2018)

A investigação dos especialistas identificou três causas principais que desencadearam a tragédia na ombreira esquerda da barragem. Primeiro, um defeito no sistema de drenagem permitiu a entrada de lama nas galerias, causando liquefação do material da barragem. Em segundo lugar, durante o processo de alteamento, o recuo na ombreira esquerda ocorreu sobre uma base instável de areia e lama. Por fim, três abalos sísmicos na região aceleraram o processo de erosão, atuando como o gatilho para o colapso. (Carneiro, 2018)

Em 2007, na South Field Lignite Mine, localizada na Grécia, ocorreu um desastre relacionado à pilha de rejeitos de carvão. A estrutura possuía 3 níveis com inclinação de 10%. O colapso aconteceu na terceira fase de depósito, que foi desencadeado por um alto teor de umidade dos resíduos que foram depositados em uma nascente, tampando seu fluxo. Isso ocasionou um aumento na poropressão ocasionando o deslizamento que movimentou 2,5 milhões de metros cúbicos de material. (SAF Engenharia, 2024)

Em um cenário de prevenção de desastres provenientes de estruturas de mineração destacam a importância da gestão de riscos. Os órgãos fiscalizadores estabelecem diretrizes para um acompanhamento da estrutura visando evitar rompimentos, bem como evitar maiores danos caso venha acontecer um desastre. Ao adotar a análise de dados fornecidos pela instrumentação no monitoramento, é possível identificar precocemente sinais de instabilidade e implementar medidas corretivas, contribuindo assim para a segurança.

3.6. Monitoramento

O monitoramento de uma obra representa o conjunto de atividades destinadas a supervisionar a segurança e eficácia de sua construção. No contexto de uma obra geotécnica de barragem, é essencial realizar esse monitoramento tanto durante a fase de construção quanto durante a operação da obra, abrangendo tanto suas fundações, bem como as estruturas complementares acima e abaixo da superfície. Essa supervisão tem como objetivo assegurar a segurança ao longo de toda a vida útil da estrutura e pode ser executada por meio dos procedimentos como inspeção visual, topografia e instrumentação (Costa, 2012)

A supervisão de pilhas e barragens é realizada por meio de uma variedade de métodos e instrumentos especializados. inspeções visuais regulares são realizadas para avaliar a integridade estrutural e identificar potenciais anomalias. Levantamentos topográficos fornecem informações precisas sobre a geometria e elevação das estruturas. Além disso, a instrumentação geotécnica, como piezômetros para

monitoramento de pressão da água e inclinômetros para avaliar movimentos de terra, desempenha um papel na detecção precoce de mudanças nas condições. Sensores de monitoramento sísmico e análises geofísicas também podem ser empregados para avaliar a estabilidade do solo.

A combinação dessas abordagens oferece uma compreensão abrangente das condições das pilhas e barragens, possibilitando ações corretivas oportunas para garantir a segurança e sustentabilidade das operações mineradoras. A tabela a seguir formulada por Cruz, 2004 apresenta os principais comportamentos e sistema de monitoramento capaz de detectar.

Tabela 1 –Causas de comportamento e monitoramentos

Comportamento	Causa	Sistema de Observação	
Erosão Interna	Talude e área de jusante	Chuva intensa	Inspeção visual
		Galgamento de ondas de montante	Inspeção visual / Batimetria
	Transbordamento		
	Batimento de ondas de jusante		
	Velocidade tangencial de água de jusante		
Talude de montante	Batimento de ondas		
Erosão Interna	Trincas/canalículos	Deficiência de compactação/interfaces	Inspeção visual / Instrumentação
		Deterioração da fundação ou do maciço	Instrumentação / Topografia / Inspeção visual
Cisalhamento	Sismos		
	Pressão neutra		
	Recalques diferenciais		
Trincas	Ressecamento	Inspeção visual	
	Ruptura hidráulica	Inspeção visual / Instrumentação	

Fonte: Adaptado de Cruz (2004)

A inspeção visual tem como objetivo avaliar as condições físicas das partes integrantes da estrutura com o objetivo de identificar e monitorar possíveis anomalias que possam representar riscos para sua integridade. Essas avaliações fornecem a capacidade de antecipar ou identificar a necessidade de reabilitar barragens em

situação de perigo ou risco de rompimento. Isso, por sua vez, permite a implementação atempada de medidas de mitigação, contribuindo para a redução significativa de danos. (Agencia Nacional de Águas, 2016)

As inspeções de segurança de barragens são normatizadas pelo art. 9º da Lei nº 12.334/2010, o qual define as condições para a realização de inspeções regulares e especiais. Além disso, em âmbito federal, a Resolução da Agência Nacional de águas (ANA) nº 742, datada de 17 de outubro de 2011, fornece diretrizes para conduzir essas inspeções.

Durante as inspeções podem ser detectadas as anomalias como trincas ocorridas em paramentos ou cristas, onde deve-se observar a direção, extensão e abertura e devem ser acompanhadas. A interpretação desse monitoramento permitirá ao caracterizar as causas, bem como medidas a serem tomadas. Os abatimentos também podem ser observados e devem ser monitorados, assim como as surgências.

Os depósitos de estéril, rejeitos ou produtos e as barragens devem ser mantidos sob supervisão de profissional habilitado e dispor de monitoramento da percolação de água, da movimentação, da estabilidade e do comprometimento do lençol freático de acordo com a Normas Reguladoras de Mineração – NRM - Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos.

As necessidades de monitoramento variam ao longo das distintas fases que ocorrem durante a vida de uma barragem. Essas fases normalmente incluem projeto, construção, primeiro enchimento do reservatório, longo prazo (operações normais) e tratamento de desempenho inesperado. A monitorização instrumentada pode ser uma ferramenta eficaz para obter as informações necessárias durante estas fases separadas. Além de monitorar o desempenho da barragem, os dados de instrumentação também podem ser valiosos para fins de estudos e pesquisa. (Central Water Commission, Ministry of Water Resources, 2017)

3.7. Instrumentos

O propósito da instrumentação é proporcionar informações essenciais para a avaliação da segurança de uma estrutura. Esses dados coletados fornecem não apenas sobre o desempenho da estrutura, mas também identifica precocemente potenciais problemas, evitando falhas, como em barragens. Além de garantir a segurança, a instrumentação também tem como objetivo validar o comportamento real da estrutura em relação às previsões do projeto. Esse processo não só confirma a eficácia do design inicial, mas também gera informações para aprimorar futuros projetos de estruturas similares, contribuindo para o avanço contínuo das práticas de engenharia geotécnica. (Central Water Commission, Ministry of Water Resources, 2017)

A auscultação deve ser planejada como uma ferramenta valiosa na avaliação da segurança e na verificação das premissas de projetos. Para cada instrumento instalado, é necessário estudar e estabelecer os níveis limites, sendo crucial explicitar os critérios de cálculo utilizados. (Cruz, 2004) Além de registrar eventos passados, a implementação de instrumentação nas Pilhas possibilita o monitoramento contínuo das condições internas. A instrumentação não apenas fornece dados para serem incorporados em modelos de previsão para futuros desenvolvimentos, mas também oferece informações em tempo real que facilitam a análise de eventos relevantes à medida que ocorrem, como incidentes inesperados de infiltração. (Pearceret al., 2017)

Conforme descrito por Dunnycliff em 1988, o planejamento de um programa de monitoramento através de instrumentação geotécnica inicia-se com a definição clara de objetivos e seguir por etapas lógicas, resultando na elaboração de planos e especificações. Não é recomendado seguir por selecionar instrumentos, realizar medições e, posteriormente, questionar como utilizar os dados obtidos.

O ciclo de vida de barragens envolve diferentes fases, cada uma demandando uma abordagem específica de monitoramento. Durante a implantação, o foco está na detecção de eventos anômalos ou situações que possam divergir do esperado no projeto, permitindo sugestões para revisões que adequem as soluções de forma mais precisa. Na fase operacional, a atenção está na identificação de anomalias que possam comprometer a estabilidade, avaliação de desempenho comparativa com

modelos teóricos, auditoria de critérios do projeto e a caracterização do comportamento dos materiais estruturais ao longo do tempo.

Por fim, na fase de desativação, a avaliação da estabilidade estrutural pós-lançamento de rejeitos e a análise do desempenho estrutural, por meio de medições como tensão interna e variações de vazão, encerram o ciclo de monitoramento, garantindo uma gestão integral e segura dessas infraestruturas. (Soares, 2010)

O uso de instrumentação geotécnica para monitoramento em projetos de engenharia implica a consideração de diversos parâmetros essenciais. A conformidade de um instrumento refere-se à sua capacidade de não alterar o valor do parâmetro medido, sendo fundamental para garantir alta acurácia. A acurácia, por sua vez, representa o grau de aproximação da medida ao valor real da grandeza, sendo avaliada durante a calibração do instrumento. (Cruz, 2004)

Além disso, a precisão, que representa a reprodutibilidade das medições, a resolução, que define a menor variação detectável, e o campo de leitura, que delimita os valores máximo e mínimo que o instrumento pode registrar, são critérios cruciais. Outros parâmetros, como repetibilidade, linearidade, histerese, sinal de saída, constante de tempo, bias, curva de calibração, fator escala, ruído e estabilidade a longo prazo, desempenham papéis essenciais na seleção e no planejamento do uso de instrumentos, visando assegurar dados precisos e evitar danos aos dispositivos.

A avaliação prévia da ordem de grandeza dos valores a serem medidos torna-se, portanto, uma etapa crucial nesse processo, proporcionando a seleção apropriada dos instrumentos e garantindo a confiabilidade das medições ao longo do tempo. (Cruz, 2004) O erro é a diferença entre o valor medido e o valor real de uma grandeza. Matematicamente, equivale à precisão do instrumento. Possuem formas destinadas de ocorrências, Dunnicliff em 1993, compilou em seu livro as causas e medidas para correção dos tipos de erros existentes e está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Causas e medidas corretivas dos tipos de erros

Tipo de erro	Causas	Medias corretivas dos instrumentos
Erro grosseiro	Inexperiência Falhas na leitura Falha no registro	Mais atenção e treinamento Leituras duplicadas Dois observadores

Erro sistemático	Erro computacional	Comparação com leituras prévias
	Calibração impropria	Uso de calibração correta e recalibração
	Falta de calibração	Uso de padrões
	Histerese	Uso de procedimentos de leitura consistente
Erro de conformidade	Não linearidade	
	Detalhes de instalação incorretos	Seleção de instrumento apropriado
Erro ambiental	Limitações do instrumento de medição	Aprimoramento do projeto de instrumentação
		Modificação dos instrumentos apropriados de instalação
	Clima	Registrar as variações ambientais
	Temperatura	Introduzir correções
Erro observacional	Vibração	Escolha de materiais dos instrumentos corretos
	Corrosão	
Erro de amostragem	Variação entre observadores	Treinamento
		Uso de automatização
Erro randômico	Variabilidade nos parâmetros	
	Técnicas incorretas de amostragem	
Erro randômico	Ruído	Seleção correta dos instrumentos
	Atrito	Eliminação temporária de ruídos
	Efeitos ambientais	Leituras múltiplas
		Análises estáticas

Fonte: Adaptado de Silveira (2006)

3.7.1. Piezometria

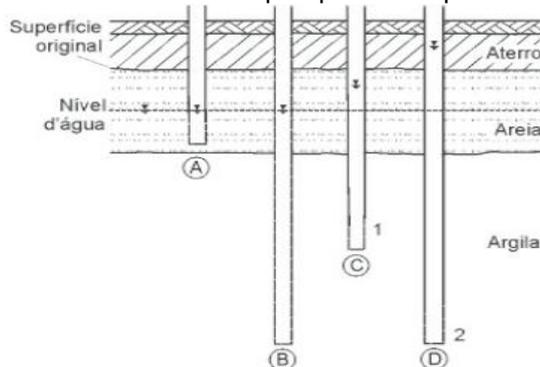
O solo é composto por partículas sólidas com espaços de intervenção, as partículas são referidas como o esqueleto mineral e os espaços como ou espaços de poros. Os espaços porosos são geralmente preenchidos com ar e/ou água. (Dunnicliff, 1988)

O monitoramento das poropressões e pressões de água em maciços rochosos e descontinuidades é conduzido por meio de piezômetros. No contexto da hidrogeologia e engenharia de estruturas geotécnicas temos por definição alguns termos. O "nível da água subterrânea" refere-se à altura em que a água é encontrada abaixo da superfície do solo em um aquífero ou em um maciço rochoso. Já a "pressão da água

nos poros" diz respeito à força exercida pela água contida nos espaços vazios entre partículas do solo, representando uma medida da carga hidráulica. Por fim, a "pressão da água na junta" aborda a pressão associada à água que se infiltra em descontinuidades de um maciço rochoso, como fraturas ou juntas, podendo influenciar a estabilidade geotécnica de uma estrutura. (Dunnicliff, 1988)

Pela Figura 13 é possível analisar o comportamento de quatro tubos instalados em diferentes profundidades. Os tubos A e B, perfurados ao longo de sua extensão, servem como Medidores de Nível, indicando o nível freático. O tubo B, ao ser perfurado ao longo das camadas, cria uma conexão entre elas, permitindo que a poropressão se dissipe na camada permeável de areia, resultando apenas na indicação do nível freático. Por outro lado, os tubos C e D funcionam como Piezômetros, indicando poropressões na camada de argila em profundidades 1 e 2, sendo que o tubo C apresenta uma carga piezométrica menor do que o tubo D devido à sua maior proximidade com a camada de areia, facilitando a dissipação da poropressão. (Silveira, 2006)

Figura 13 - Nível freático e poropressões quando há fluxo d'água



Fonte: Silveira (2006)

As pressões positivas da água nos poros ocorrem quando uma força de compressão é aplicada ao solo, como no caso da construção de aterros rodoviários, aumentando a pressão nos espaços porosos. Isso é evidenciado em situações práticas, como fundações de aterros em terrenos macios, onde as forças de cisalhamento podem resultar em deformações, aumento da pressão da água nos poros e, conseqüentemente, maior risco de falhas. (Cerqueira, 2017)

Por outro lado, pressões negativas da água nos poros podem surgir quando uma força de compressão é removida, como durante escavações em argila, levando a uma diminuição inicial da pressão da água nos poros, que pode se tornar negativa. Essa compreensão das variações na pressão da água nos poros é essencial para avaliar a estabilidade e o comportamento do solo em diferentes contextos geotécnicos. (Dunnicliff, 1988)

estabilidade de uma estrutura é influenciada por uma variedade de parâmetros, incluindo a pressão da água nos poros, a pressão da água na rocha de fundação, as pressões totais, os recalques, os deslocamentos, as cargas e tensões nos elementos estruturais, a temperatura, as vazões de drenagem, entre outros, conforme apontado por Silveira (2006).

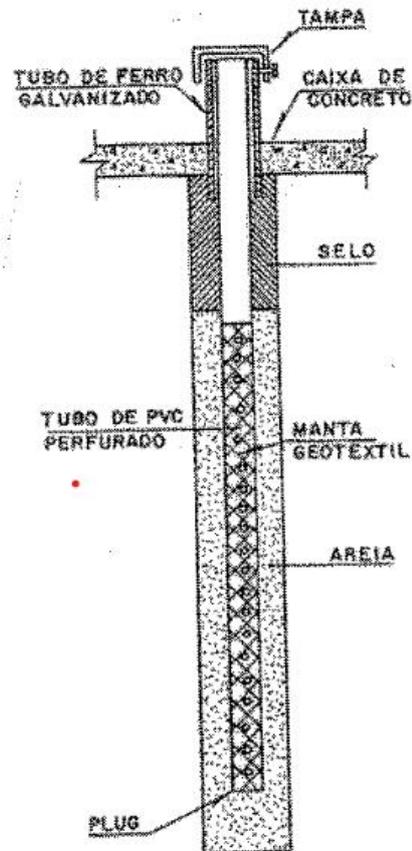
Existem duas categorias de piezômetros, os que possuem um diafragma entre o transdutor e o poro ou água, que são os de corda vibrante, pneumático e os de resistência elétrica. Já os hidráulicos de tubo aberto e de tubo não possuem esta separação. A forma de instalação define se o piezômetro irá medir a poropressão do solo ou a pressão da água em uma junta de maciço rochoso, tendo em vista que eles não se diferem. (Dunnicliff, 1988)

3.7.2. Medidor de Nível de água

É um instrumento empregado para identificar a posição da linha freática em maciços de terra ou rochas. Seu funcionamento requer a perfuração de um furo ou poço, com a subsequente determinação da cota do nível d'água.

Esse dispositivo consiste em um tubo de PVC perfurado, revestido por um material filtrante, como manta geotêxtil, e um material drenante, como areia, que evita o fechamento do furo (Figura 14). Além disso, emprega-se um selo para vedar o espaço entre o tubo e o furo, juntamente com um sistema de proteção contra vandalismo na superfície do terreno. (Cruz, 2004)

Figura 14 – Medir de Nível d'água

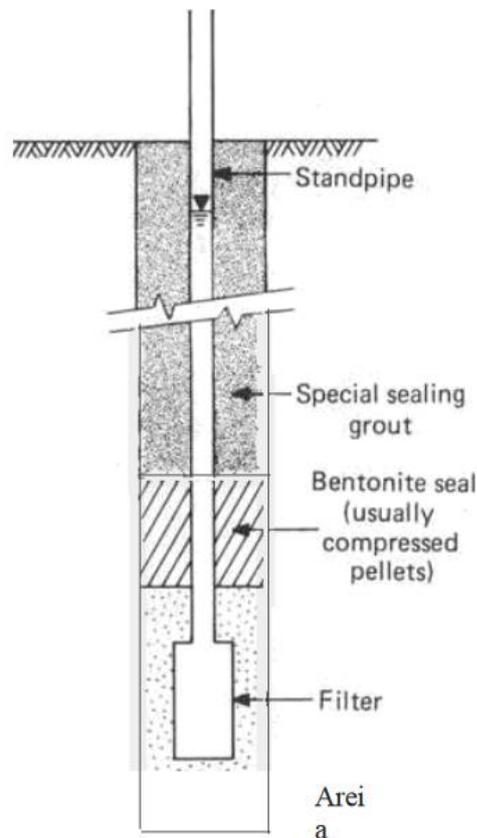


Fonte: Cruz (2004)

3.7.3. Piezômetro De Tubo Aberto Ou “Standpipe” (Casagrande)

Os piezômetros consistem em tubos de PVC, metálicos ou geomecânicos, com ranhuras ou perfurações em alguns trechos, inseridos em furos já executados, como exemplificado pela Figura 15. Eles proporcionam uma medida da carga piezométrica, sujeita a influências barométricas, representando a carga piezométrica atuante em uma área específica. No processo de planejamento, é crucial analisar o material que compõe a área alvo e determinar o tempo de resposta necessário para nivelar as variações sob condições específicas de fluxo, conforme destacado por Cerqueira (2017).

Figura 15 – Piezômetro De Tubo Aberto



Fonte: Dunicliff (1988)

Normalmente, a leitura dos piezômetros do tipo standpipe é feita em relação à cota do ponto médio do bulbo. Os primeiros piezômetros standpipe utilizavam uma vela de filtro como elemento poroso, sendo chamados de piezômetros tipo Casagrande, em homenagem ao seu desenvolvedor, Arthur Casagrande. Posteriormente, uma segunda fase introduziu um sistema mais robusto, composto por duas tubulações e um filtro interno de areia no bulbo do instrumento. (Silveira, 2006)

O processo de entrada de água no tubo de elevação ocorre através do elemento de entrada, geralmente vedado a uma profundidade específica no furo de sondagem. À medida que a pressão da água dos poros varia, o nível da água dentro do tubo vertical sobe ou desce, sendo as leituras obtidas por meio de um indicador de nível de água que mede a profundidade da água. Uma característica fundamental do piezômetro de tubo vertical é o selo de bentonita posicionado acima da zona de

entrada, que impede a entrada de água de outros estratos no tubo vertical. Dessa forma, a água dentro do tubo é controlada pela pressão da água dos poros na zona de entrada. (Durham Geo Slope Indicator, 2004)

Os piezômetros de tubo vertical aberto apresentam desafios relacionados à resposta lenta às variações da carga piezométrica, conhecida como "Hydrodynamic time lag". Essa limitação decorre do volume considerável de água necessário para equilibrar as pressões, sendo influenciada pela permeabilidade do solo e dimensões do piezômetro, conforme destacado por Dunnycliff. Esses instrumentos não são ideais para observações de pressões neutras durante o período construtivo, devido à quantidade significativa de água requerida para sensibilizar o instrumento.

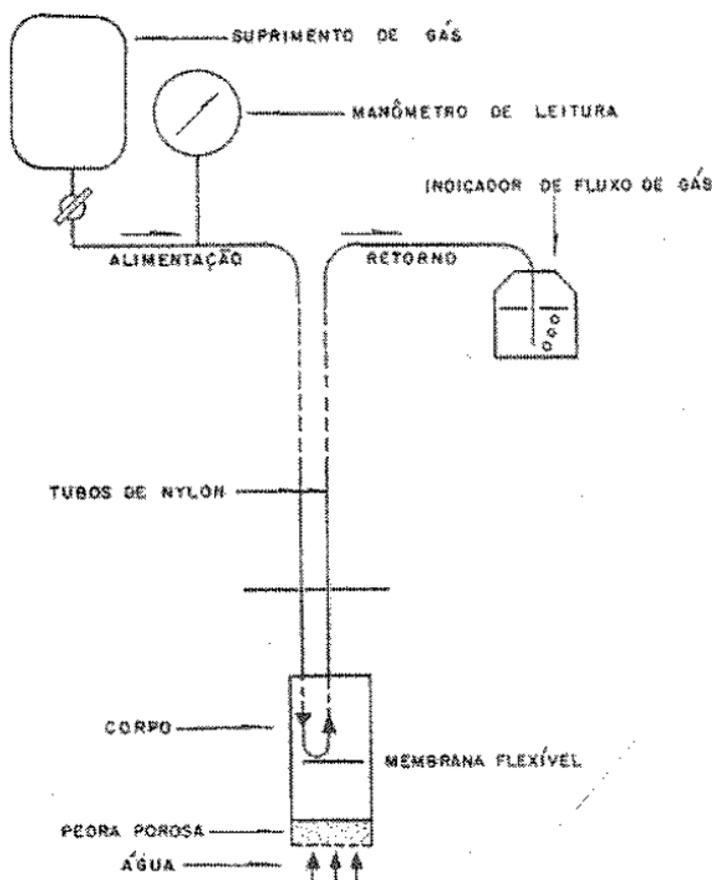
Além disso, em solos não saturados ou gasosos, pode ocorrer a entrada de gás no tubo vertical, gerando leituras falsas se o diâmetro interior for inferior a 8 mm. Em solos consolidados, há o risco de flexão ou cisalhamento do tubo vertical, resultando em vazamentos ou obstruções. Para evitar esses problemas, recomenda-se o uso de tubos com diâmetro superior a 8 mm ou a adoção de alternativas, como tubos telescópicos ou outros tipos de piezômetros, conforme sugerido por Dunnycliff (1988). Em situações que demandam a prevenção de fugas de água entre os tubos, a aplicação de lama no anel entre eles é indicada.

A utilização de piezômetros oferece vantagens notáveis, incluindo confiabilidade, durabilidade, sensibilidade e a capacidade de verificar seu funcionamento por meio de ensaios de recuperação do nível d'água. Além disso, esses instrumentos possibilitam a estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo nas proximidades e são economicamente viáveis. No entanto, algumas limitações devem ser consideradas, como possíveis interferências na área de construção, inadequação para determinar pressões neutras a montante da linha d'água em barragens, maior complexidade em comparação com outros tipos de instrumentos.

3.7.4. Piezômetro Pneumático

O seu funcionamento é baseado no equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível, de um lado atua a água cuja pressão se deseja medir, e do outro atua um gás cuja pressão é variável e conhecida, por meio de um manômetro. A conexão pneumática entre o piezômetro e o painel é feita por meio de dois tubos flexíveis, denominados “alimentação” e “retorno”, que se comunicam com o diafragma por meio de orifícios. Pela Figura 16 pode analisar-se um esquema de piezômetro pneumático. (Cruz, 2004)

Figura 16 – Piezômetro Pneumático



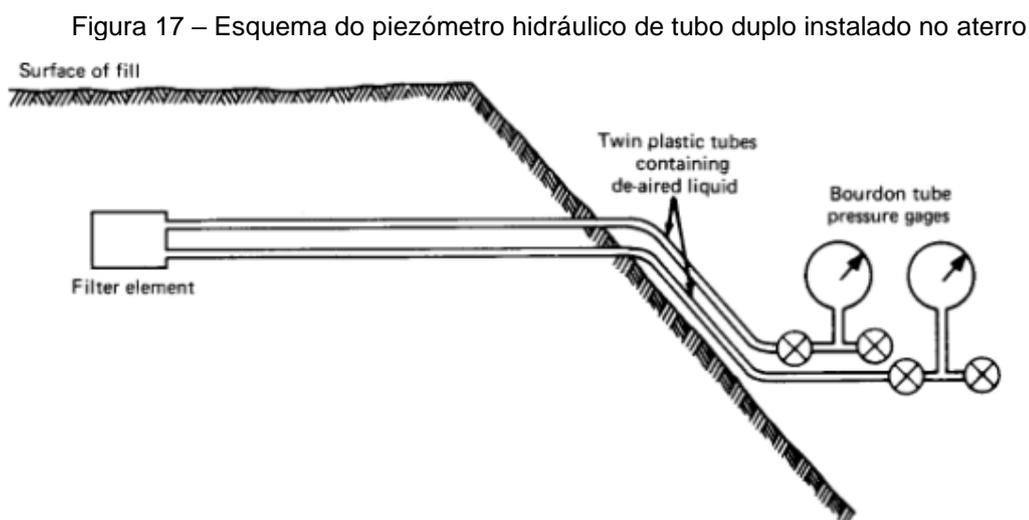
Fonte: Cruz (2004)

Segundo Dunnicliff, 1988 quando transdutores são utilizados para monitorizar a poroprêsões é adicionado um filtro para separar o diafragma flexível do material no qual o piezômetro está instalado. Alguns piezômetros pneumáticos podem ser

utilizados para monitorizar pressões negativas da água dos poros aplicando um vácuo ao tubo de saída.

3.7.5. Piezômetro hidráulico de tubo duplo ou aberto

Os piezômetros de tubo duplo foram concebidos para serem instalados nas fundações e nos aterros de barragens de terra durante o processo construtivo. Esses instrumentos eram compostos por um elemento poroso conectado por meio de duas tubulações de plástico a uma cabine de leitura, onde um manômetro Bourdon era posicionado na extremidade dessas tubulações (Figura 17). A elevação piezométrica era determinada somando-se a pressão média medida em ambas as tubulações à cota de instalação do manômetro, a qual era determinada topograficamente. (Silveira, 2006)



Fonte: Dunicliff (1988)

A aplicação dos piezômetros hidráulicos de tubo duplo limita-se quase exclusivamente à monitorização a longo prazo das poropressões em barragens de aterro, sendo a longevidade uma necessidade fundamental. (Dunicliff, 1988)

Sua instalação com mangueiras dispostas horizontalmente para fora da praça de aterro evita danos causados pela terraplenagem. Além disso, sua acurácia não está sujeita à habilidade do operador, dependendo apenas de um treinamento adequado.

O dispositivo também não corre risco de defeitos decorrentes de descargas atmosféricas ou interferências eletromagnéticas. Destaca-se ainda pelo tempo de resposta mais rápido em comparação com o piezômetro Casagrande, uma vez que não requer o deslocamento da água pelo tubo de PVC. (Cerqueira, 2017)

As desvantagens desse tipo de piezômetro incluem a necessidade de um invólucro terminal para abrigar os equipamentos de leitura e lavagem. Além disso, esse invólucro requer proteção contra o congelamento, seja por meio de aquecimento ou pela construção abaixo da linha de gelo. O encaminhamento da tubulação também deve ser cuidadosamente planejado para evitar elevações significativas acima da tensão piezométrica mínima, pois, caso contrário, o líquido terá que suportar uma pressão subatmosférica, tornando provável a descontinuidade do líquido. (Dunnicliff, 1988)

3.7.6. Piezômetro Elétrico

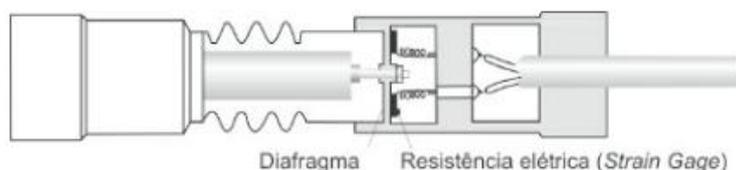
Para esse instrumento, é possível classificar dois tipos de transdutores de resistência elétrica: os de fio, como o tipo Carlson, e os de resistência elétrica colada, conhecidos como strain-gauge. Uma característica essencial desses instrumentos é a capacidade de realizar medições dinâmicas, permitindo o registro contínuo de dados devido ao tempo de resposta praticamente instantâneo em relação à pressão aplicada. (Silveira, 2006)

Possuem desempenho inicial satisfatório; contudo, após alguns anos, enfrentam desafios relacionados à proteção da resistência elétrica contra umidade e a problemas decorrentes da fluência da cola que fixa as resistências elétricas à membrana, resultando em uma vida útil limitada. (Silveira, 2006)

Os piezômetros para extensômetros de resistência elétrica ligados podem ser embalados dentro de caixas de pressão e são usados principalmente para a determinação *in situ* das propriedades do solo, onde a recalibração periódica é possível. Podem, no entanto, ser deixados no local para a monitorização da poropressões, e também podem ser usados como piezômetros de perfilamento para medir em mais pontos. (Dunnicliff, 1988)

A Figura 18 exemplifica o esquema de piezômetro de resistência elétrica de Kyowa, apresentando a resistência e o diafragma.

Figura 18 – Piezômetro de resistência da Kyowa

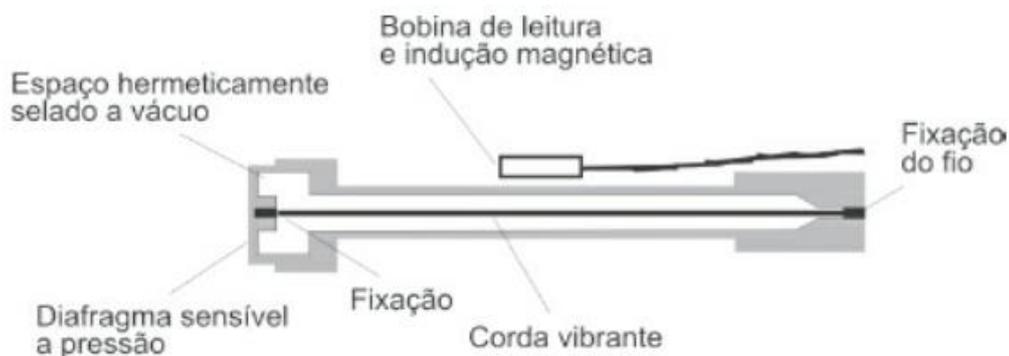


Fonte: Silveira (2006)

3.7.7. Piezômetro De Corda Vibrante

O piezômetro de corda vibrante é equipado com um diafragma metálico que separa a água dos poros do sistema de medição. Um fio tensionado é conectado ao ponto médio do diafragma, dessa forma, a deflexão do diafragma induz alterações na tensão do fio, permitindo a medição das variações na pressão da água dos poros (Figura 19). (Dunnicliff, 1988)

Figura 19 – Piezômetro de Corda Vibrante



Fonte: Silveira (2006)

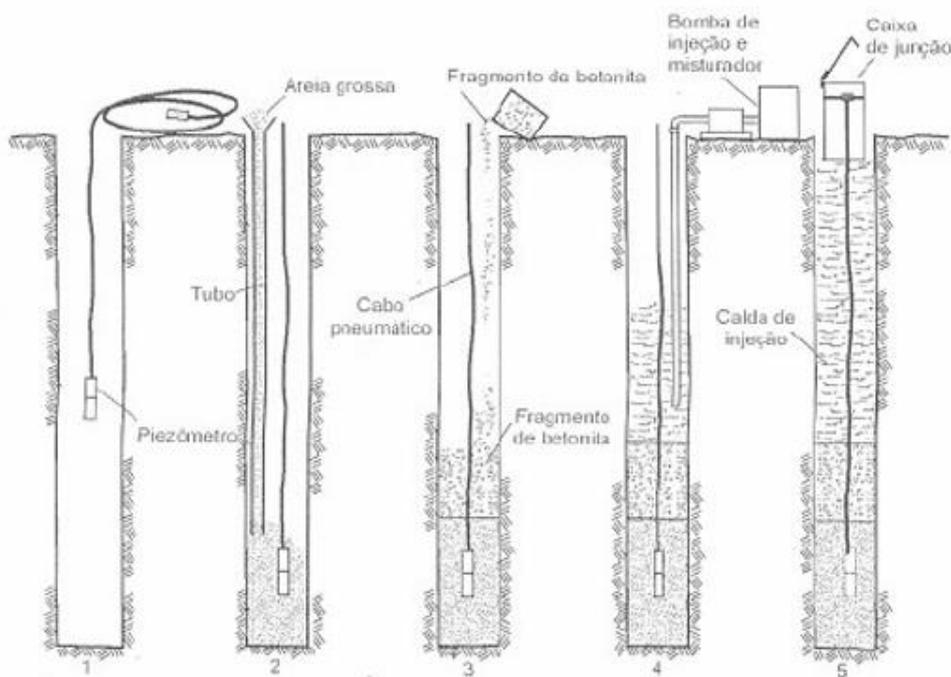
Em relação ao funcionamento, a pressão da água é transmitida por meio de uma pedra porosa, localizada em pontos estratégicos do equipamento, em direção a um diafragma interno. A deflexão resultante desse diafragma é cuidadosamente medida por um transdutor de pressão do tipo corda vibrante, posicionado perpendicularmente

ao plano do diafragma interno. Na Figura 20 é possível analisar o processo de instalação do piezômetro em furo de sondagem. (Silveira, 2006)

Suas principais desvantagens e potenciais erros de medida estão associados ao referencial zero de medida e à possibilidade de corrosão da corda vibrante. No entanto, com o avanço tecnológico e uma compreensão mais aprofundada dos componentes e práticas de instalação, esses piezômetros tornaram-se robustos e confiáveis, com uma durabilidade que pode estender-se por mais de 10 anos, conforme indicado por (Bressani, 2009)

As vantagens desses piezômetros incluem a capacidade de realizar medições dinâmicas com registro contínuo dos dados, pois apresentam um tempo de resposta praticamente instantâneo em relação à pressão aplicada.

Figura 20 – Sequência de instalação de piezômetro de corda vibrante



Fonte: Silveira (2006)

3.7.8. Medidores de Deslocamento

Nesta categoria são considerados os medidores de recalque, inclinômetros e extensômetros de haste e de fios. São instrumentos que indicam deslocamentos absolutos, sendo assim necessário possuir referências fixas em locais que não se deslocam. (Cruz, 2004)

Dunnicliff (1988), classifica os instrumentos de medida em duas categorias dependendo de sua finalidade, sendo instrumentos utilizados para determinar as propriedades de solos e rochas (parâmetros geotécnicos) e instrumentos utilizados para monitoramento de comportamento da obra durante construção e operação.

3.7.9. Marcos de recalque superficiais

Os instrumentos empregados na determinação de deslocamentos horizontais, tanto superficiais quanto subsuperficiais, operam com base em princípios relativamente simples. No entanto, para atender aos elevados padrões de acurácia, precisão e confiabilidade exigidos nas medições de campo atuais, torna-se imperativo o uso de instrumentos cada vez mais sofisticados. Essa evolução tecnológica é essencial para assegurar resultados confiáveis e abrangentes na avaliação da alteração da geometria externa das estruturas. (Machado, 2007)

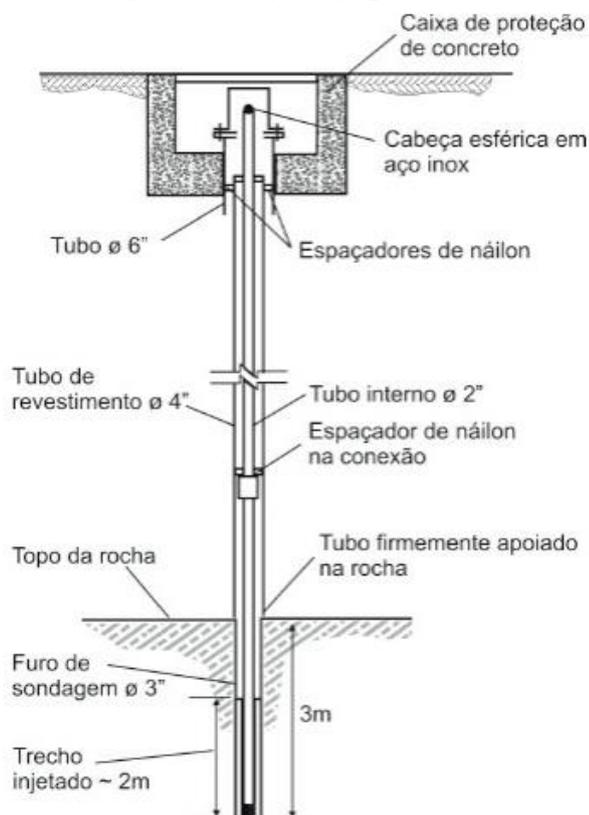
O monitoramento das deformações em solos compressíveis, comumente presentes em barragens, revela que essas alterações tendem a ocorrer ao longo do tempo, não sendo imediatas após a aplicação do carregamento. Esse acompanhamento utiliza técnicas geotécnicas e, em alguns casos, levantamentos topográficos para compreender o comportamento estrutural ao longo do tempo. O nivelamento geométrico, técnica de levantamento topográfico, destaca-se ao medir as diferenças de altura, desníveis, por meio de visadas horizontais entre pontos próximos. Marcos superficiais são essenciais como referência para controlar deslocamentos horizontais e verticais do maciço, requerendo cuidado na instalação para garantir a confiabilidade das medições, considerando as condições de fundação. (Machado, 2007)

Para a medição dos deslocamentos dos marcos superficiais, faz-se necessária a instalação de estações topográficas, na região das ombreiras no caso de barragens por exemplo, de modo que se disponha de um referencial fixo. O marco de referência para a medição dos recalques é designado em inglês de benchmark, enquanto aquele estabelecido para servir de referência para a medição dos deslocamentos horizontais é designado de horizontal *control station* ou de *reference monument*, conforme observações de Dunnicliff (1988). Os recalques são determinados por meio de

nivelamentos de precisão, e os deslocamentos horizontais, por meio de triangulações ou colimações geodésicas.

Uma estação de referência é composta por uma tubulação ou haste, ancorada em profundidade e protegida por uma tubulação maior que possui conexões flexíveis para proteger a haste ou tubulação interna contra possíveis movimentos do solo (Figura 21). A ancoragem pode ser realizada de maneira mecânica, hidráulica ou por meio da injeção de calda de cimento, sendo esta última a prática mais comum. (Silveira, 2006)

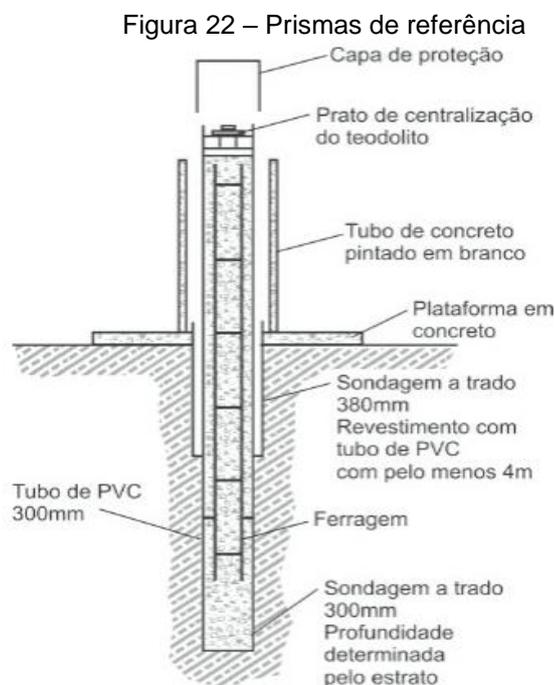
Figura 21 – Instalação de estação topográfica de referência em rocha



Fonte: Silveira (2006)

As estações de referência (Figura 22) destinadas à medição dos deslocamentos horizontais necessitam de um pilarete de concreto equipado com uma placa de apoio especial em seu topo, visando centralizar o teodolito ou o dispositivo de medição eletrônica de distância, como uma estação total. O projeto do pedestal deve ser

elaborado de forma a prevenir qualquer deslocamento angular possível, além de ser protegido contra movimentos de rastejo superficial. (Silveira, 2006)

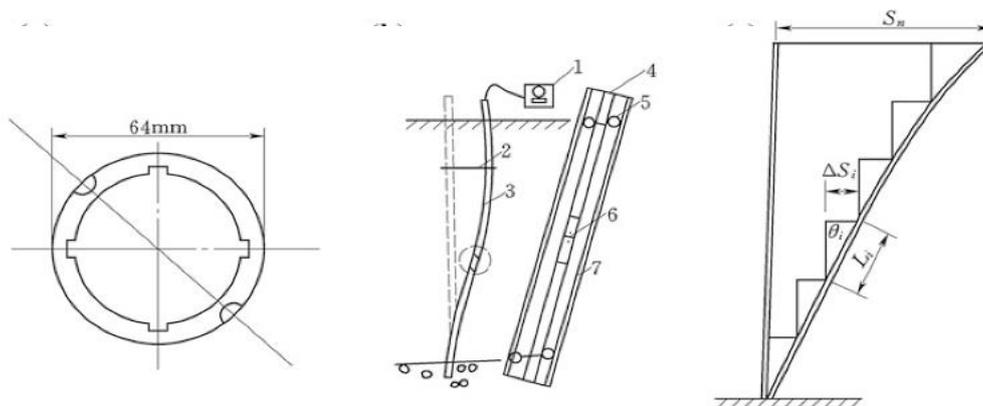


Fonte: Silveira (2006)

3.7.10. Inclinômetros

Inclinômetros possibilitam o registro dos deslocamentos horizontais, de forma contínua, em duas direções ao longo de um tubo, geralmente de alumínio, instalado verticalmente no maciço, por meio de uma sondagem executada. Os tubos são previamente fixados com luvas arrebitadas aos tubos, sendo descidos pelo furo até a profundidade desejada. A extremidade inferior deve ser fixada com calda de cimento, devendo haver o preenchimento do espaço anelar com areia. (Oliveira et al.) . A Figura 23 apresenta um exemplo de seção e corte de inclinômetro.

Figura 23 – Inclinômetro, a seção



Fonte: Central Water Commission, Ministry of Water Resources (2017)

A inclinação do revestimento é medida em intervalos regulares e o movimento lateral em relação à parte inferior do revestimento é calculado. O principal requisito para uma medição precisa é estender o furo abaixo da profundidade do movimento, de modo que as leituras feitas a partir da extremidade do furo sejam referenciadas a uma base estável. As leituras são realizadas abaixando uma sonda até o final do furo e depois elevando-a em incrementos iguais ao comprimento da distância entre eixos da sonda. A cada profundidade é medido o ângulo e o deslocamento, no topo do furo é calculado o deslocamento total. (Central Water Commission, Ministry of Water Resources, 2017)

As vantagens da sua utilização estão na capacidade de fornecer um perfil em uma área extensa sem intervir nas operações locais, além disso permite a obtenção de dados em tempo real proporcionando um monitoramento eficaz. No entanto, suas limitações estão no tempo de leitura e no valor elevado. (Durham Geo Slope Indicator, 2004)

3.7.11. Extensômetros

Os deslocamentos horizontais em barragens resultam da compressibilidade dos materiais do aterro, influenciados pela configuração do vale. Na região central da barragem, esses deslocamentos geram aumento das tensões horizontais de compressão. À medida que se aproxima das extremidades (ombreiras), as tensões de compressão diminuem até se anularem, transformando-se em tensões de tração. Já

os deslocamentos no sentido transversal ocorrem certo espalhamento do aterro durante a construção, o que tende a diminuir as tensões. (Silveira, 2006)

Os extensômetros são dispositivos que medem deslocamentos entre pontos e são comumente instalados nas fundações, partindo das galerias e túneis de drenagem. Seu propósito é observar o comportamento de camadas deformáveis no maciço rochoso, detectando aberturas de juntas em zonas de tensões de tração da fundação, especialmente próximas ao pé de montante das estruturas. Esses instrumentos são amplamente utilizados para medir deformações mecânicas e deslocamentos, podendo ser confeccionados com diferentes materiais, como liga metálica, fibra de vidro ou cabo metálico. Sensores e transdutores podem ser incorporados para efetuar medições precisas. (Honório)

3.7.12. Extensômetros de Hastes

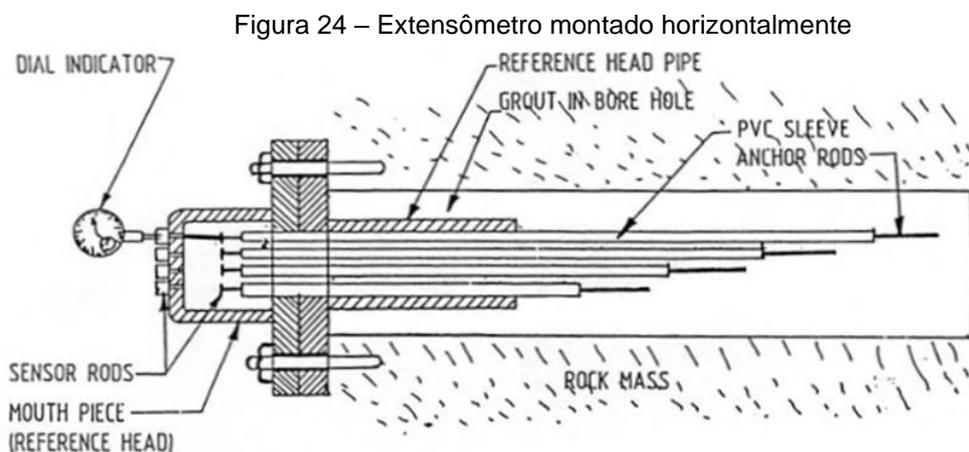
Os extensômetros de hastes consistem em hastes de aço instaladas em furos de sondagem, ancoradas no fundo e com pontas livres na boca, permitindo medições em relação a uma referência fixa chamada cabeça (Figura 24). Em situações de monitoramento de deformações em diferentes camadas, extensômetros múltiplos podem ser instalados no mesmo furo (Silveira, 2006)

As âncoras são selecionadas baseadas no local podendo ser indicadas para rochas (âncoras com grampos) e para solos macios com a âncora hidráulica. A opção de âncora com empacotados da em rochas ou solos. As hastes são de fibra de vidro ou aço inoxidável. Os extensômetros de haste de fibra de vidro são montados na fábrica e flexíveis para instalação em áreas confinadas, como túneis. Já os de haste de aço inoxidável são montados no local e podem ser utilizados em profundidades maiores. (Durham Geo Slope Indicator, 2004)

Esses instrumentos podem ser equipados com transdutores eletrônicos para leituras automatizadas, proporcionando a vantagem de medições à distância e em frequências mais elevadas e leituras automatizadas. (Honório)

Movimento de junta ou fissura é a mudança horizontal ou vertical na posição de uma parte de uma estrutura em relação a outra parte da estrutura. Normalmente, a

medição abrange juntas de blocos ou fissuras em estruturas de concreto, ou fissuras em estruturas de terra. (Durham Geo Slope Indicator, 2004)



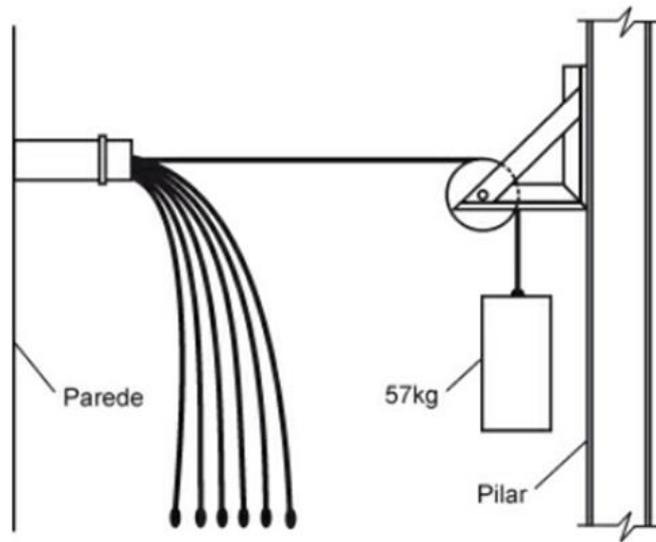
Fonte: Central Water Commission, Ministry of Water Resources (2017)

3.7.13. Extensômetros de Fios

Para esse tipo de extensômetros são instaladas placas espaçadas em distâncias definidas conectadas pela instalação de tubulações plásticas ou metálicas no interior do aterro. Os deslocamentos são transmitidos para uma cabine localizada no talude de jusante, onde são medidos os deslocamentos horizontais. A Figura 25 apresenta um esquema de extensômetro instalado na barragem de Oroville, a mais alta dos Estados Unidos da América.

Este tipo de Extensômetro não tem um desempenho satisfatório em decorrência dos grandes recalques diferenciais que ocorrem na região da transição entre o núcleo e o enrocamento de jusante, que implicam atritos significativos entre os cabos e a tubulação de aço.

Figura 25 – Extensômetro horizontal instalado na barragem de Oroville



Fonte: Silveira (2006)

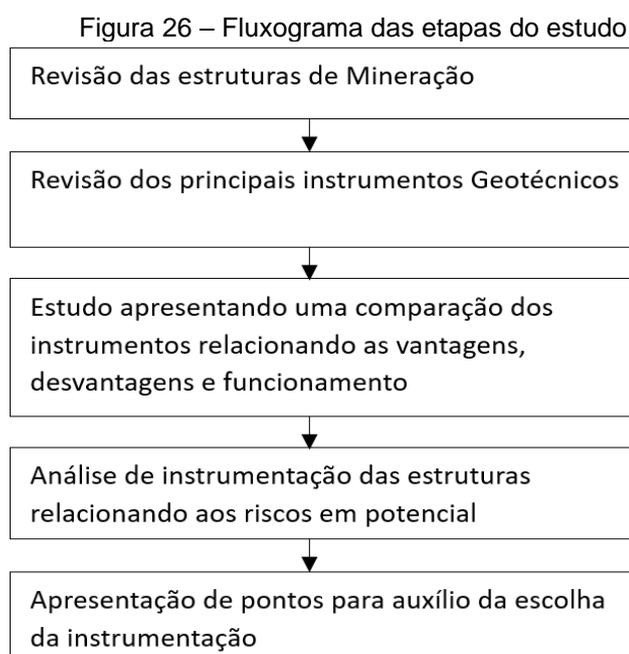
São equipamentos utilizados para determinar zonas de movimentação e permitem monitorar a extensão total de movimentos de aterros de barragens, ao longo de escavações e túneis.

4. METODOLOGIA

O presente trabalho adota como metodologia uma revisão das técnicas de monitoramento geotécnico, com foco nos instrumentos mais empregados em projetos de mineração. Inicialmente realizou-se uma revisão bibliográfica a respeito de estruturas geotécnicas existentes na área da mineração visando entender o contexto e os desafios específicos dessa área. Em seguida estudou-se as formas de monitoramento e estudou-se as estruturas de mineração e a instrumentação e, diferentes obras geotécnicas considerando suas necessidades.

A partir disso apresentou-se os instrumentos mais utilizados destacando as suas finalidades, vantagens, desvantagens e princípios de funcionamento. Além disso, compilou-se as informações visando estabelecer critérios claros de seleção dos instrumentos mais adequados para diferentes necessidades e condições de monitoramento em ambientes de mineração. Possibilitando uma comparação dos tipos de instrumentos levando em conta suas aplicabilidades.

O fluxograma a seguir apresenta um resumo das etapas do presente estudo após a definição do tema:



Fonte: do autor

5. RESULTADOS

O monitoramento por meio da Instrumentação acompanha todas as fases de uma obra geotécnica de mineração, sendo tanto na fase de projeto, quanto na fase de operação e desativação. Em fase de projeto as avaliações dos resultados provenientes dos instrumentos indicam se o comportamento está alinhado com o planejado, levando em consideração as incertezas que existem relacionadas as investigações.

Relacionando as principais causas de rupturas e instrumentação para sua detecção, temos os piezômetros as pressões dentro do maciço de rejeitos, ajudando a identificar o desenvolvimento de fluxos preferenciais de água que podem causar *piping*, uma forma de erosão interna que enfraquece a estrutura.

Os instrumentos de aferição de deslocamentos podem detectar movimentos e deformações anormais no solo e na estrutura, indicando possíveis problemas de galgamento ou deslizamento. Já os medidores de nível de água e sensores de umidade podem ser empregados para monitorar a saturação do solo e a presença de água, ajudando a identificar áreas de fundação que podem estar se deteriorando devido à erosão ou à lixiviação. Dentre os problemas relacionados as partes das estruturas geotécnicas, temos a tabela a seguir com os instrumentos relacionados a cada problema:

Tabela 3 –Relação de instrumentos por problemas

	Problema	Instrumento de Monitoramento
Fundação	Deslocamentos verticais	Extensômetros verticais, inclinômetros
	Subpressões	Piezômetros, Medidores de Pressão
	Infiltrações	Piezômetros, medidores de fluxo de água, medidores de nível freático
	Deslocamentos cisalhantes horizontais	Extensômetros horizontais, inclinômetros
Maciço	Deslocamentos verticais.	Extensômetros verticais, inclinômetros
	Deslocamentos horizontais.	Extensômetros horizontais, inclinômetros
	Sólidos carregados.	Sensores de movimento de massa, e sedimentação
	Pressões neutras.	Medidores de pressão, piezômetros
	Deslocamentos ao longo da crista e bermas.	Extensômetros horizontais, inclinômetros

Fonte: do autor

Nos casos de desastres citados, a instrumentação adequada, incluindo interpretações de dados relacionados a tomadas de decisões tem a finalidade de evitar este tipo de acontecimento. Os sistemas de monitoramento de piezômetros detectam elevação das poropressões nos materiais de barragens ou pilhas de rejeitos, alertando os engenheiros sobre potenciais problemas de liquefação ou instabilidade. Além dele, os inclinômetros identificam movimentações sinalizando a necessidade de intervenções corretivas. Nos itens a seguir será abordado os principais instrumentos e dados para auxílio na melhor escolha para que desastres como estes possam ser evitados.

Levando em conta os casos de ruptura, demonstra que apenas possuir a instrumentação não é suficiente. É necessário sistema integrado de monitoramento que não apenas colete dados precisos, mas também forneça análises contínuas desses dados para identificar níveis de risco e tomar medidas preventivas em tempo hábil.

Nesse sentido a escolha correta da instrumentação e sua avaliação é de extrema importância. Os Piezômetros são capazes de monitorar as pressões internas do maciço, a detecção de anomalias nas pressões tem a finalidade de alertar os engenheiros a respeito de possíveis falhas com os dados fornecidos. Os extensômetros permitem a interpretação sinalizando deslocamentos ao receber alertas sobre tais movimentos, medidas corretivas poderiam ser implementadas imediatamente.

Para um bom funcionamento, além do estudo prévio para elaboração dos planos de ação com os dados recebidos dos instrumentos, deve-se atentar também para uma instalação correta. A instalação dos piezômetros de tubo aberto é feita a partir da realização de um furo de sondagem abaixo da profundidade desejada para o piezômetro, em seguida é adicionado areia no fundo do furo e vedado de entrada com bentonita e o restante é preenchido com argamassa.

É recomendado a realização de testes de vida nos instrumentos, e a realização de leituras periódicas. As etapas adicionais do Pneumático incluem a agitar o piezômetro em um balde de água para eliminar o ar entre o filtro e o diafragma,

garantindo uma leitura precisa e a adição de peso ao piezômetro para ajudar na sua descida no furo cheio de água. Os de cordas vibrantes não tem a necessidade da adição de areia ao entorno do piezômetro pois sua entrada de água é pequena, o furo de sondagem seja preenchido diretamente com uma calda de cimento bentônico. Assim como o pneumático, o de corda vibrante também é submerso em balde de água, mas é necessário amarrar o piezômetro ao cabo de sinal e preencher o furo de sondagem.

Os Inclinômetros são instalados a partir de uma profundidade previamente determinada do revestimento geralmente entre 3 a 4 metros em solos estáveis. Para garantir leituras mais precisas é necessário que a verticalidade esteja correta, idealmente a 3 graus da vertical. O assentamento deve ser considerado em tubos corrugados. Medidas como suspender um tubo de aço ou pré-instalar uma âncora na parte inferior ajudam a garantir o correto funcionamento do inclinômetro.

A instalação de extensômetros de haste geralmente requer um furo de 3 polegadas ou maior, enquanto as cabeças de referência para extensômetros multiponto podem exigir uma abertura maior no colar do furo. Os furos devem ser de drenagem livre e limpos de detritos antes da instalação, pois o extensômetro mede apenas o movimento axial. As âncoras hidráulicas são ativadas manualmente por uma bomba hidráulica, enquanto as âncoras de empacotamento são ativadas por uma bomba de grout de alta pressão.

Após uma análise das aplicações e características de diferentes tipos de instrumentação geotécnica para um efetivo monitoramento em barragens e pilhas da área minerária realizou-se primeiramente uma tabela (Tabela 4) abrangendo os aspectos de aplicação de cada instrumento de medidores de deslocamento.

Tabela 4 –Resumo de instrumentos e características

Tipo de Instrumento	Aplicações	Funcionamento	Característica
Inclinômetros	Acompanhamento de deslocamentos horizontais em obras geotécnicas como barragens, taludes, escavações, túneis	Medição da inclinação de uma vertical a ser monitorada com um ponto sem deslocamento na base	Detectar inclinações em terrenos instáveis. Pode ser instalado em diferentes camadas do solo permitindo o monitoramento de diferentes profundidades.

Tipo de Instrumento	Aplicações	Funcionamento	Característica
Extensômetro	Monitora o recalque e os movimentos de estruturas geotécnicas e civis	Fornecem a leitura a partir da deformação ou deslocamento de uma estrutura usando sensores que correspondem a mudança entre pontos fixos.	Medir movimentos lineares como expansões ou recalques, podem ser instalados na horizontal ou vertical
Marco de recalque ou superficial	Monitoram os recalques e deslocamento da coordenada do ponto	Constituem em prismas ópticos instalados ao longo da estrutura permitindo a medição de deslocamentos em relação a uma linha previamente definida	Detectar movimentos diferenciais entre partes da estrutura, capaz de detectar pequenos deslocamentos Necessita de estar em uma linha sem obstruções entre os prismas e a estação total ou teodolito

Fonte: do autor

Já os piezômetros são apresentados pela Tabela 5:

Tabela 5 –Resumo dos tipos de piezômetros e características

Tipo de Instrumento	Aplicações	Funcionamento	Característica
Pneumático	Determinação de pressões neutras e subpressões em obras de engenharia civil, como fundações, taludes e maciços.	Funciona com base na compressão do ar no interior do tubo em resposta à variação de pressão hidráulica.	É operado por pressão de gás.
Piezômetro Elétrico e de Corda Vibrante	Medidas de pressões neutras e subpressões em taludes, maciços de terra e fundações.	Utiliza sensores elétricos para medir diretamente a pressão hidráulica do solo.	Utilizado para monitorar a pressão em diferentes camadas de solo devido a sua capacidade de instalação em múltiplos níveis.
Tubo Aberto	Determinação de pressões neutras em obras de engenharia civil, como fundações,	Consiste em um tubo aberto inserido no solo, permitindo que a água flua livremente para dentro do tubo, alcançando um	Possuem um tempo de resposta mais rápido em solos com boa permeabilidade, onde a água pode

Tipo de Instrumento	Aplicações	Funcionamento	Característica
	taludes e maciços.	equilíbrio de pressão com o solo circundante.	fluir livremente através do solo.
Hidráulico	Determinação de pressões neutras e subpressões em obras de engenharia civil, como taludes, aterros e fundações.	Utiliza um fluido incompressível, como água ou óleo, para transmitir a pressão do solo para um manômetro localizado acima do solo.	Pode ser usado em uma variedade de solos.

Fonte: do autor

A respeito das características, a Tabela 6 apresentam os principais aspectos abordados nas bibliografias estudadas de cada tipo piezômetro, seguido da Tabela 7 abrangendo os tipos de instrumento de deslocamento e suas características.

Tabela 6 –Resumo dos instrumentos e características

Características	Piezômetro Casagrande/Tubo Aberto	Piezômetro de Corda Vibrante	Piezômetro Elétrico	Piezômetro Pneumático
Funcionamento	Hidrostático	Mecânico	Elétrico	Pneumático
Material do Tubo	PVC, Aço	Aço	PVC, Aço	PVC, Aço
Possibilidade de obstrução	Alta	Baixa	Baixa	Média
Profundidade de Instalação	Superficial	Variável	Variável	Variável
Manutenção	Baixa	Média	Baixa	Média
Resposta a Mudanças	Lenta	Rápida	Rápida	Rápida
Aplicações	Solos variados	Solos variados	Solos variados	Solos variados
Vantagens	Menor custo; fácil instalação; baixa manutenção; Medição direta do nível da água	Maior sensibilidade; resposta rápida a mudanças; pouca interferência externa; acesso remoto	Versatilidade com atuação em diferentes camadas; acesso remoto	Estabilidade térmica; resposta rápida a mudanças; não necessita calibração
Desvantagens	Pouca sensibilidade a	Cuidados na instalação	Cuidados na instalação;	Manutenção mais complexa

Características	Piezômetro Casagrande/Tubo Aberto	Piezômetro de Corda Vibrante	Piezômetro Elétrico	Piezômetro Pneumático
	mudanças rápidas; suscetível ao entupimento do tubo		requer local para registro de dados	

Fonte: do autor

Tabela 7 –Resumo dos instrumentos de deslocamento e características

Características / Critérios	Extensômetro	Marco de Recalque	Inclinômetro
Funcionamento	Mecânico	Mecânico	Aço, alumínio, PVC, PEAD, etc.
Material	Aço, fibra	Aço, concreto	Aço
Profundidade de Instalação	Variável	Superficial	Profunda
Manutenção	Baixa	Média	Baixa
Resposta a Mudanças Rápidas	Rápida	Lenta	Rápida
Aplicações	Detecção de deslocamento preciso na região da instalação	Obtenção da coordenada do ponto com monitoramento de seu deslocamento espacial	Detecção de movimentos horizontais possibilitando obtenção da provável superfície de ruptura
Vantagens	Alta sensibilidade; resposta rápida; baixa manutenção	Monitoramento contínuo; baixo custo	Monitoramento preciso e contínuo ao longo da vertical;
Desvantagens	Sensível a distúrbios mecânicos; custos de instalação	Limitado a precisão do equipamento de leitura; sujeito a obstruções dos prismas	Requer instalação profissional; custos de equipamento

Fonte: do autor

Com a finalidade de aferir a poropressões ou pressão de água dos maciços, os piezômetros se tornam essenciais nas obras de mineração. O piezômetro de Casa grande é ideal para projetos que necessitam de uma simplicidade na instalação e operação por ser de fácil instalação, além do baixo custo de manutenção. Ao ser usado em solos com alto teor de partículas finas, existe uma maior probabilidade de entupimento necessitando maiores manutenções. Portanto é adequado para locais a manutenção regular pode ser realizada.

Os de corda vibrante podem ser usados em locais com alto teor de partículas finas por não entupir facilmente, podendo ser usado em locais de menor facilidade de manutenção, além de ser menos suscetível a interferência externa. Por sua instalação necessitar de cuidados, possui um valor mais elevado e em locais mais irregulares sua instalação é mais complexa. Ao escolher esse piezômetro deve-se levar em conta também a variação térmica do local por ser sensível a mudanças de temperatura.

Adequado para diferentes condições do solo, os piezômetros elétricos podem ser adaptados a diferentes profundidades, podendo ser instalados em locais com variações na resistividade. Entretanto deve ser avaliado o seu uso em áreas com alta salinidade. Exige calibração regular para garantir a precisão das medições ao longo do tempo.

Já os pneumáticos possuem resistência a estabilidade térmica, fornecendo leituras mais consistentes mesmo em ambientes onde há variação de temperatura. Sua complexibilidade resulta em um alto valor tanto de instalação quanto manutenção.

Os inclinômetros são ideais para monitorar as deformações em estruturas, fornecendo dados de leituras de movimentação horizontal e vertical. São indicados em projetos de monitoramento contínuo por possuir um custo elevado. Podem ser usados para detectar problemas de instabilidade. Os extensômetros possuem sensibilidade de detecção a movimentos menores, tendo uma resposta rápida, desta forma são indicados para o monitoramento real das estruturas. São recomendados para projetos onde é necessário a detecção precoce de recalque.

Para um monitoramento de recalque verticais, são utilizados os marcos de recalque, que possuem uma facilidade de instalação e são mais econômicos. Apesar de possuir uma limitação em sua sensibilidade, são indicados onde o acesso e os recursos são restritos. Deve considerar que ele não detecta recalque menores so analisar o seu uso na estrutura.

Este estudo consolida os principais instrumentos de monitoramento a fim de auxiliar na escolha com base em seu comportamento apontando vantagens e desvantagens de cada instrumento visando um monitoramento eficiente e objetivo das estruturas geotécnicas de mineração.

Relacionando os tipos de instrumentos, com as estruturas estudadas, levando em consideração o monitoramento e as características de cada instrumento, temos as Pilhas de estéril com instrumentação incluindo piezômetros, extensômetros e inclinômetros. Os piezômetros são vantajosos para monitorar a pressão da água no maciço de estéril, fornecendo informações essenciais sobre a estabilidade hidráulica. Os extensômetros permitem a detecção de deformações no solo, possibilitando a identificação precoce de movimentos indesejados. Já os inclinômetros são úteis para monitorar inclinações do talude, ajudando a prevenir deslizamentos.

As estruturas de barragem levam em sua instrumentação piezômetros, medidores de nível de água, que são fundamentais para monitorar a pressão da água no interior do maciço, prevenindo potenciais falhas devido à saturação excessiva. Os medidores de assentamento ajudam a detectar deformações no corpo da barragem, enquanto os medidores de nível de água fornecem dados sobre a altura do reservatório. Deve se atentar a possibilidade de interferência com a estabilidade da estrutura durante a instalação dos instrumentos, bem como a necessidade de manutenção regular para garantir a precisão das leituras. Os inclinômetros são cruciais para monitorar a estabilidade dos taludes rochosos, permitindo a detecção de movimentos laterais.

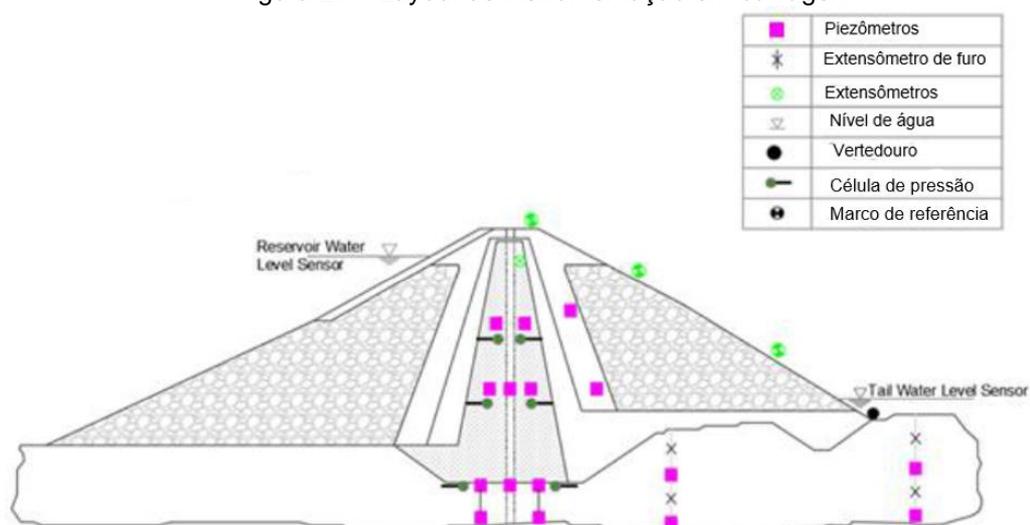
As estruturas de enrocamento são monitoradas por meio de marcos superficiais e inclinômetros, além dos piezômetros assim como as de terra. No entanto, a complexidade da instalação em terrenos rochosos e a necessidade de equipamentos especializados, além dos custos associados à instrumentação e manutenção devem ser levados em consideração.

Enquanto as barragens de rejeito são projetadas para conter os resíduos gerados a partir do beneficiamento, as pilhas são projetadas para armazenar materiais não aproveitáveis economicamente. Ambas as estruturas requerem monitoramento para garantir sua estabilidade e longevidade. Diante do histórico de rompimento, as barragens possuem mais critérios de monitoramento e fiscalização por apresentarem um maior número de desastres e estão mais suscetíveis a isso.

Diante disso, as barragens possuem um maior número de dispositivos, sendo necessário monitorar a sua poropressão no interior, o nível de água para acompanhar a linha freática da estrutura, bem como os deslocamentos internos e inclinações dos

seus taludes. As barragens de aterro são frequentemente danificadas ou falham devido à criação de caminhos de infiltração concentrada, originados logo após a construção ou durante o seu uso por conta das deformações. É apresentado pela Figura 27 um esquema de monitoramento por instrumentação de uma barragem.

Figura 27 – Layout de instrumentação em barragem



Fonte: (Central Water Commission, Ministry of Water Resources, 2017)

Nela é possível identificar a piezometria a fim de monitorar a poropressão do maciço, importante para identificar as variações de pressões que venham a ocorrer, além de fenômenos como *piping*, que é uma forma de ruptura causada pela erosão interna do solo ou material da barragem devido à infiltração de água, também podendo ser identificada pelo medidor de nível de água. Os inclinômetros e extensômetros são empregados com a importância de identificar deslocamentos, o que pode indicar a ocorrência de diferentes formas de ruptura, como o galgamento e a liquefação. Sendo a liquefação um fenômeno no qual a saturação do solo faz com que este perca sua capacidade de suporte, tornando-se instável e propenso a movimentos de massa. A utilização destes instrumentos permite detectar precocemente os sinais dos eventos citados possibilitando a adoção de medidas preventivas para evitar danos catastróficos à barragem e às áreas próximas.

As Pilhas tanto de rejeito como de estéreo podem possuir uma composição heterogênea possuindo assim um comportamento diferente dos materiais. Em uma pilha definitiva encontra-se em sua fundação a necessidade de instrumentação

piezométrica. Já nos seus alteamentos deve-se monitorar os deslocamentos da face dos taludes, a formação de bolsões e em sua drenagem é necessário se atentar a vazões superiores à de projetos.

Para monitorar a poropressão do maciço e detectar possíveis variações de pressão, é recomendado o uso de piezômetros semelhante a barragens, instalados na fundação da pilha. Para acompanhar os deslocamentos da face dos taludes durante os alteamentos, bem como a formação de bolsões, os inclinômetros são necessários. Além disso, é importante utilizar medidores de vazão na drenagem da pilha para detectar e controlar qualquer aumento repentino de fluxo que possa indicar problemas de estabilidade.

6. CONCLUSÃO

Após o estudo realizado, contemplando uma revisão dos principais instrumentos utilizados nas obras geotécnicas de mineração, concluiu-se já em fase de projeto, além do conhecimento das estruturas, deve se estudar os parâmetros necessários para o monitoramento da estrutura desejada. Após definição do objetivo é preciso um entendimento das funcionalidades, considerando a proposta de entrega de resultados de cada instrumento para uma boa escolha da instrumentação.

A escolha deve ser guiada pelas condições dos locais, é necessário considerar a permeabilidade do local, variações sazonais, e composição dos solos. Os fatores hidrogeológicos influenciam no desempenho dos resultados. Além disso o orçamento também deve ser considerado, levando em conta a instalação e manutenção.

O emprego da instrumentação em Pilhas de estéreos apresenta como vantagens na gestão da segurança a capacidade de monitoramento contínuo oferecida pela instrumentação permite uma avaliação constante das condições do maciço de estéril, identificando precocemente qualquer sinal de instabilidade. Sendo assim possibilita intervenções a fim de mitigar problemas futuros, minimizando o risco de falha. Além disso por fornecer dados em tempo real permite uma tomada de decisão embasada em informações reais.

Nas barragens é possível monitorar de forma contínua as barragens a pressão da água, as deformações do solo e os assentamentos. Essa capacidade de monitoramento permite a identificação de anomalias ou sinais de instabilidade, possibilitando intervenções rápidas e eficientes para corrigir só problemas. Somado ao fato de a instrumentação atender as regulamentações e padrões de segurança, possibilitando que as barragens atuem dentro do esperado.

Ao abordar as Barragens, pode destacar como a instrumentação permite o acompanhamento preciso da pressão da água e deformações do solo. Essa capacidade de monitoramento constante não apenas identifica anomalias ou sinais de instabilidade, mas também possibilita intervenções rápidas e eficazes para corrigir problemas emergentes. Além disso, para garantir o desempenho, a longevidade e

segurança das barragens é necessário seguir dentro dos limites estabelecidos esperados a partir dos regulamentos. Contando com o monitoramento adequando com estudos prévios, definição de limites e considerando as funcionalidades dos instrumentos, já que influenciam diretamente nos resultados.

Quanto às Pilhas temos que o monitoramento permite a avaliação constante das condições do maciço de estéril. Essa vigilância precoce identifica qualquer sinal de instabilidade, possibilitando intervenções proativas para mitigar problemas futuros e minimizar o risco de falhas.

Fica evidente então, que a escolha cuidadosa e o emprego adequado dos instrumentos no monitoramento destas estruturas influenciam diretamente não só na sua segurança, mas também da região ao entorno. A instrumentação é essencial para garantir a segurança das estruturas de mineração. Este estudo consolidou os principais instrumentos de monitoramento, fornecendo uma base sólida para a seleção e implementação de estratégias eficazes de monitoramento em obras geotécnicas de mineração.

REFERÊNCIAS

(Brasil)ANA.Agência Nacional de Águas Guia de Orientação e Formulários do Plano de Ação de Emergência – PAE. s.l., Agência Nacional de Águas, 2016.

Agencia Nacional de Águas Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens - Guia de Orientação e Formulários para Inspeção de Segurança de Barragens - Volume II. Brasília - DF, ANA, 2016.

Agência Nacional do Aguas Guia de Orientação e Formulários para Inspeções para Inspeções de Segurança de Barragem / Agência Nacional das Águas.s.l., ANA , 2016.

ANA.Agência Nacional de Água Elaboração de Estudos para Concepção de um Sistema de Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul e de um Sistema de Intervenções Estruturais para Mitigação dos Efeitos de Cheias nas Bacias dos Rios Muriaé e Pomba e Investigação de Cmapo C. s.l., Agência Nacional de Água ANA, 2012.

BalbiF.A. D. Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti – MG. 337 f.s.l., Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

BarragensComitê Brasileiro de A História das Barragens no Brasil , Século XIX, XX e XXI. Rio de Janeiro, CBDB, 2011.

BRASIL Manual de segurança e inspeção de barragens. Brasília, Ministério da Instegtação Nacional. Secretaria de Infraestrutura Hídrica , 2015.

BressaniL.A. Instrumentação em obras geotécnicas, Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encosta,. COBRAE,. ABMS, 2009, Vol. 1.

CamposT.M. P. Geotecnia e Meio Ambiente: Relato do Estado da Arte. COBRAMSEF.1986, Vol. VIII, pp.123-157.

CarneiroGustavoSeverino Guimarães Estudo das causas, impactos e medidas corretivas do rompimento de uma barragem de rejeitos, usando o caso da barragem

de Mariana – MG. Estudo das causas, impactos e medidas corretivas do rompimento de uma barragem de rejeitos, usando o caso da barragem de Mariana – MG., UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA , 2018.

Central Water Commission, Ministry of Water Resources Guidelines for Instrumentation of Large Dams. s.l., Nova Delhi, Government of India, Junho 2017

Central Water Commisison, Ministry of Water Resources Guidelines for Instrumentation of Large Dams. s.l., Government of India, 2017.

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

Contribuição ao estudo dos rejeitos da mineração e dos seus. **Chammas R.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, s.n., 1986, Simpósio Sobre Barragens de Contenção de Rejeitos.

Costa B.S. Simulação de alternativas locais de depósito de estéril para uma mina de fosfato. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Araxá , Centro, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Minas) .

Costa Walter Duarte Geologia de Barragens. São Paulo, Oficina de Textos, 2012.

Cruz Paulo Teixeira da 100 Barragens Brasileiras : casos históricos, materiais de construção, projeto. São Paulo, Oficina de Textos, 2004.

de Oliveira Daniela Garroux G, Brandt José Roberto Thedim, Leão Marcio Fernandes INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM OBRAS SUBTERRÂNEAS. FUNDAÇÕES & OBRAS GEOTÉCNICAS.

Dunnicliff John Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. s.l., A Wiley-Interscience Publication, 1988.

Durham Geo Slope Indicator Guide to Geotechnical instrumentation. Mukilteo, Washington, USA, s.n., 24 11 2004.

—. Guide to Geotechnical Instrumentation. Mukilteo, s.n., 2004.

Eaton T. et al. Course Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps. s.l., Under Licence from the British Columbia Ministry of Energy and Mines - Mine Dump Committee., 2005.

Freitas M.A. Apostila Sobre Formação de Pilha de Estéril e Rejeito. Belo Horizonte, Editora Ietec, 2004.

Gerscovich Denise M. S. Estabilidade de Taludes - 2ª edição. São Paulo, Oficina de Textos, 2016.

Honório Parque Tecnológico Itaipu - Jair Curso de instrumentação e auscultação de Barragens. s.l., Parque Tecnológico Itaipu.

IBAMA Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 2023.

IBRAM Panorama Mineração do Brasil. Brasil, Public Projetos Editoriais, 2023.

—. Panorama mineração do Brasil 2023. s.l., Public Projetos Editoriais, IBRAM, 2023.

Luz Adão Benvindo da, da Luz Fernando Antônio Freitas INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO. da Luz Benevides Adão, Sampaio Alves João, França Cristina A. Silvia A. do livro. Tratamento de minério.

Luz Adão Benvindo da, Sampaio João Alves, França Silvia Cristina A Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 5ª edição, 2010.

Machado William Gladstone de Freitas Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeito da Mineração. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. . 2007.

Massad Façal Obras de Terra, curso básico de Geotecnia. São Paulo, Oficina de Textos, 2010.

MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO – UMA REVISÃO. **Cardozo F.A.C., Pimenta M., Zingano A.C.** 14 12 2016, HOLOS.

Mota R.R. K. Rompimento e delimitação da área de inundação da barragem . s.l. , FECIV, 2017.

Oliveira Daniela Garroux G. de, Leão Marcio, Brandt José Roberto Thedim INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA EM OBRAS SUBTERRÂNEAS. FUNDAÇÕES & OBRAS GEOTÉCNICAS.

Oliveira-Filho W.L., Abrão P. Disposição de rejeitos de mineração. Zuquette V.L.A. do livro. Geotecnia Ambiental. Rio de Janeiro, Elsevier, 2015.

Pearcer S., Barteaux M. INSTRUMENTATION IN WASTE ROCK DUMPS: GOING DEEPER. Proceedings of the Eighth Australian Workshop on Acid and Metalliferous Drainage (Editores H. Miller e L. Preuss). pp.371-386.

Roca Marta et al. A Review of the Risks Posed by the Failure of Tailings Dam . UK SAPACE , Wallingford, Howbery park, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BA, 2019 .

SAF Engenharia SAF Engenharia. [Online][Citado em: 20 1 2024.]www.saffengenharia.com.br/pilhas-de-esteril-e-rejeito-devemos-nos-preocupar-com-elas/.

Silveira João Francisco Alves Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. São Paulo, Oficina de Textos, 2006.

—. Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento. s.l., Oficina de Textos, 2006.

Soares Lindolfo Barragem de Rejeitos. Colaboração técnica. Adão Benvindo da Luz João A. do livro. Tratamento de Minério. Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2010, 5, pp.831-896, 19.

USAC-U.S Army Corps of Engineers HEC-RAS, River Analysis System. s.l., Hydraulic Reference Manual., 1995.

Tailings Dams. HR Wallingford, Howbery Park, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BA, UK SPACE

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretária de Infraestrutura Hídrica. Manual de segurança e inspeção de barragens. Brasília, 2015.

Durham Geo Slope Indicator Guide to Geotechnical Instrumentation. Mukilto, Washington, USA, 2024.

EatonT.et al. Course Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps, sl. Under Licence from the British Columbia Ministry of Energy and Mines – Mine Dump Committee, 2005.