



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



VINÍCIUS OLIVEIRA QUEIROZ

MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE ESTRUTURAS DE MINERAÇÃO

Ouro Preto – MG
2024

VINÍCIUS OLIVEIRA QUEIROZ

MONITORAMENTO GEOTÉCNICO DE ESTRUTURAS DE MINERAÇÃO

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida da Silva.

Ouro Preto – MG
2024



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinícius Oliveira Queiroz
Monitoramento Geotécnico de Estruturas de Mineração

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

Aprovada em 31 de julho de 2024

Membros da banca

Doutor - José Margarida da Silva - Orientador- Universidade Federal de Ouro Preto
Doutor- José Fernando Miranda - Universidade Federal de Ouro Preto
Mestre - Fabiano Veloso Ferreira- Vale S.A.

José Margarida da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 16/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Jose Margarida da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 16/10/2024, às 08:47, 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 **0795744** e o código CRC **F6D90F36**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Adriana Cristina Cardoso Rodrigues pela imensa ajuda durante a graduação.

Agradeço aos amigos do DEMIN e da UFOP que estiveram presentes nessa importante etapa da minha vida pessoal e profissional, pelo apoio e carinho.

Agradeço aos professores do DEMIN e da UFOP, e todo o corpo técnico da Escola de Minas pelo ensino gratuito e de qualidade, em especial Prof. Dr. José Margarida da Silva, que me orientou nesse trabalho de conclusão.

Agradeço a Mecroc Engenharia pela oportunidade de aprender e compartilhar conhecimento acerca das áreas de Geomecânica e Geotecnia e vivenciar o dia a dia do ambiente de trabalho de maneira agradável e leve.

Agradeço aos meus irmãos de morada, República Nadavê, pela cumplicidade, lealdade e por todos os momentos compartilhados.

Aos amigos de Ouro Preto, pelos momentos de descontração e pelo companheirismo.

Por fim agradeço ao meu segundo lar, o lugar que encontrei para chamar de meu. Obrigado Ouro Preto por todos que pude conhecer e me relacionar. Viva a República Nadavê, Viva a Escola de Minas, Viva Ouro Preto!

“A psicologia social deste século nos ensinou uma importante lição: usualmente não é o caráter de uma pessoa que determina como ela age, mas sim a situação na qual ela se encontra.” Stanley Milgran (1974) – Psicólogo Social Americano

RESUMO

A instrumentação e o monitoramento geotécnico das estruturas de mineração são componentes essenciais para garantir operações eficazes e seguras. O mau funcionamento dessas estruturas pode resultar em perda de vidas e graves danos à propriedade e ao meio ambiente, caso os dados obtidos por meio dos instrumentos de monitoramento não sejam analisados e compreendidos corretamente. Uma ampla gama de ferramentas geotécnicas auxilia na tomada de decisões em minas a céu aberto, minas subterrâneas e estruturas de contenções de rejeito ou disposição de estéril, otimizando a segurança, eficiência e sustentabilidade das operações. Este estudo demonstra a importância da instrumentação e do monitoramento por meio de estudos de caso, evidenciando que a análise dos dados dessas geotecnologias poderia ter evitado acidentes, mitigado danos em acidentes recentes e ainda podendo antecipar novos incidentes geotécnicos, assegurando a continuidade sustentável da exploração mineral. O objetivo é apresentar um estudo teórico que avalia qualitativamente o papel da instrumentação geotécnica na estabilidade de estruturas e sua importância entre os responsáveis, além de caracterizar os instrumentos de acordo com suas funções e associá-los às características intrínsecas do ambiente a ser monitorado. Foi realizada uma ampla pesquisa bibliográfica, incluindo uma revisão histórica de acidentes geotécnicos na mineração e dos instrumentos mais usados em minas a céu aberto, cavas, galerias, barragens de rejeitos e pilhas de estéreis. Com base em estudos de casos conclui-se sobre a essencialidade das tecnologias de monitoramento, a necessidade de combinar diferentes tipos de instrumentos, a constante busca por evolução da tecnologia de monitoramento e a correlação entre o objetivo do monitoramento e as características particulares da estrutura a ser monitorada.

Palavras-chave: instrumentação geotécnica, monitoramento de estruturas, acidentes geotécnicos; tecnologias de monitoramento

A B S T R A C T

In mining, instrumentation and geotechnical monitoring of structures are essential components for safety and effective operation. The malfunction of these structures can result in loss of life and severe damage to property and the environment if the data provided by the monitoring instruments are not interpreted correctly. A wide range of geotechnical tools aids in decision-making in open-pit and underground mining, as well as in tailings containment structures or waste disposal, optimizing the safety, efficiency, and sustainability of operations. This study demonstrates the importance of instrumentation and monitoring through case studies, showing that the analysis of data from these geotechnologies could have mitigated damage in recent accidents and can anticipate new geotechnical incidents, ensuring the sustainable continuity of mineral exploitation. The objective is to present a theoretical study that qualitatively assesses the role of geotechnical instrumentation in the stability of structures and its importance among those responsible, in addition to characterizing the instruments according to their functions and associating them with the intrinsic characteristics of the environment to be monitored. A comprehensive bibliographic research was conducted, including a historical review of geotechnical mining accidents and the most commonly used instruments in open-pit and underground mines, pits, galleries, tailings dams, and waste piles. Based on case studies, it is concluded that monitoring technologies are essential, that there is a need to combine different types of instruments, that continuous technological evolution is necessary, and that there must be a correlation between the monitoring objective and the specific characteristics of the structure to be monitored.

Keywords: Geotechnical instrumentation, structural monitoring, geotechnical accidents; Monitoring technologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ruptura em taludes na mina a céu aberto Bingham Canyon Mine, nos EUA.....	7
Figura 2 - Lavra por bancadas na mina de minério de ferro de Carajás (PA), com destaque para os taludes em processo de revegetação	9
Figura 3 - Antes e depois da descaracterização da barragem 8B, em Nova Lima, região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais.	11
Figura 4 - Quantitativo de Barragens – Método Construtivo adotado.....	14
Figura 5 - Portal do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração.	20
Figura 6 - Quantitativo Geral de Barragens – PNSB.....	21
Figura 7 - Quantitativo de Barragens por Categoria de Risco – CRI.....	21
Figura 8 - Quantitativo de barragens por dano potencial associado – DPA.	22
Figura 9 - Os tipos de pilha de estéril.....	25
Figura 10 - Visão esquemática dos basculamentos consecutivos na disposição de estéreis em camadas.	28
Figura 11 - Desenho esquemático da disposição de pilhas por banco ou em ponta de aterro.	29
Figura 12 - Redistribuição das tensões in situ e deslocamento radial associado.....	31
Figura 13 - Aplicação automatizada de tela em maciço escavado, junto com ancoragens e camada de concreto projetado.	32
Figura 14 – Representação, da esquerda para direita, das cambotas, concreto projetado e um conjunto de práticas como concreto projetado, enfilagem e cambotas.	33
Figura 15 - Visualização do princípio de operação do extensômetro fixo de furo	40
Figura 16 - Extensômetro MPBX instalado e seus pontos de ancoragem	41
Figura 17 - Esquema da instrumentação in situ tipo overcoring.....	43
Figura 18 - Princípio geral de funcionamento do TDR.	44
Figura 19 - Crackmeter, medidor de descontinuidades.....	46
Figura 20 - [A] Modelo 4420. [B] Crackmeter configurado com grampos especiais para fixação em geogrelhas. [C] Três Crackmeters modelo 4420 configurados como um único Crackmeter. 3D.....	47
Figura 21 - Procedimento de identificação de descontinuidades na nuvem de pontos. (A) Trecho escaneado de um túnel. (B) destaque de uma	

parte da nuvem de pontos com um plano selecionado indicando sua orientação. (C) detalhe da identificação do comprimento do traço.....	50
Figura 22 - Sismógrafo S100	52
Figura 23 - Processo do aumento da poropressão em um maciço terroso e consequente liquefação e ruptura da estrutura.	53
Figura 24 - Abordagem convencional. Monitoramento de fontes ativas naturais e antrópicas a partir de sismogramas para obter os parâmetros da fonte sísmica.	54
Figura 25 - Piezômetros instalados em barragem de mineração.	55
Figura 26 - Piezômetro de Corda Vibrante pelo método convencional	57
Figura 27 - Princípio de funcionamento de um piezômetro de corda vibrante	58
Figura 28 - Diferentes modelos de piezômetros de corda vibrante da Geokon.....	58
Figura 29 - Piezômetro de Casagrande.	59
Figura 30 - Complexo de Gongo Soco.	63
Figura 31 - Talude norte da cava da Mina de Gongo Soco.....	64
Figura 32 - Estrutura de Contenção Jusante (ECJ), construída na área da barragem Sul Superior, em Barão de Cocais.	67
Figura 33 - Cronograma de atividades de descaracterização da Barragem Sul Superior.	68
Figura 34 - Ruptura da Barragem B-I Da mina do Córrego do Feijão.	70
Figura 35 - Piezômetros e/ou medidores de nível de água e marcos superficiais instalados na Barragem B-I Mina Córrego Feijão.....	73
Figura 36 – À esquerda, a ruptura na pilha de estéril; à direita, a vista geral do vale.	74
Figura 37 - Ábaco de Sharp para estimativa da altura do NA.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões usuais dos bancos em lavras a céu aberto de acordo com os tipos de minério.	10
Tabela 2 - Exemplos de rupturas de barragens de contenção de rejeitos.	18
Tabela 3 - Principais causas de acidentes em barragens de rejeitos.	18
Tabela 4 - Custo relativo de cada fase da auscultação.....	25
Tabela 5 – Paralelismo entre os instrumentos de monitoramento geotécnico e as estruturas geotécnicas da mineração em que são implementados, a finalidade do monitoramento, os principais parâmetros monitorados e a correlação com sistemas de sustentação da estabilidade.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CMG	Centro de Monitoramento Geotécnico
CRI	Categoria de Risco
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DMT	Distância média de transporte
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
ECJ	Estrutura de Contenção a Jusante
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
InSAR	<i>Synthetic Aperture Radar Interferometry</i>
MG	Minas Gerais
NA	Nível de Água
PAEBM	Plano de ação de emergência de barragens de mineração
PDE	Pilha de disposição de estéril
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RMR	<i>Rock mass ratio</i>
SciELO	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral.....	2
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Escavações a céu aberto.....	5
2.1.1	Métodos de lavra a seco.....	6
2.1.1.1	Lavra por bancadas (open pit).....	8
2.2	Barragens de rejeitos de mineração	11
2.2.1	Histórico de ocorrências de acidentes envolvendo barragens de rejeitos da mineração.....	17
2.3	Pilhas de Estéril (mine waste piles): estruturas geotécnicas de disposição de estéreis	25
2.3.1	Método construtivo de depósito de estéril em camadas	27
2.3.2	Método construtivo de Pilha por bancos ou ponta de aterro.....	28
2.4	Sistemas de sustentação das estruturas na mineração subterrânea .	29
2.5	Monitoramento (Ground Control)	34
2.5.1	Instrumentos de monitoramento geomecânico e estrutural	35
2.5.2	Instrumentação de escavações subterrâneas	39
2.5.3	Extensômetros (Strain gauges)	39
2.5.4	Medições de tensões in situ por overcoring.....	42
2.5.5	TDR – time domain reflectometer.....	44
2.5.6	Medidor de trincas (Crackmeter)	45
2.5.7	Scanner a laser 3D - LIDAR (Light Detection and Ranging).....	47

2.6 Instrumentação geotécnica e monitoramento de barragens de rejeitos e pilhas de estéril.....	51
2.6.1 Sismógrafos.....	52
2.6.2 Piezômetros.....	55
2.6.2.1 Piezômetro de corda vibrante.....	56
2.6.2.2 Piezômetro Casagrande ou Piezômetro de tubo aberto.....	58
3 METODOLOGIA.....	61
4 ESTUDOS DE CASO	62
4.1 Estudo de caso: risco de ruptura de talude da Mina de Gongo Soco .	62
4.2 Estudo de caso: Barragem de rejeitos B-I na mina de minério de Ferro do Córrego do Feijão. Brumadinho, Minas Gerais, Brasil.....	69
4.3 Estudo de caso: ruptura de um talude em uma pilha de deposição de estéril em uma mineradora	74
5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	78
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

Desde a pré-história, a mineração está atrelada ao desenvolvimento da civilização, com a criação de ferramentas e técnicas de extração e processamento de materiais para usos diversos. Esse desenvolvimento tecnológico permitiu à humanidade transformar seus hábitos de sobrevivência, impulsionou a inovação tecnológica, facilitou a construção de infraestruturas e o crescimento econômico.

A mineração continua sendo imprescindível ao progresso e desenvolvimento das civilizações e enfrenta desafios relacionados aos altos custos de produção, à necessidade de otimizar processos, além de questões ambientais e de segurança geotécnica das estruturas de mineração.

No que tange a este último aspecto, o monitoramento geotécnico tem se mostrado fundamental para que se possam garantir a estabilidade das estruturas de mineração, prevenir riscos geotécnicos e promover a segurança dos trabalhadores e das comunidades adjacentes.

De acordo com Dhawan et al. (2018) a instrumentação geotécnica fornece informações para auxiliar na avaliação da segurança de uma estrutura, coletando dados quantitativos sobre seu desempenho e detectando problemas em um estágio inicial e evitável.

Silva (2023) afirma que o progresso da instrumentação na engenharia geotécnica é notável, passando de uma função complementar para um setor altamente especializado e destaca que projetos de instrumentação ainda são limitados em áreas como infraestrutura, contrastando com o setor de mineração, que foi impulsionado por regulamentações rigorosas após acidentes graves.

1.1 Justificativa

O monitoramento geotécnico de estruturas de mineração é um tema em voga devido ao recente passado de incidentes ocorridos em empresas de médio e grande porte do setor, de reconhecimento nacional e internacional. Esses incidentes destacaram a necessidade de medidas preventivas rigorosas e de monitoramento

contínuo para garantir a segurança e a estabilidade das estruturas de mineração, como barragens de rejeitos, taludes e outras instalações críticas.

De acordo com Leão (2024) as inovações tecnológicas de instrumentação e monitoramento que surgiram nas últimas décadas não apenas aumentam a eficiência operacional, mas também melhoram os padrões de segurança e sustentabilidade na exploração de recursos minerais.

O monitoramento geotécnico contínuo, que substitui práticas tradicionais e menos tecnológicas de inspeção e monitoramento, é capaz de fornecer dados em tempo real por meio de sensores modernos, permitindo uma resposta imediata a qualquer sinal de perigo ou anomalia.

A legislação sobre o monitoramento foi significativamente reforçada para prevenir novos acidentes e inclui requisitos rigorosos para garantir a segurança das operações de mineração e a proteção do meio ambiente e das comunidades próximas. É crucial que as empresas estejam atualizadas com as mudanças legislativas e implementem as melhores práticas de monitoramento geotécnico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é demonstrar a importância da difusão dos instrumentos de monitoramento capazes de prever rupturas geotécnicas em maciço rochoso ou terrosos, bem como em estruturas de contenção de rejeitos ou disposição de estéreis. Com isso, busca-se ratificar a necessidade de monitoramento de taludes, estruturas de contenção de rejeitos, disposição de estéreis, e sistemas de suporte e reforço.

Busca-se compreender a eficácia dos instrumentos utilizados para prever rupturas geotécnicas e sua capacidade de indicar a necessidade de reforço nas

estruturas de contenção existentes, além de alertar as equipes geotécnicas responsáveis sobre o risco de acidentes.

1.2.2 **Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são os seguintes.

- Caracterizar os instrumentos de monitoramento de estruturas de mineração de acordo com suas funções e associá-los às características intrínsecas do ambiente a ser monitorado.
- Verificar qualitativamente a eficácia dos instrumentos em detectar falhas geotécnicas e fornecer informações relevantes para a segurança e estabilidade das estruturas geotécnicas, por meio de uma revisão histórica do monitoramento de estruturas que estão presentes nos empreendimentos mineiros, examinando estudos de caso e bibliografias relacionadas ao monitoramento.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esse trabalho está estruturado em 05 capítulos, distribuídos da forma seguinte.

- O capítulo 1 apresenta o tema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos que se espera alcançar por meio desse.
- O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os conceitos fundamentais para a compreensão do estudo, relacionados às estruturas comumente presentes em ambientes de mineração.
- O capítulo 3 apresenta a metodologia proposta nesse trabalho.
- O capítulo 4 apresenta estudos de caso.
- O capítulo 5 mostra a discussão e as conclusões obtidas por meio do estudo realizado e traz recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A segurança das estruturas geotécnicas é um aspecto crítico para o sucesso das operações, pois garante a proteção dos trabalhadores, a integridade das instalações e a minimização de impactos ambientais adversos.

Destaca-se a relevância crítica da instrumentação geotécnica para a segurança e eficiência das operações mineiras, enfocando sua aplicação em diferentes contextos, desde a lavra em cavas e galerias até o gerenciamento de barragens de rejeitos e pilhas de disposição de estéril. Ao explorar as técnicas disponíveis em instrumentação geotécnica, esta revisão bibliográfica visa fornecer uma compreensão abrangente dos desafios e oportunidades presentes no monitoramento e gestão de estruturas geotécnicas na indústria de mineração.

2.1 Escavações a céu aberto

Para Curi (2017), a lavra compreende o conjunto de operações unitárias de aproveitamento da jazida. Também chamada de exploração, trata-se da quarta etapa da mineração, sendo as três anteriores as seguintes: Prospecção mineral, exploração e desenvolvimento mineiro. Ainda segundo Curi, a escolha do método de lavra é definida a partir do conjunto de ciclos de trabalho e a sequência espacial da evolução da lavra, ou seja, é definido de acordo com o avanço da exploração dos recursos minerais.

A lavra a céu aberto trata-se de uma modalidade de mineração com ampla aplicação, sendo preferível em relação aos métodos de lavra subterrânea, sempre que possível utilizar ambos, devido às diversas vantagens que possui. Dentre as principais vantagens, destaca-se o menor custo operacional de lavra por não necessitar de investimentos em estruturas que são essenciais para as minas subterrâneas.

Também é importante atentar-se ao fato de que há uma maior produtividade, ou seja, a taxa de extração de minérios é superior quando comparada com a mineração subterrânea e, a vantagem mais evidente é presença da luz e ventilação

natural, que dispensa os gastos com equipamentos responsáveis por provê-las em subsuperfície.

O contraponto apresentado pelas escavações a céu aberto encontra-se no fato de que essas estão intimamente ligadas aos vultuosos volumes de material estéril removido e transportado. Esse material precisa ser disposto em locais pré-definidos que estejam próximos ao projeto da cava final feita pelo planejamento de mina. Também há que se possuir alta capacidade de investimento inicial de recursos financeiros para a aquisição dos equipamentos, normalmente de grande porte como por exemplo caminhões fora de estrada, tratores de pá carregadeira e escavadeiras *bucket wheels*.

A seguir apresentam-se os principais métodos de lavra a céu aberto, mais difundidos nas grandes e médias indústrias mineradoras, cujas definições propostas servirão de fundamentos para a compreensão do trabalho realizado.

2.1.1 Métodos de lavra a seco

Segundo Curi (2017), os métodos a seco são os métodos que mais se destacam. São caracterizadas por utilizar em suas operações unitárias equipamentos convencionais em que o uso de água não é fundamental.

Como menciona o autor, estima-se que esses métodos sejam responsáveis por mais de 90% do volume de produção das lavras a céu aberto em todo o mundo. De modo geral, os métodos de lavra por bancadas e por tiras ocupam, juntos, o primeiro lugar entre os mais importantes métodos de lavra a céu aberto e estão entre os sete mais importantes métodos de lavras de toda a mineração.

A metodologia emprega um ciclo convencional de operações para lavar o minério, sendo sequenciadas as etapas de perfuração, desmonte, carregamento e transporte.

A lavra por bancadas e a lavra por tiras apresentam os menores custos operacionais por tonelada dentre todos os métodos usuais de lavra. Possuem uma

progressão dinâmica de atividades de lavra devido seu modo de desenvolvimento simples.

A estabilidade de taludes é uma das grandes preocupações dos geotécnicos responsáveis por cavas a céu aberto. A geologia estrutural da rocha em que o talude é escavado é determinante para estabelecer possíveis zonas de fraqueza na rocha. Fraturas, juntas e falhas, geralmente denominadas descontinuidades devem ser monitoradas ininterruptamente pois reduzem a resistência do maciço, de modo que rupturas tendem a ocorrer preferencialmente ao longo delas, como ocorrido na mina Bing Canyon em 2013, apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Ruptura em taludes na mina a céu aberto Bingham Canyon Mine, nos EUA



Fonte: Kennecott Utah (2013)

Nesse trabalho atenta-se somente ao método de lavra por bancadas, já que a metodologia de lavra é similar à da lavra por tiras, exceto por um único e crucial

aspecto segundo Lobo (2023): o estéril não é transportado para ser depositado em pilhas, mas sim lançado diretamente em áreas adjacentes já lavradas.

2.1.1.1 Lavra por bancadas (*open pit*)

Como explica Curi (2017) nesse método o capeamento é removido, transportado e estocado próximo das escavações, objetivando a exposição do minério que se encontra sob esse material estéril.

Há uma proporcionalidade direta na lavra por bancadas, ou seja, quanto mais espesso e profundo for o depósito mineral, maior será a necessidade de desenvolver a quantidade de bancos a fim de que se obtenham operações unitárias seguras.

Para isso é necessário que uma série de requisitos sejam obedecidos. Exige-se que a geometria das bancadas seja estabelecida de modo que as bancadas consecutivas sejam desenvolvidas com um raio menor que a imediatamente anterior e que as larguras dos bancos sejam suficientes para o ciclo de lavra, ou seja, que os diferentes equipamentos empregados consigam acessar o material a ser desmontado, tanto para desmontes com explosivos ou desmonte mecânico, carregamento e transporte para as etapas posteriores a esse ciclo.

Curi (2017) cita que a lavra a céu aberto pode ser aplicada tanto em depósitos localizados em encostas quanto abaixo do nível do terreno, e ainda faz um balanço entre as vantagens e desvantagens da escolha por um dos dois métodos. Na primeira opção, lavra em encostas, há vantagens no fato de que a remoção de minério e estéril é realizada descendentemente, reduzindo o custo de transporte, além de facilitar a drenagem da mina, por gravidade, o que não é a realidade das minas em cava, nas quais o material desmontado é retirado por meio de rampas ascendentes para fora da cava e necessitam bombeamento da água para não haver inundações que prejudiquem a produtividade.

Curi (2017) demonstra a importância desse método no Brasil ao citar que a lavra por bancadas é usada em todas as minas nacionais de minério de ferro de classe mundial com produção anual acima de um milhão de toneladas.

A Figura 2 apresenta uma vista geral de uma cava do complexo Carajás, no Pará, executada pela modalidade lavra por bancadas em encostas sendo um exemplo de lavra a céu aberto.

Figura 2 - Lavra por bancadas na mina de minério de ferro de Carajás (PA), com destaque para os taludes em processo de revegetação



Fonte: Curi (2017)

Um requisito fundamental deve estar sempre em vista para que o sequenciamento de lavra ocorra. As bancadas devem ser desenvolvidas com ângulos mais verticais possíveis, para minimizar a relação entre estéril e minério e para que, conseqüentemente, ocorra a maximização do ganho com a lavra.

Hartman e Mutmansky (2002) apresentam a Tabela 1 com as dimensões usualmente adotadas na lavra de bancadas nas minas a céu aberto.

Tabela 1 - Dimensões usuais dos bancos em lavras a céu aberto de acordo com os tipos de minério.

Minério	Altura (m)	Largura (m)	Ângulo da Face do Talude (°)
Cobre	12-18	24-38	50-60
Ferro	9-14	18-30	60-70
<i>Não Metálicos</i>	<i>12-30</i>	<i>18-45</i>	<i>50-60</i>
<i>Carvão</i>	<i>15-23</i>	<i>15-30</i>	<i>60-70</i>

Fonte: Hartman e Mutmansky (2002)

As principais características que normalmente devem estar presentes para que o método de lavra de bancadas seja aplicado, e desenvolvido, para a extração de minérios de um depósito de maneira economicamente viável são:

- local próximo para depósito do capeamento, para posterior reabilitação após a conclusão das atividades de extração, etapa chamada de fechamento de mina;
- capeamento pouco espesso;
- depósitos em profundidades razoáveis;
- cavas não muito profundas;
- produção de grande escala;
- depósitos amplos e espessos, mas com baixo ângulo de mergulho;
- mineralização uniforme;
- mecanização dos equipamentos;
- utilização de equipamentos de grande porte;
- distância média de transporte (DMT) relativamente curta;
- local para disposição de estéril e rejeito;
- pilhas de estéril, oficinas, escritórios, pátios de estocagem de minério, instalações de beneficiamento e demais estruturas auxiliares próximas da cava final projetada.

2.2 Barragens de rejeitos de mineração

Barragens são consideradas a forma convencional de contenção de rejeitos e entre os métodos construtivos tem-se o tipo a montante, o menos seguro em comparação com métodos mais modernos. Este tradicional método foi proibido pela lei nº 14.066/2020, no Artigo 2º-A, e foi também determinada a responsabilidade do empreendedor de descaracterizar as barragens desse tipo até a data de 25 de fevereiro de 2022, conforme estipulado no Parágrafo 1º do mesmo Artigo 2º-A, como já ocorreu com a barragem 8B, em Nova Lima, Minas Gerais, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Antes e depois da descaracterização da barragem 8B, em Nova Lima, região metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais.



Fonte: Vale S.A. (2022)

É importante compreender sobre todos os métodos construtivos de barragens, a fim de garantir a adoção das práticas mais seguras e adequadas para o armazenamento de rejeitos e a proteção do meio ambiente e das comunidades circunvizinhas.

Sabe-se que é permitida a prorrogação do prazo para eliminar as características de barragem se for tecnicamente inviável fazê-lo dentro do período estabelecido, conforme o Parágrafo 3º do Artigo 2º-A da Lei nº 12.334/2010. Portanto, enquanto ainda existirem barragens a montante e todos os outros tipos de métodos construtivos no Brasil, é crucial manter o monitoramento constante de seus comportamentos, a fim de garantir a segurança dessas estruturas.

Após a ruptura da Barragem do Fundão em 5 de novembro de 2015, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) (2016) trouxe em um breve histórico sobre a

Geração e Disposição de Rejeitos de Mineração, a referência histórica da Revolução Industrial como um dos precursores do aumento de demanda de insumos minerais no mundo e que acarretou o aumento da geração de rejeitos e na necessidade de removê-los das áreas de produção.

O desenvolvimento tecnológico que se seguiu à Revolução aumentou a capacidade de minerar substâncias com baixo teor mineral, resultando na produção ainda maior de rejeitos.

No Brasil, a prática de se lançar os materiais removidos era realizada pelos próprios equipamentos de lavra de maneira simplificada, em que o estéril da mina era lançado transversalmente aos vales, formando aterros que serviam de estruturas de contenção dos rejeitos do beneficiamento.

No entanto, foi somente a partir do século XX que as indústrias substituíram o modo como esses rejeitos eram dispostos, passando a construir barragens para a contenção desses materiais estéreis.

Atualmente, após as rupturas ocorridas em Mariana e Brumadinho, ambas em Minas Gerais, e a grande repercussão desses desastres, é unânime entre todas as esferas da sociedade a importância de investir na gestão de rejeitos para garantir a sustentabilidade das operações mineiras e a segurança desse tipo de estrutura. Além disso, também está evidenciada a necessidade de regulamentação constante das leis e normas que dissertam sobre a questão, devido ao intenso dinamismo observado nessa área da mineração.

Sobre a regulamentação o documento do IBRAM cita que:

A partir do século XX, diversos dispositivos legais em vários países passaram a regulamentar diferentes aspectos da gestão e do manejo de rejeitos de mineração, num processo paulatino de aperfeiçoamento, baseado principalmente em experiências adquiridas e eventos reais, num contexto do que usualmente se denomina como “lições aprendidas”.

No Brasil merece destaque a conexão que se formou, em termos de regulamentação, entre a Lei nº 12.305, datada de 2 de agosto de 2010, que introduziu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), e as disposições da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que definiu a Política Nacional de Segurança de

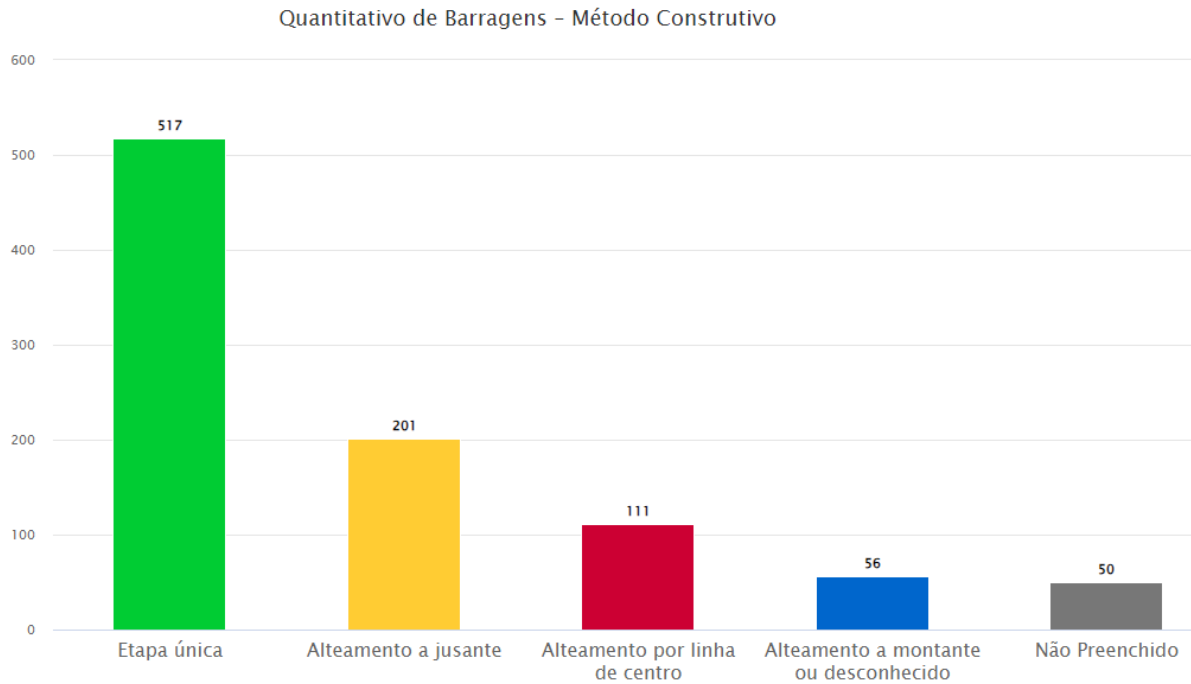
Barragens (PNSB) e estabeleceu o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

A Agência Nacional de Mineração (ANM, s.d.), que substituiu o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), define as barragens de mineração como sendo estruturas projetadas para a contenção e acumulação de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos, chamado de poupa, provenientes dos processos para beneficiamento de minérios. São comumente construídas com aterro ou com os próprios rejeitos produzidos pelas atividades das minas e podem ser erguidas utilizando quatro métodos construtivos: etapa única, alteada a jusante, alteada por linha de centro ou alteada a montante.

A ANM é o órgão nacional responsável por cadastrar e classificar as barragens de acordo com os riscos referentes à sua operação e à sua capacidade de causar danos ambientais e socioeconômicos, fiscalizar a gestão da segurança das barragens de mineração em todo o país, elaborar normas relativas à segurança deste tipo de estruturas e assegurar que os empreendedores que possuam barragens de mineração cumpram rigorosamente a legislação federal de segurança e suas normas complementares. Dados cadastrados na Agência dão conta que há um total de 934 barragens no Brasil.

A Figura 4 discrimina as barragens brasileiras pelo método construtivo adotado.

Figura 4 - Quantitativo de Barragens – Método Construtivo adotado.



Fonte: ANM (2024)

A Lei nº 12.334/2010, que trata da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), abrange barragens com características como as apresentadas nos incisos:

I - altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15 (quinze) metros;

II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³ (três milhões de metros cúbicos);

IV - categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 7º desta Lei;

V - categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador, conforme definido no art. 7º desta Lei.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) criou uma Norma técnica brasileira (NBR) para padronizar, organizar e qualificar a elaboração e apresentação de projeto de barragens de mineração.

Trata-se da NBR 13028/2017, que tem por objetivo especificar os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens de mineração, incluindo as barragens para disposição de rejeitos de beneficiamento, contenção de sedimentos gerados por erosão e reservação de água em mineração, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente.

Essa norma define barragens para disposição de rejeitos como sendo as estruturas utilizadas para reter, de forma planejada, projetada e controlada, volumes de rejeitos advindos do processo de beneficiamento de minério. Além disso ela traz uma série de requisitos legais para a elaboração e apresentação do projeto como informações básicas de identificação do empreendedor, localização do empreendimento, o tipo, finalidade e vida útil operacional da barragem em questão.

A NBR também salienta o dever das empresas de conduzir estudos tecnológicos para avaliar as disposições de rejeitos, caracterizar físico e quimicamente esses resíduos, bem como analisar suas propriedades geotécnicas e de sedimentação. A Comissão de Estudo Especial de Elaboração de projetos para Disposição de Rejeitos e Estéreis em Mineração ainda propõe que estudos locais do eixo da estrutura sejam realizados tendo em vista variáveis de engenharia e ambientais, justificando a escolha feita para o projeto por meio de características geomorfológicas, geológicas e geotécnicas, hidrometeorológicas, ambientais, dos volumes e das áreas dos reservatórios, em uma avaliação comparativa entre as alternativas consideradas.

Um dos métodos de barramento mais utilizados na atividade minerária por ter menores custos de construção e manutenção, tem como princípio o alteamento da estrutura sobre o próprio rejeito proveniente do beneficiamento dos minérios, ou seja, o aumento do volume de material disposto por meio da ampliação da capacidade de armazenamento. Segundo Soares (2010), neste caso, o eixo da obra se desloca para

montante e há o aproveitamento dos rejeitos depositados como parte da estrutura de contenção.

O método construtivo a jusante de barragens, também chamado de método da linha de jusante, essa técnica se caracteriza por ter a linha do centro, ou seja, o eixo da barragem, se deslocando a jusante durante os processos de alteamento, conforme explica Soares (2010).

Soares (2010) ainda enumera as seguintes vantagens ao se lançar mão desse procedimento comparando-o com os demais métodos construtivos de barragens de rejeito:

- maior segurança por alteamento controlado;
- menor probabilidade de *piping* e de rupturas horizontais, em consequência da maior resistência ao cisalhamento;
- maior resistência a vibrações provocadas por sismos naturais e vibrações em razão do emprego de explosivos nas frentes de lavra;
- instalação de sistema de drenagem e impermeabilização, à medida que se processa o alteamento.

Soares (2010) ainda destaca que o método apresenta desvantagens como custo relativo mais elevado, maior volume de material a ser movimentado e compactado e menor velocidade de alteamento da barragem justificados pelas características geométricas da estrutura de barramento.

Existe ainda o método de linha de centro. Segundo Soares (2010), nada mais é que um método intermediário entre os métodos a montante e jusante, tem esse nome pois o eixo da crista do dique inicial e dos diques provenientes dos alteamentos são coincidentes.

2.2.1 Histórico de ocorrências de acidentes envolvendo barragens de rejeitos da mineração

Como explica Soares (2010) concomitantemente ao aumento das dimensões impostas às barragens de contenção de rejeitos devido ao crescente aumento de exploração de minérios, os vários acidentes e incidentes envolvendo esse tipo de estrutura despertaram a atenção da comunidade tecno-científica e de autoridades governamentais sobre a questão da segurança dessas obras.

A disposição de rejeitos de mineração em barragens, é responsável por sérios problemas sociais e ambientais. Entre os anos de 1990 e 2010, ocorreram 33 acidentes considerados graves ou muito graves no mundo. Segundo a *Bowker Associates Science & Research In The Public Interest* (2015), entre 1955 e 1965 os vazamentos de rejeitos de barragem totalizaram 6 milhões de m³. Já entre 2005 e 2015 foram 107 milhões de m³.

Ao realizar um levantamento de dados dos acidentes ocorridos, Soares (2010) expõe algumas das causas e contabiliza quais foram os danos provocados pelas rupturas, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Exemplos de rupturas de barragens de contenção de rejeitos.

Ano	Mina/Local	Causas da Ruptura	Danos Provocados
1965	El Cobre - Chile	Terremoto/liquefação	210 vítimas, soterramento do povoado.
1970	Mufaline Mine/África	Não definida	89 vítimas – 453.000 m ³ de rejeitos saturados.
1972	Buffalo Creek/West - Virginia	Não definida	110 mortos, 1.100 feridos, 1.500 casas destruídas – 595.000 m ³ de lama.
1974	Impala Platinum África do Sul	Entubamento (<i>piping</i>)	12 vítimas, 3 milhões m ³ de lama fluíram por 45 km, destruindo estradas, pontes e soterrando reservatório de água potável.
1985	Prealpi/Trento - Itália	Material de construção	Liberação de 200.000 m ³ de rejeitos. 268 vítimas.
1985	Cerro Negro/Chile	Sismo induzido e liquefação	Lama dos rejeitos fluiu até 85 km a jusante.
1985	Pico S.Luiz/Minas Gerais	Solapamento do pé do aterro e entubamento	Lama fluiu até 10 km a jusante. Pontes e estrada de ferro.
1986	Fernandinho/Itaminas - MG	Liquefação	4 vítimas. Destruição de laboratórios e equipamentos.
1996	Mina do Porco/Bolívia	Entubamento (<i>piping</i>)	3 vítimas – Fazendas, gado, flora e fauna; 300 km de rio contaminados.

Fonte: Soares (2010)

Ainda segundo o autor registra-se que entre 1970 e 1998 ocorreram 25 grandes acidentes com barragens de contenção de rejeitos, sendo que a maioria teve como condicionantes ou gatilhos geológicos e geotécnicos, como sismos, rupturas na fundação (incluindo *piping* e liquefação).

Arnez (1999) analisou 45 acidentes de barragens de rejeito sendo que mais de 70% desses foram ocasionados por liquefação ou *piping*, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Principais causas de acidentes em barragens de rejeitos.

Causas	Número de Acidentes	Frequência Relativa (%)
Liquefação	21	46,7
Entubamento	11	24,4
Não definida	13	28,9
TOTAL	45	100,0

Fonte: Arnez (1999)

Após as rupturas das barragens de Fundão, em Mariana/MG, e Córrego do Feijão, em Brumadinho/MG, ambas construídas pelo método a montante, ocorridos

em 2015 e 2019, respectivamente, intensificou-se tanto o monitoramento quanto a pesquisa por novas tecnologias capazes de prever possíveis gatilhos que poderiam ocasionar rupturas no maciço dessas estruturas de contenção, além do processo de descomissionamento de várias barragens de rejeitos.

Instrumentos como piezômetros, indicadores de nível d'água, inclinômetros, sismógrafos, células de carga entre outros estão sendo mais frequentemente empregados nas estruturas de contenção presentes nas áreas de mineração.

Filho (2021) conclui que essas tragédias de Fundão e Feijão em 2015 e 2019 respectivamente, somadas à iminência de ruptura de outras barragens e a insuficiência de instrumentos geotécnicos mostram que existe uma necessidade de revisão dos métodos de construção e monitoramento de barragens de rejeito.

A Lei nº 12.334/2010 estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) em que se destacam os seguintes objetivos dispostos nos incisos:

I - garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a fomentar a prevenção e a reduzir a possibilidade de acidente ou desastre e suas consequências;

II - regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação, descaracterização e usos futuros de barragens;

III - promover o monitoramento e o acompanhamento das ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens;

VII - fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

A ANM, por meio do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), reúne informações e disponibiliza ao público o acesso ao Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, que pode consultar a classificação atualizada das barragens de mineração do Brasil em tempo real e suas estatísticas, a localização das estruturas na forma de mapas interativos, visando maior transparência e interação com os dados de segurança de barragens de mineração da ANM, como mostra a Figura 5. As informações disponibilizadas são atualizadas em tempo real para toda a sociedade.

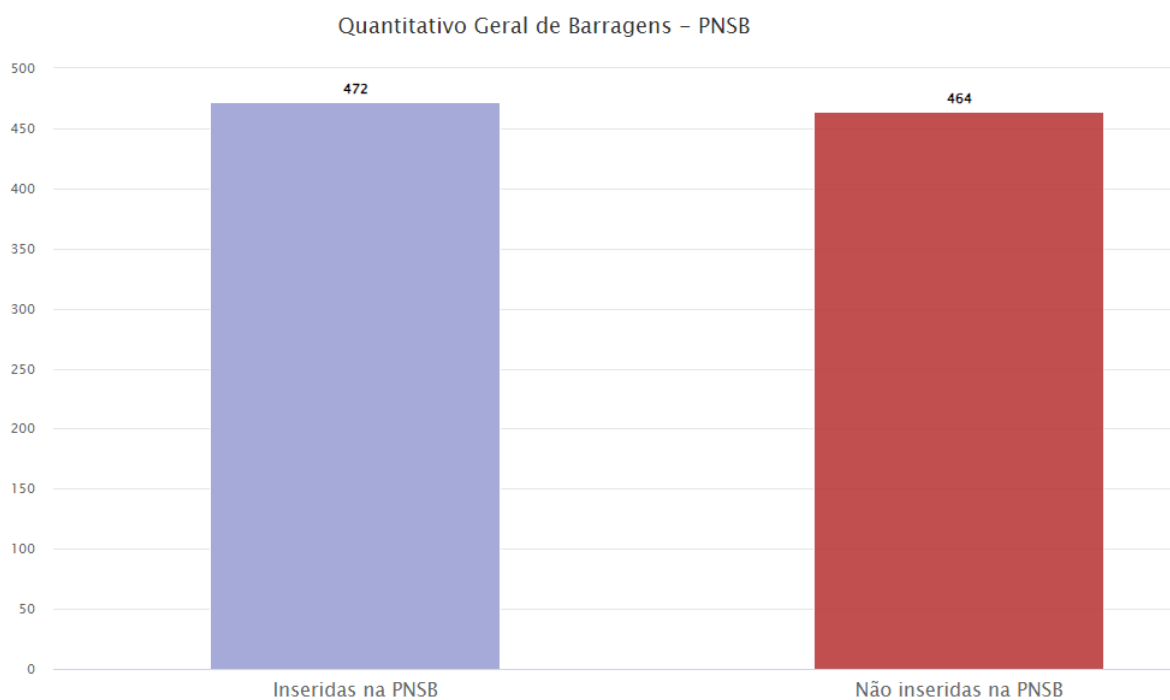
Figura 5 - Portal do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração.



Fonte: Portal SIGBM (2023)

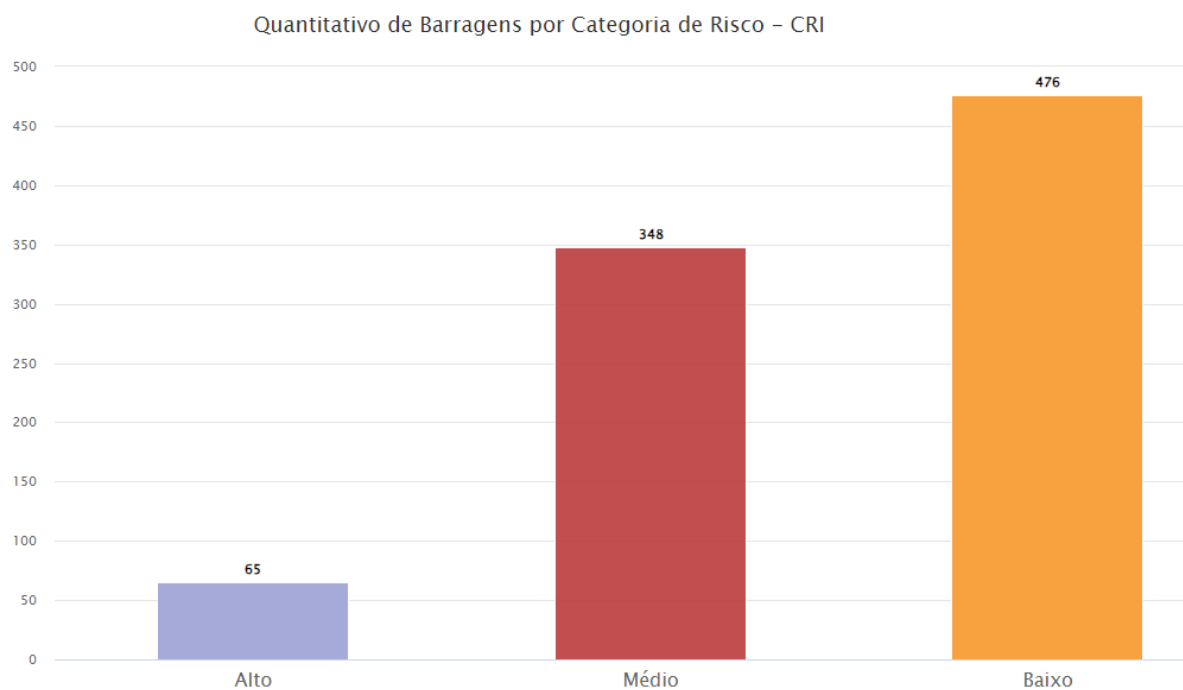
Além disso o sistema, que tem por objetivo gerenciar as barragens de mineração no território nacional, contempla módulos para os empreendedores, auditores, fiscais da ANM. O sistema, conforme expõe o Instituto Minere (2018), visa dar maior celeridade, homogeneidade e padronização nos procedimentos fiscalizatórios e gerencias das barragens de mineração em construção, operação ou desativas em todo o território nacional, sempre vislumbrando o aumento da segurança destas estruturas. Apresentam-se nas Figuras 6, 7 e 8, dados atualmente disponíveis para conhecimento de todos os interessados, como o CRI (Categoria de Risco) e DPA (Dano Potencial Associado), obtidos por meio do SIGBM.

Figura 6 - Quantitativo Geral de Barragens – PNSB.



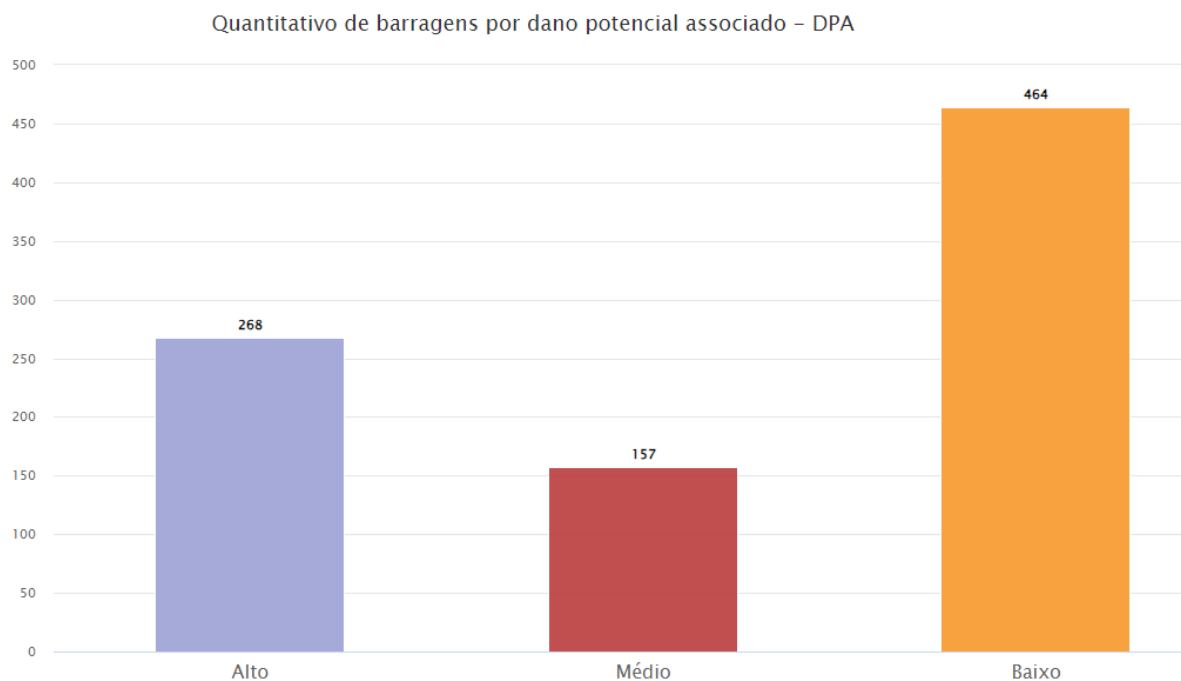
Fonte: ANM (2024)

Figura 7 - Quantitativo de Barragens por Categoria de Risco – CRI.



Fonte: ANM (2024)

Figura 8 - Quantitativo de barragens por dano potencial associado – DPA.



Fonte: ANM (2024)

A partir dos dados, é possível extrair a informação de que 50,43% das barragens estavam inseridas no PNSB e necessitavam do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). Dentre essas barragens que necessitavam do PAEBM, mais de 45% estavam nas categorias de risco alto ou médio.

Além disso, 418 das 456 barragens no PNSB possuíam DPA médio ou alto, que é o dano que pode ocorrer devido a ruptura, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

É importante destacar que ao se comparar os dados em duas datas, 25/08/2023 e 02/04/2024, um intervalo de 221 dias, nota-se a inclusão de 16 barragens cadastradas no PNSB, 433 barragens novas barragens classificadas no CRI e no DPA.

Em notícia vinculada no dia 31/01/2019, no portal de G1 por Trevizan (2019), é citado uma lista divulgada pela ANM, informando que das 717 barragens de rejeitos

de mineração presentes no Brasil, cerca de 88 delas utilizavam o método de construção a montante ou desconhecidas, e entre elas, pelo menos 43 eram classificadas como barragens de alto dano potencial associado.

Segundo Soares (2010) a instrumentação geotécnica montada nos maciços das barragens de rejeito e em suas fundações tem por fim a segurança estrutural. O uso da instrumentação para avaliar o comportamento de barragens de contenção de rejeitos deve ser norteado segundo as três fases principais destas obras: Implantação, operação e desativação.

A instrumentação durante o período construtivo tem como premissas:

- alertar sobre a ocorrência de eventuais anomalias no comportamento da barragem ou de situações que possam favorecer o surgimento de aspectos não compatíveis com o comportamento esperado do projeto;
- possibilitar revisões do projeto, adotando soluções menos conservadoras na fase construtiva, com economia ao projeto.

No período operacional, com o enchimento do reservatório, buscam-se, com a instrumentação, as informações essenciais à operação, tais como:

- verificar a ocorrência de eventuais anomalias que possam colocar em risco as estruturas do barramento;
- avaliar o desempenho estrutural das obras, segundo comparações entre as medidas in situ e aquelas obtidas por meio de modelos matemáticos exclusivamente teóricos;
- verificar a conformidade dos critérios de projeto utilizados;
- avaliar o desempenho geral da barragem, conforme previsto no projeto da mesma;
- caracterizar o comportamento dos materiais de fundação e da barragem com o desenvolvimento da obra, objetivando averiguar o tempo necessário para que ocorra a estabilização dos deslocamentos, tensões internas, estabilização das vazões.

Soares (2010) cita que todos os projetos de barragens de contenção de rejeitos devem prever algum tipo de instrumentação que permita avaliar permanentemente a

sua segurança em qualquer estágio de desenvolvimento. Deve-se ainda alertar que a grande maioria das rupturas de barragens ocorrem naquelas de pequena dimensão, tornando-se fundamental o acompanhamento sistemático destas obras.

Machado (2007) propõe que os custos de um programa de auscultação e instrumentação devem ser avaliados em detalhe, pois se sabe que em obras de engenharia custos elevados podem ser fatores restritivos à utilização de tecnologia mais avançada. Por isso o projeto de instrumentação deve ser concebido com justificativas claras e objetivas da sua necessidade de utilização. O custo de um instrumento é extremamente pequeno se comparado ao custo de sua instalação.

O Simpósio sobre Instrumentação de Barragens (1996) considera custos da ordem de 1 a 3% nos programas de instrumentação contabilizando neste cálculo custos relativos com o projeto, aquisição dos instrumentos, instalação, operação, processamento e análise dos dados obtidos.

O custo de aquisição dos instrumentos representa geralmente entre 10 a 30% do custo da instrumentação de uma barragem. Os custos envolvendo operação e análise de dados são custos variáveis ao longo do tempo de operação considerado. Este custo é lançado na contabilidade do empreendimento desde a instalação do instrumento, passando pelo início da operação e prolongando-se até a finalização do empreendimento.

O custo de instalação está associado ao número de instrumentos projetados. No caso de instrumentos que utilizam furos de sondagens este custo é relativamente superior devido ao custo de execução destas sondagens que é representativo em relação ao custo total da instrumentação. Adicionado ao custo de sondagem, acrescentam-se os custos de instalação e montagem dos instrumentos, as injeções de materiais ao longo do furo e os homens/hora gastos em todas essas atividades.

Demais custos, operação, manutenção e novas aquisições, são diluídos no custo operacional do empreendimento. Os custos relativos a cada uma das fases são reunidos e apresentados na Tabela 4, por Machado (2007).

Tabela 4 - Custo relativo de cada fase da auscultação.

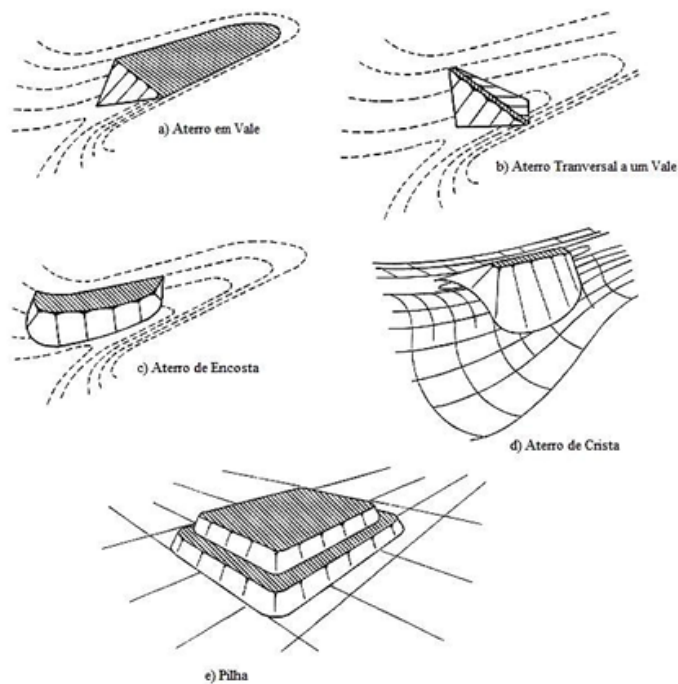
FASE	CUSTO (%)
Aquisição do instrumento	10
Instalação	20
Aquisição de dados	20
Análise	50
TOTAL	100

Fonte: Machado (2007)

2.3 Pilhas de Estéril (*mine waste piles*): estruturas geotécnicas de disposição de estéreis

O descarte de estéreis em pilhas é uma prática comum durante a extração de minério, sendo sua disposição determinada pela disponibilidade de áreas próximas ao empreendimento. Atualmente, além das preocupações ambientais, questões sociais e de segurança estão sendo cada vez mais consideradas, tornando o processo mais rigoroso. A Figura 9 ilustra a geometria dos tipos de pilhas de estéril.

Figura 9 - Os tipos de pilha de estéril.



Fonte: modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee. (1991)

No Brasil, o planejamento e o projeto das pilhas estão sujeitos a aprovações de órgãos ambientais e reguladores, apesar da falta de exigências significativas no processo de investigação e projeto. A norma ABNT NBR 13029 (2006), revisada em 2017, estabelece requisitos mínimos para a elaboração de projetos de disposição de estéril.

O aumento de acidentes associados a essas estruturas e a crescente conscientização ambiental levantam preocupações tanto em relação à segurança pública quanto às possíveis consequências ambientais das pilhas de estéreis.

Segundo Couzens (1985) realizar estudos e acompanhar a construção de pilhas de estéril é crucial para evitar problemas técnicos e econômicos em empreendimentos mineiros.

De acordo com Eaton et al. (2005) geralmente para o planejamento de uma pilha, são utilizados os dados obtidos na fase de exploração de uma mina. Segundo Welsh (1985), a fase de pré-viabilidade compreende a aquisição de informações específicas sobre locais prováveis para a disposição de estéril, incluindo dados sobre geologia, topografia, vegetação, hidrologia, clima e informações arqueológicas.

São determinados também dados básicos sobre a disposição do estéril, como quantidade, tipo de material, origem e métodos propostos para manejo e disposição. Essa abordagem proativa pode prevenir complicações no empreendimento mineiro.

De acordo com Aragão (2008) as últimas fases do planejamento incluem a viabilidade e o projeto preliminar. Na fase de viabilidade, são conduzidos estudos para o projeto preliminar, abordando questões específicas submetidas ao órgão ambiental.

O projeto preliminar deve conter informações detalhadas, como planos para a disposição de estéril, avaliações ambientais, estratégias de mitigação de impactos e parâmetros de projeto para avaliação pelos órgãos competentes.

Na fase de desenvolvimento do projeto executivo, são delineadas todas as características da pilha, incluindo geometria, drenagem, proteção das bermas e acabamento paisagístico (ABNT, 2006). A análise da estabilidade da pilha, baseada em dados dos estudos preliminares, é crucial, considerando diversas situações e condições hidrogeológicas.

A construção da pilha de estéril, feita de forma ordenada, deve compreender pontos básicos. São eles:

- preparação da fundação;
- controle de água superficial;
- método construtivo;
- modo de operação;
- aderência do projeto e da execução;
- e a revisão do projeto caso necessário, já que a estrutura apresenta respostas aos esforços que estão presentes e são monitorados.

Como proposto pelo BC *Mine Waste Rock Pile Research Committee* (1991) as pilhas são avaliadas de acordo com os principais fatores considerados como possíveis gatilhos de ruptura, ou seja, que influenciam no seu potencial de estabilidade e que são os seguintes:

- configuração da pilha;
- inclinação do talude de fundação e grau de confinamento;
- tipo de fundação;
- qualidade do material da pilha;
- método de construção;
- condições piezométricas e climáticas;
- taxa de disposição;
- sismicidade.

A seguir apresentam-se alguns dos principais métodos construtivos de pilhas de estéreis da mineração, com suas características construtivas.

2.3.1 Método construtivo de depósito de estéril em camadas

Nunes (2014) cita que o método construtivo de depósito de estéril em camadas se dá com a utilização de caminhão para o transporte de estéril e consiste na descarga do material por basculamento na plataforma aberta, formando pequenas

pilhas de forma cônica como mostrado na Figura 10, na qual também se destaca o tapete drenante e o enrocamento de pé, exigidos pela NBR 13029 (ABNT, 2006).

Figura 10 - Visão esquemática dos basculamentos consecutivos na disposição de estéréis em camadas.



Fonte: Nunes (2014)

A metodologia adotada após o basculamento consiste em um nivelamento do material formando uma camada de espessura uniforme, criando uma nova área, denominada praça, para disposições futuras. O processo se repete até a altura final da pilha. A espessura das camadas depende do porte do equipamento nivelador.

2.3.2 Método construtivo de Pilha por bancos ou ponta de aterro

O método construtivo por bancos ou ponta de aterro com a utilização de caminhão para transporte de estéril consiste em bascular o material na ponta da plataforma de trabalho, local denominado como crista, como mostra a Figura 11. O avanço do aterro se dá pela sequência de basculamento e o ângulo do talude onde se deposita o estéril é o ângulo de repouso do material.

Figura 11 - Desenho esquemático da disposição de pilhas por banco ou em ponta de aterro.



Fonte: Nunes (2014)

2.4 Sistemas de sustentação das estruturas na mineração subterrânea

Segundo Brady & Brown (2006), o termo suporte é amplamente usado para descrever os procedimentos e materiais usados para melhorar a estabilidade e manter a capacidade de transporte de carga das rochas perto dos limites das escavações subterrâneas. O objetivo primário da prática de sustentação é mobilizar e conservar a força inerente do maciço rochoso para que ela se torne auto suportável.

Brady & Brown (2006) distinguem os termos suporte e reforço assim: o suporte é a aplicação de uma força reativa para a superfície de uma escavação e inclui técnicas e dispositivos como madeira, aterro, concreto projetado, tela e conjuntos de aço ou concreto ou outros revestimentos. Reforço, por outro lado, é um meio de conservar ou melhorar as propriedades gerais do maciço rochoso e do seu interior por meio de técnicas como parafusos e cabeamento (*Cable Bolt*), e injeção, congelamento ou drenagem, completa Silva (2023).

Ainda segundo os autores era costume descrever o suporte como temporário ou permanente. O suporte temporário era aquele instalado para garantir condições de trabalho seguras durante a mineração. Durante séculos, esse suporte consistia em algum tipo de estrutura de madeira. Se a escavação precisasse permanecer aberta por um período prolongado, o suporte permanente era instalado posteriormente.

Muitas vezes, o suporte temporário era parcial ou totalmente removido para permitir a instalação do suporte permanente.

Por fim conceituam também a classificação do suporte como ativo ou passivo.

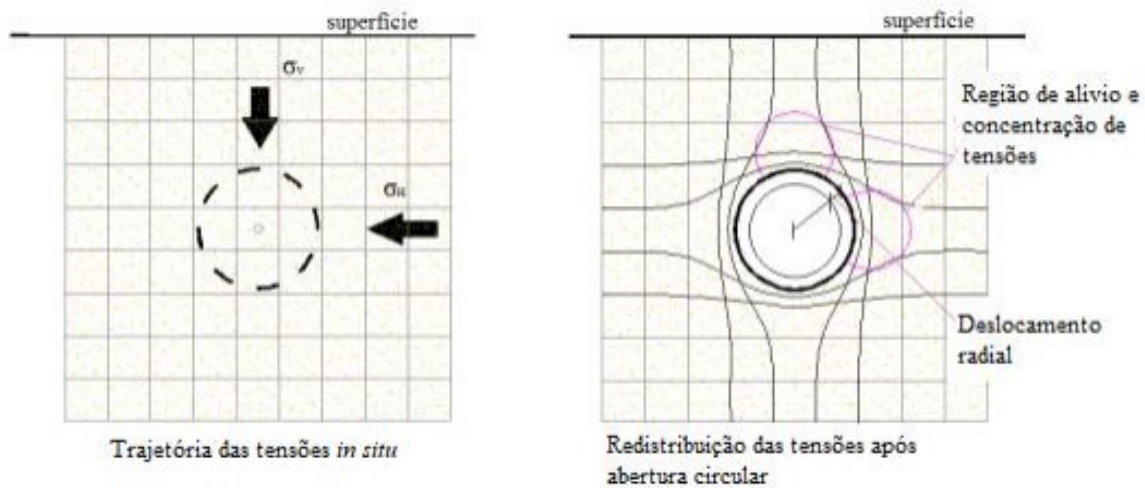
Quando classificado como ativo, descrito como tirante, no caso das ancoragens, impõe uma carga predeterminada à superfície da rocha no momento da instalação e tem sua aplicabilidade condicionada geralmente a necessidade de sustentar as cargas gravitacionais impostas por blocos de rocha individuais ou por uma zona afrouxada de rocha.

Em contrapartida o suporte passivo não é instalado com uma carga aplicada, mas sim desenvolve suas cargas à medida que o maciço rochoso se deforma. Tais parafusos, no caso das ancoragens, são denominados cavilhas. Pode ser fornecido por arcos de aço, conjuntos de madeira ou estruturas compostas, por chumbadores de rocha, barras de reforço ou cabos injetados sem tensão que são frequentemente descritos como "*dowels*" (pinos de reforço).

De acordo com Hoek (1995) há duas escalas que comprometem a estabilidade. A primeira, denominada escala da mina, envolve todo o corpo, infraestrutura da mina e maciço rochoso circundante. Já a segunda, escala local, se limita às rochas nas proximidades das aberturas subterrâneas. Essa, em geral, é a principal preocupação no projeto de suporte.

Ao realizar uma escavação subterrânea, as tensões existentes no maciço são redistribuídas em torno da abertura. Uma forma de representar esses esforços é por meio de linhas imaginárias em torno do corpo solicitado, como representado na Figura 12, que mostra o comportamento das tensões verticais e horizontais antes e após a abertura de uma escavação circular subterrânea, respectivamente. Esta redistribuição causa concentração e alívio de pressão em torno da abertura, podendo provocar um colapso da mina. (Hoek & Brown, 1997).

Figura 12 - Redistribuição das tensões in situ e deslocamento radial associado.



Fonte: Gontijo (2017)

Silva (2022) cita que as escavações podem não necessitar de suporte artificial (escavações autosuportantes) ou precisar de sistemas como concreto projetado (*shotcrete*), arcos (cambotas), tirantes, malhas de aço, concreto reforçado com fibras de aço, enfilagens, injeções. Conforme cita Silva (2023), costuma-se classificar as estruturas de sustentação em:

- suportes descontínuos- esteios, arcos ou “cambotas”, quadros, pilares naturais ou artificiais, fogueiras e suportes hidráulicos automarchantes;
- suportes contínuos ou revestimentos- telas, concreto projetado (*shotcrete*), *straps* e selantes (TSLs);
- reforço ou tratamento do maciço - ancoragens, injeções, congelamento de terreno, enfilagens e outros.

Gontijo (2017) reitera que caso as características geomecânicas do maciço não forem suficientes para recuperar o equilíbrio e estabilizar a escavação, é necessário aplicação de uma pressão interna na abertura por meio de um sistema de sustentação.

O processo do uso de concreto projetado consiste em lançar o material sob alta pressão contra as paredes do túnel ou galeria. O impacto do concreto contra a base promove sua compactação, resultando em um revestimento de alta resistência. O *shotcrete* é muito usado no revestimento de túneis, poços, galerias, reservatórios,

recuperação de estruturas de alvenaria, combinado com telas, ancoragens, vigas treliçadas. Uma vantagem do concreto projetado, quando se incluem fibras de aço, principalmente em rochas, é de permitir acompanhar irregularidades da superfície escavada, mantendo a espessura especificada em projeto.

Arcos, ou cambotas, são elementos metálicos curvilíneos, instalados, via de regra, com plano normal ao eixo da escavação. São utilizados como fortificação (contenção) passiva, sendo capazes de suportar ou sustentar o peso da rocha fraturada em volta da cavidade e/ou suportar as diversas tensões exercidas pelo maciço rochoso. Podem ser usados em associação com concreto projetado e telas, o que permite uma maior segurança à estabilização da zona de trabalho.

A finalidade das cambotas é suportar as cargas iniciais do terreno nas primeiras horas após a escavação (Empresas CBPO/Figueiredo Ferraz, 1994). São considerados suportes de alta deformabilidade, mas caros, pesados, com pequena ligação com concreto, se for a opção de uso conjunto.

Telas são dispositivos metálicos ou de poliéster utilizados para suportar pequenos blocos de rocha solta ou como reforço para a projeção de concreto. Passíveis de colocação mecanizada por equipamentos de perfuração como mostra a Figura 13 apresentada por Silva (2018).

Figura 13 - Aplicação automatizada de tela em maciço escavado, junto com ancoragens e camada de concreto projetado.



Fonte: Silva (2018)

Ancoragens consistem na introdução rígida, também chamada de fixação, de barra de aço, sendo tirante ou parafuso, ou então introdução flexível, com cabo ou cordoalha, em furos previamente executados através das camadas adjacentes à escavação, com o preenchimento ou não do espaço anular entre a barra e a parede do furo com argamassa de cimento não retrátil ou com resina. Os tirantes podem ser de teto, soleira ou de parede. São estruturas cada vez mais baratas, resistentes, de fácil instalação, versáteis e que apresentam redução da área escavada (Silva et al., 1998). Têm-se como exemplos que constituem parafusos de ancoragem mecânica os parafusos de atrito, *friction bolts* em língua inglesa, nos modelos *splitset* ou *swellex*, ou com argamassa constituídas de resina, cimento ou solução expansível.

Enfilagens, segundo Silva (2018), são exemplos de reforço do maciço, constituídos de estacas compostas por tubos colocados no maciço antes de executado o emboque da escavação e/ou do avanço da frente de trabalho, principalmente se o material é menos consolidado. Têm de 6 a 24 m de comprimento, sendo mais comuns aplicações de 9 a 12 m. Assim como as injeções e, de certo modo, as ancoragens, melhoram características de resistência, deformabilidade e/ou impermeabilidade do maciço. A Figura 14 apresenta exemplos de sistemas de sustentação e reforço das aberturas.

Figura 14 – Representação, da esquerda para direita, das cambotas, concreto projetado e um conjunto de práticas como concreto projetado, enfilagem e cambotas.



Esses sistemas de sustentação e reforços das galerias nas minas objetivam fornecer maior segurança por meio da aplicação de forças reativas que confirmam resistências ao maciço e se contraponham a tendência de convergência das aberturas. Devem ser empregados juntamente com outras técnicas de garantir a

segurança geotécnica dos trabalhos na mina como o monitoramento, ponto focal desse trabalho.

2.5 Monitoramento (*Ground Control*)

Conforme explica Silva (2018), assim como as etapas de escavação e sustentação têm papel fundamental nas questões de segurança e produtividade das minas, o monitoramento contínuo do maciço rochoso tem sua importância, pois permite medir o desenvolvimento das deformações das aberturas, o alívio de tensões no maciço, a interação do suporte das aberturas com o maciço circundante dentre outros aspectos mensuráveis que possam trazer respostas capazes de prever e alertar as equipes responsáveis pela estabilidade das estruturas, que tomam medidas, preventivas e ou corretivas, antes que as deformações atinjam os valores críticos estabelecidos.

Silva (2018) ainda faz uma série de afirmações e comparações capazes de situar as condições atuais do processo de monitoramento de escavações subterrâneas civis e de mineração, como por exemplo a constatação que as medições de deformações são mais fáceis e baratas, que os testes mais frequentes no monitoramento provavelmente são os de convergência e que o método mais antigo é, provavelmente, a medição com extensômetros.

Nas cavas e outras estruturas presentes na mineração a céu aberto, as medições obtidas nos diversos instrumentos também são capazes de acompanhar e inspecionar a segurança geotécnica e atestar a estabilidade dessas obras executadas ao estabelecer fatores de segurança, também conhecido como abordagem de probabilidade de risco, com o objetivo de extrair o minério, armazenar material em barragens ou pilhas, e uma gama de outras atividades presentes no dia a dia da mineração, de maneira mais segura e sustentável possível.

2.5.1 Instrumentos de monitoramento geomecânico e estrutural

É necessário realizar monitoramento em obras que envolvem solo e rocha devido ao grau de anisotropia presente nesses materiais, o qual difere das estruturas construídas em aço ou concreto projetado. À medida que a mineração subterrânea se expande e acessos e galerias são escavados, o monitoramento do maciço rochoso registra e processa dados de extrema importância para garantir a segurança geotécnica das aberturas subterrâneas.

De acordo com Brady e Brown (2004) o monitoramento das estruturas subterrâneas tem por objetivo caracterizar a resposta operacional devido as atividades de mineração, aqui especificamente, a resposta dos maciços às aberturas. Os autores explicam que a intenção é estabelecer uma compreensão das funções dos vários elementos do maciço no comportamento durante o processo de alterações das tensões *in situ* e as conseqüentes deformações provocadas.

O processo de obtenção e análise dos dados de monitoramento tem a pretensão de reavaliar e aumentar o conhecimento das propriedades mecânicas do maciço. Essas propriedades mecânicas referem-se às características físicas e comportamentais do maciço rochoso ou do solo, como resistência, deformabilidade, permeabilidade, entre outras.

Entre os diversos métodos de monitoramento utilizados, a instrumentação geotécnica tem uma grande relevância. Consiste na instalação de dispositivos e sensores no maciço para medir grandezas como pressão, tensão, deformação, deslocamento, entre outras.

Alguns dos principais instrumentos de monitoramento serão abordados a seguir e expostos seus aspectos positivos e negativos para cada tipo de estrutura ou para o objetivo do monitoramento.

A instrumentação geotécnica nasce como uma ferramenta de monitoramento nos anos 30 e 40 do século XX. Durante os primeiros 50 anos, a tendência observada foi a predominância de instrumentos mecânicos e hidráulicos no cenário da mineração e das construções civis.

Nas últimas décadas, com o avanço da tecnologia e o papel fundamental dos instrumentos, aparatos mais sofisticados com transdutores elétricos e pneumáticos, tornaram-se rotineiros entre os geotécnicos, como explica Dunnicliff (1988).

Tem-se uma gama de ferramentas para se lançar mão, sempre empregando aparelhos que condizem com as características particulares do ambiente a ser monitorado. Segundo Dunnicliff (1988):

“O estado da arte do *design* de instrumentos está agora muito à frente do estado da prática pelos usuários, e muitas imperfeições adicionais nos programas de instrumentação atuais decorrem de problemas humanos causados pelos próprios usuários, em vez de problemas de instrumentos causados pelos fabricantes.”

Além disso o autor afirma que é de responsabilidade dos geotécnicos desenvolver um nível de entendimento dos aparelhos para otimizar o uso da instrumentação.

As perspectivas futuras nessa área continuam enfatizando a importância da instrumentação. A geotecnia tem seu papel reconhecido devido às incertezas inerentes às formações rochosas e solo em que as obras são feitas. Estão em curso esforços para automatizar a aquisição e processamento dos dados, eliminando a possibilidade de erros humanos. No entanto, isso não substitui a atuação dos geotécnicos, responsáveis por um julgamento crítico que vai além dos números obtidos por meio da medição dos dispositivos. Visitas a campo para se validar as informações continuarão sendo essenciais para que se alcance os objetivos pretendidos pelo monitoramento geotécnico.

Dunnicliff (1988) faz uma série de questionamentos a respeito da instrumentação geotécnica em que se destacam a definição de instrumentação geotécnica e o objetivo do monitoramento.

A indagação quando se busca soluções na instrumentação é: “o que é a instrumentação geotécnica?”.

O próprio autor então elucida a questão. A instrumentação geotécnica é um conjunto de técnicas e métodos utilizados para monitorar e medir as características do solo, rochas e estruturas geotécnicas, como fundações, taludes, barragens, entre

outros. Essa prática é essencial para compreender o comportamento desses materiais em resposta às cargas, variações ambientais e outras influências.

A instrumentação geotécnica envolve a instalação de sensores e equipamentos de medição em locais estratégicos para coletar dados precisos sobre diversas variáveis, Dunicliff (1988) enumera esses fatores, tais como:

- deslocamentos: monitoramento das mudanças na posição ou deformação de estruturas e terrenos;
- tensões: medição das tensões internas no solo ou nas estruturas, que podem indicar a distribuição de cargas;
- pressões de água: acompanhamento das pressões de água no solo ou em estruturas subterrâneas;
- níveis de água: monitoramento do nível do lençol freático;
- inclinações: medição das inclinações em taludes e encostas;
- temperatura: acompanhamento das variações de temperatura que podem afetar as propriedades do solo e das estruturas;
- forças: medição das forças que atuam nas estruturas ou elementos geotécnicos.

Esses dados são coletados periodicamente ou em tempo real, dependendo da situação, e permitem aos engenheiros e geotécnicos avaliar a estabilidade das estruturas, identificar possíveis riscos e tomar medidas preventivas ou corretivas quando necessário. A instrumentação geotécnica é particularmente importante em projetos de engenharia, como construção de edifícios, pontes, estradas, túneis, represas e outras estruturas que interagem diretamente com o solo e as rochas, como barragens, cavas e escavações em subsuperfície.

Segundo Dunicliff (1988) existem duas categorias gerais de instrumentos de medição. A primeira categoria é usada para a determinação das propriedades *in situ* do solo ou da rocha, como resistência, compressibilidade e permeabilidade, normalmente durante a fase de projeto de um projeto. A segunda categoria é usada

para monitorar o desempenho, geralmente durante a fase de construção ou operação e pode envolver medidas de poropressão, pressões totais, tensões e deformações ou esforços por carregamentos.

Sem dúvidas, a instrumentação geotécnica desempenha um papel crucial na segurança e no desempenho a longo prazo de diversas obras de engenharia, permitindo que os profissionais tomem decisões fundamentadas em dados concretos sobre o comportamento dos materiais geotécnicos e suas interações com as estruturas construídas.

O segundo questionamento que o autor faz é: “por que se deve monitorar os comportamentos das estruturas?”.

Conforme explica Dunnicliff (1988) em qualquer construção geotécnica precisa-se da posse de informações das propriedades do solo ou da rocha. A capacidade do material de suportar esforços devem ser detalhadamente conhecidas. Para desenvolvimento de estruturas a céu aberto ou subterrâneas devem ser consideradas a capacidade de autossuporte ou por meio de técnicas de suporte auxiliares.

Conforme observado pelo autor, o *design* geotécnico das estruturas é influenciado por diversas variáveis específicas, decorrentes da heterogeneidade do maciço rochoso ou solo. Essas variáveis têm impacto significativo nos métodos de construção e sustentação dessas obras. Com o avanço da intervenção humana nesses ambientes e com a supervisão dos comportamentos geotécnicos, os engenheiros responsáveis podem avaliar a segurança e, se preciso, implementar alguma solução para manter a estabilidade da estrutura.

A próxima indagação a ser feita é: “como deve ser a efetividade das pessoas e equipamentos envolvidos?”.

É essencial contar com uma equipe de monitoramento capaz de compreender os procedimentos necessários para uma fiscalização efetiva. O entendimento dos conceitos geotécnicos envolvidos, aliado a uma sólida base de conhecimentos mecânicos e elétricos relacionados à atividade, garante uma ação eficaz do grupo de trabalho.

Quando se tratam dos equipamentos, é fundamental que a confiabilidade nos dados seja plena. A simplicidade durante todo o processo de monitoramento também é primordial. Embora o preço dos equipamentos seja um parâmetro a ser considerado, ele não deve ser o fator determinante na decisão de compra.

Ao longo dos próximos tópicos, serão apresentados alguns dos principais instrumentos de monitoramento geotécnico e suas características intrínsecas, abordando vantagens e desafios para seu uso em empreendimentos mineiros, tanto em mineração a céu aberto quanto em mineração subterrânea.

2.5.2 Instrumentação de escavações subterrâneas

Além do monitoramento de maciços rochosos, é essencial monitorar suportes e maciços com suportes e reforços instalados. Testes e ensaios específicos são amplamente empregados para avaliar a eficácia e integridade desses suportes, desempenhando um papel crucial na garantia da segurança e estabilidade das estruturas geotécnicas.

Nesse contexto, a seguir apresentam-se as principais ferramentas de monitoramento de suportes e reforços em maciços rochosos, amplamente utilizadas no ambiente de mineração subterrânea e fundamentais para os geotécnicos. Essas ferramentas não apenas fornecem dados essenciais para avaliar a performance dos suportes, mas também servem como base para tomada de decisões que visam garantir a estabilidade das estruturas subterrâneas na indústria de mineração.

2.5.3 Extensômetros (*Strain gauges*)

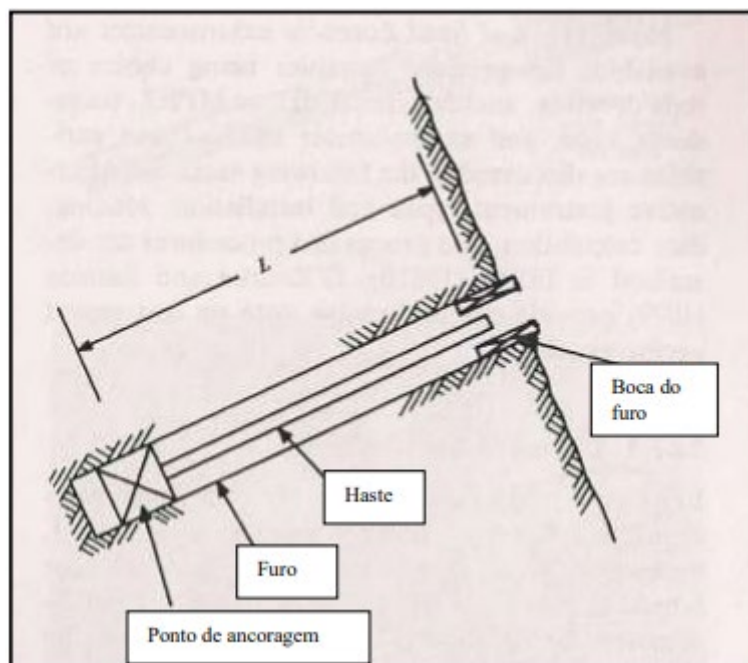
Guadagnini *et al.* (2011) definem um extensômetro como sendo um transdutor resistivo, mecanicamente deformável, cuja resistência elétrica varia com seu grau de deformação. A medida da variação da resistência elétrica do extensômetro, utilizando

um circuito elétrico, permite estimar o seu grau de deformação e a força aplicada sobre ele.

Segundo Cota (2011) os extensômetros axiais são dispositivos empregados no monitoramento dos deslocamentos em um ou mais pontos específicos dentro de rochas ou solos. O tipo de extensômetro abordado a seguir refere-se àqueles instalados no interior de furos, sendo amplamente empregados em ambientes subterrâneos e em taludes rochosos.

Os extensômetros fixados em furos, como ilustra a Figura 15, são definidos por Dunicliff (1988) como instrumentos instalados em solo ou rocha para o monitoramento da mudança da distância entre dois ou mais pontos ao longo do eixo de um furo sem utilização de sonda móvel. A distância da face da boca do furo ao final da haste é medida utilizando um transdutor de deslocamento mecânico ou elétrico.

Figura 15 - Visualização do princípio de operação do extensômetro fixo de furo

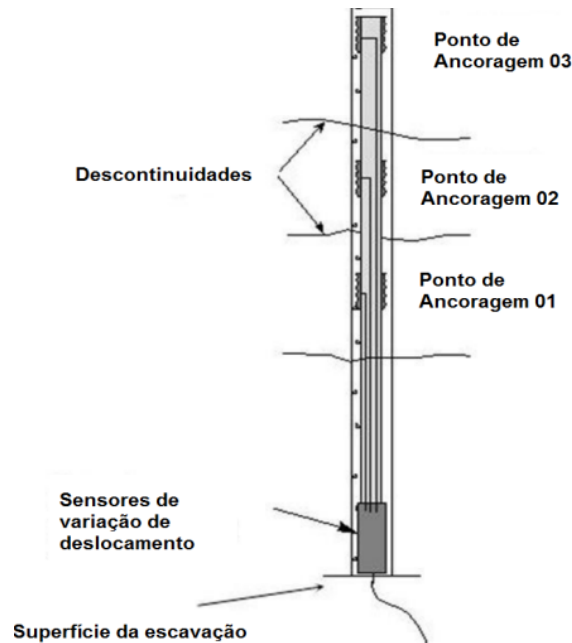


Fonte: Dunicliff (1988)

O instrumento mostrado é um extensômetro fixo de furo com apenas um ponto de ancoragem (SPBX—*Single Point Borehole Extensometer*), mas muitos pontos de ancoragens podem ser dispostos ao longo do furo para criar um extensômetro de furo

com vários pontos de monitoramento (MPBX–*Multiple Point Borehole Extensometer*) como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Extensômetro MPBX instalado e seus pontos de ancoragem



Fonte: Hyett *et al* (1992).

Gontijo (2017) define o princípio de funcionamento desses equipamentos de forma simplificada para melhor entendimento geral. Consiste em ancorar dentro de uma perfuração no maciço uma haste que seja capaz de mensurar os deslocamentos por meio de potenciômetros e/ou LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*).

A operação básica de um extensômetro envolve a fixação do dispositivo à superfície de um material. Conforme o material é deformado, o extensômetro responde às mudanças de comprimento por meio de variações em sua resistência elétrica. Essas variações de resistência podem ser medidas e usadas para calcular a deformação sofrida pelo material.

Existem vários tipos de extensômetros, incluindo extensômetros de fio metálico, extensômetros de filme fino e extensômetros semicondutores que, segundo Cota (2011), podem variar com relação ao tipo de ancoragem, tipo de ligação (haste ou fio), tipo de transdutor e tipo de leitor. A escolha do tipo de extensômetro depende das características específicas do material e das condições do experimento.

2.5.4 Medições de tensões *in situ* por *overcoring*

A partir do conhecimento das direções das tensões é possível, segundo Gontijo (2017), planejar a direção das escavações em um sentido ótimo, reduzindo a quantidade de sistemas de reforços e suportes a serem utilizados, o tempo de abatimento de choco, além de minimizar qualquer evento dinâmico que possa vir a ocorrer em outra direção de escavação.

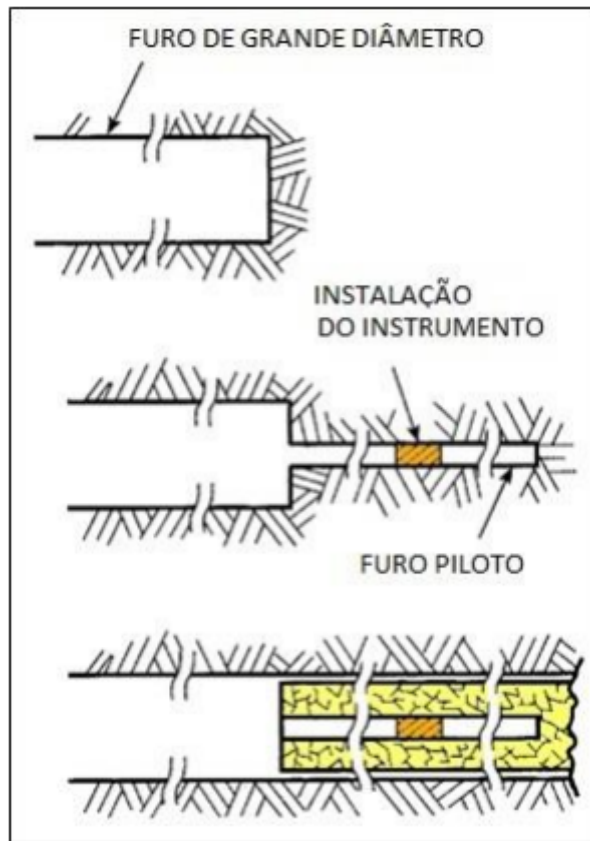
De acordo com Tropa (2013), *overcoring* é um método que envolve o isolamento de uma amostra de rocha do campo de tensões que o rodeia, e o monitoramento da resposta a esse esforço. As tensões medidas não estão relacionadas com pressões aplicadas, e sim inferidas a partir de esforços gerados por processos de descarga de pressões.

A desvantagem do método é que a medição por *overcoring* requer a suposição de que a rocha tenha um comportamento contínuo, homogêneo, isotrópico e linear-elástico. Como salienta Tropa (2013), a discrepância entre o valor real e o valor mensurado ocorre porque essas condições são raramente encontradas em maciços rochosos. Mesmo quando as condições ideais aparentemente se aplicam, sempre há alguma variação nos resultados.

Como explica Gontijo (2017) o método envolve primeiramente uma perfuração de um furo de diâmetro de 6", seguida por uma perfuração piloto, central, de menor diâmetro na qual está inserido e preso um dispositivo de medição de esforços, denominado rosetas com *strain gauges*. A perfuração de maior diâmetro é sequenciada, aliviando tensões e esforços no cilindro de rocha interno. Alterações nos esforços são registradas com o dispositivo enquanto os trabalhos prosseguem até o plano de medição. As tensões *in situ* são calculadas a partir dos esforços medidos com o conhecimento das propriedades mecânicas da rocha (módulo de elasticidade, resistência simples).

O esquema desse tipo de instrumentação está representado pela Figura 17, onde destaque-se a sequência da execução do método.

Figura 17 - Esquema da instrumentação in situ tipo overcoring.



Fonte: Tropia (2013)

Essas medições de tensões *in situ* por *overcoring* fornecem informações cruciais para o projeto de estruturas subterrâneas, túneis, minas, entre outros, ajudando a garantir a estabilidade e a segurança dessas construções em ambientes geologicamente desafiadores.

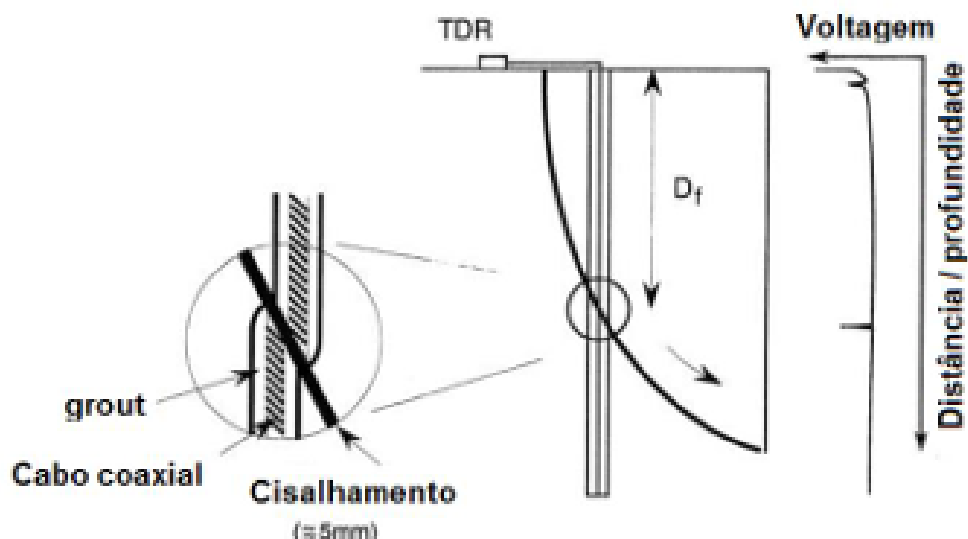
O produto gerado pelo monitoramento de tensões *in situ* por *overcoring* são as curvas de anisotropia, que permitem compreender a direção ótima de escavação, ou seja, as que não são afetadas pelos esforços, sem causar danos em tetos ou em laterais/paredes.

2.5.5 TDR – *time domain reflectometer*

Time Domain Reflectometer (TDR) faz parte do grupo de testes não destrutivos no campo. Marr e Fairhurst (1999) definem como sendo uma técnica geofísica que usa o eletromagnetismo como princípio e é utilizada nas geociências e na geologia de engenharia para medir a quantidade de água, congelada ou não, em solos, assim como a concentração de solutos inorgânicos.

Marr e Fairhurst (1999) explicam que na engenharia geotécnica e geológica, o TDR é utilizado para os mesmos propósitos e também para medir a profundidade da camada de gelo, níveis de água e deslocamentos em solos e rochas. Os dois objetivos principais são a determinação da constante dielétrica, ou condutividade elétrica, e a detecção de falhas ou mudanças no perfil do solo ou em camadas geológicas. O método apresentado aqui difere de outras técnicas de aplicação de TDR e utiliza cabos ou condutores metálicos como ilustra a Figura 18.

Figura 18 - Princípio geral de funcionamento do TDR.



Fonte: Dowding (1985)

O método é um complemento de um extensômetro, pois, segundo Dowding (1985) é possível conhecer o ponto exato do local do plano de fratura, ou descontinuidade. Em mineração subterrânea o TDR é de extrema necessidade quando se conversa sobre monitorar um *crown pillar* ou qualquer outro pilar de um

empreendimento mineiro. Além disto, o monitoramento de superfície, para se entender ou controlar a subsidência ocasionada por uma mina subterrânea é outra aplicação do TDR.

Gontijo (2017) ainda explica que princípio básico do TDR envolve o envio de um pulso eletromagnético por meio de um cabo coaxial. A corrente elétrica se propaga no condutor, que é o metal, enquanto a onda eletromagnética percorre o isolante, que é o material dielétrico que separa o condutor interno da malha do cabo. Esse cabo deve estar adequadamente fixado na perfuração com *grout*.

Se houver alguma anomalia no cabo, como compressão ou corte, ela é imediatamente refletida, total ou parcialmente. Esse fenômeno de reflexão é detectado e analisado pelo TDR, permitindo a identificação e localização precisa de eventuais irregularidades no cabo.

De acordo com Gontijo (2017), as reflexões desta onda geram picos em pontos onde existe a anomalia no cabo, os quais podem ser visualizados por meio de um gráfico disponibilizado pelo equipamento e ilustrado na parte direita da Figura 18. A amplitude e a polaridade do pulso podem ser correlacionadas com a magnitude do movimento.

2.5.6 Medidor de trincas (*Crackmeter*)

Em projetos geotécnicos em superfície, o *crackmeter* pode ser usado para monitorar a estabilidade de taludes, barragens ou outros elementos do solo. Já em escavações subterrâneas, de acordo com Gontijo (2017), os instrumentos são utilizados para medir descontinuidade como juntas, fraturas, falhas, trincas e outros.

São fixados entre dois pontos, buscando-se medir diretamente o deslocamento (abertura/fechamento) destes. Para a instalação pode-se utilizar uma furadeira elétrica com brocas de 1/2" na perfuração, em que a instalação poderá ser feita com resina epóxi, *grout* ou sistema mecânico de coquilhas.

O funcionamento mecânico deste instrumento, ilustrado na Figura 19 é baseado em potenciômetros lineares ou cordas vibrantes, e o dispositivo opera medindo variações uniaxiais.

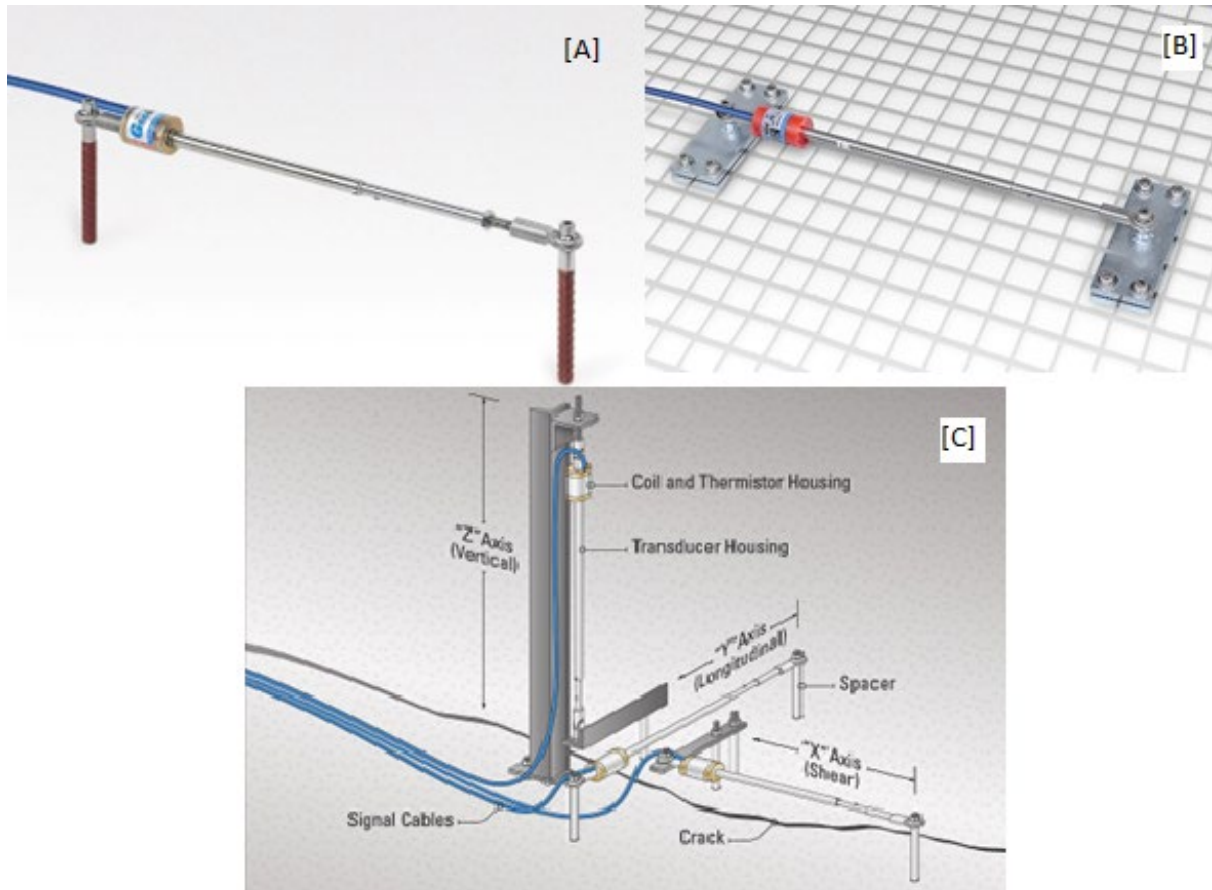
Figura 19 - Crackmeter, medidor de descontinuidades.



Fonte: Geokon (2016)

Outro modelo de Crackmeter é o modelo 4420 mostrado na Figura 20, da fabricante Geokon, que se destina a medir o movimento em fissuras e juntas de superfície. Ele é instalado por meio de grauteamento, parafusamento ou colagem de dois ancoradores roscados (com juntas esféricas) em lados opostos da fissura, e em seguida, conectando as extremidades do medidor aos ancoradores.

Figura 20 - [A] Modelo 4420. [B] Crackmeter configurado com grampos especiais para fixação em geogrelhas. [C] Três Crackmeters modelo 4420 configurados como um único Crackmeter. 3D.



Fonte: Geokon (2023)

2.5.7 Scanner a laser 3D - LIDAR (Light Detection and Ranging)

De acordo com Feng *et al* (2017) a técnica de escaneamento a *laser* 3D surgiu no final da década de 1990 e tem se desenvolvido rapidamente nos últimos anos, tornando-se cada vez mais popular para aplicações em mecânica de rochas.

A técnica nos permite escanear um objeto a uma distância (de alguns centímetros a vários quilômetros) com alta resolução (de até alguns milímetros) e alta velocidade de escaneamento (de até um milhão de pontos por segundo).

Os resultados do escaneamento são nuvens de pontos (um conjunto de pontos com coordenadas x, y e z em um sistema espacial) e imagens panorâmicas em tons de cinza ou coloridas. Os dados de escaneamento são a integração de informações espaciais (coordenadas) e visuais (imagem) em três dimensões, permitindo a criação de uma nova forma de resolver problemas na mecânica de rochas com várias outras vantagens.

Nos últimos anos, esforços específicos têm sido feitos em aplicações na mecânica de rochas, como documentação e medição no local para mapeamento de afloramentos de rocha, monitoramento de deformações para análise de estabilidade de taludes, detecção de surgências de água e controle de qualidade de detonações em relação a condições como excesso ou insuficiência de fragmentação.

O *scanner a laser*, às vezes referido como *Lidar* (detecção e medição a *laser*), é uma técnica relativamente nova para obtenção de dados digitais de um objeto: em vez de fazer uma única medição como um telêmetro a laser, ela captura milhões de medições, chamadas nuvens de pontos, por meio da rotação de espelhos (ou da unidade inteira) para cobrir uma grande área da superfície de um objeto. Um *scanner* 3D é um tipo de dispositivo que registra a situação conforme construída de um objeto em termos de dados sobre sua forma e possivelmente sua aparência (ou seja, intensidade ou cor), emitindo luz e detectando a reflexão dessa luz para determinar com precisão a distância até o objeto refletor.

Para algumas aplicações a integração de dados com outros dispositivos, como câmeras térmicas ou radares, permite aplicações mais amplas. Além disso, a digitalização 3D só pode registrar informações da superfície e não pode penetrar na superfície de um objeto, portanto, há a necessidade de combinar as informações da superfície digitalizada com dados subsuperficiais. Os *scanners* agora podem ser conectados a outros dispositivos, como câmeras térmicas e radares de penetração no solo (GPR), a fim de capturar múltiplos dados para mais aplicações.

A técnica de varredura a *laser* 3D (*laser scanning*) tem demonstrado potencial na cartografia de superfícies rochosas, superando limitações dos métodos tradicionais. Atualmente, a cartografia de superfícies rochosas é frequentemente realizada utilizando métodos convencionais, como bússola de geólogo e inclinômetro.

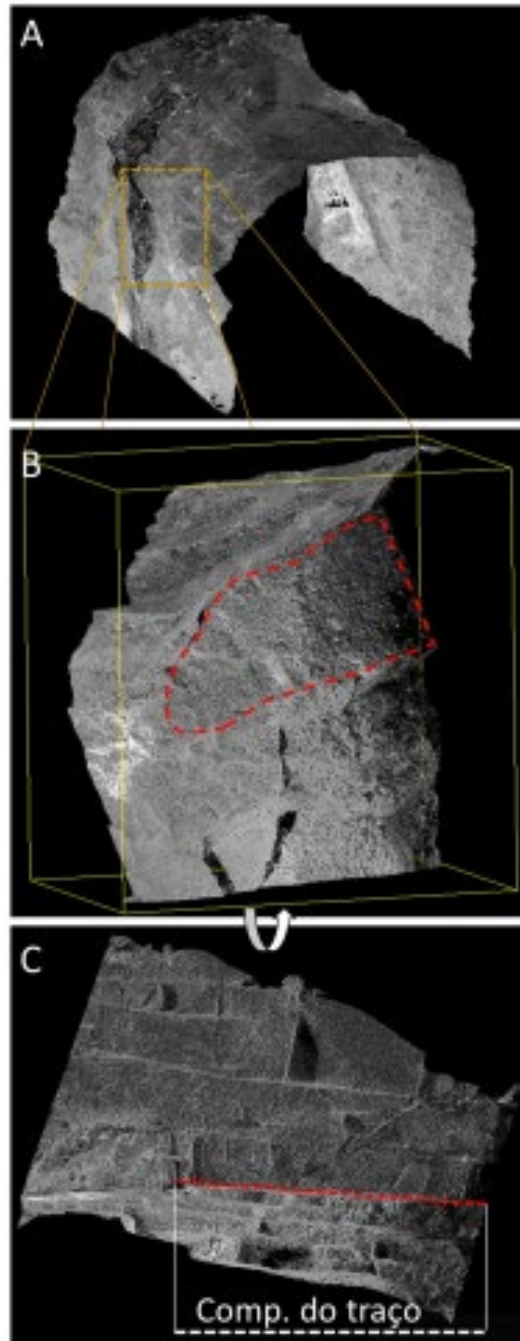
No entanto, esses métodos possuem desvantagens como contato físico com a superfície rochosa, incertezas e imprecisões, e necessidade de transferência manual dos dados para processamento.

A varredura a *laser* 3D oferece várias vantagens para a cartografia de superfícies rochosas:

- é uma técnica de contato zero, eliminando a necessidade de tocar a superfície rochosa e os riscos associados;
- captura a geometria e posição da superfície rochosa de forma rápida e precisa;
- coleta dados em formato digital e 3D, facilitando o processamento computacional e a modelagem;
- permite a armazenagem e compartilhamento dos dados em formato digital;
- oferece a capacidade de verificação e repetibilidade dos resultados, garantindo confiabilidade.

Aplicações típicas incluem a determinação da orientação das fraturas, avaliação da rugosidade da superfície, medição de comprimento e espaçamento das fraturas e identificação de tipos de rocha. A varredura a *laser* 3D pode melhorar a qualidade e quantidade dos dados obtidos, além de oferecer maior eficiência e confiabilidade em comparação com métodos tradicionais. Um exemplo do resultado de escaneamento encontra-se na Figura 21, de Cacciari e Futai (2014), que mostram a aplicação dos *scanners* para túneis ferroviários e rodoviários.

Figura 21 - Procedimento de identificação de descontinuidades na nuvem de pontos. (A) Trecho escaneado de um túnel. (B) destaque de uma parte da nuvem de pontos com um plano selecionado indicando sua orientação. (C) detalhe da identificação do comprimento do traço.



Fonte: Cacciari e Futai (2014)

2.6 Instrumentação geotécnica e monitoramento de barragens de rejeitos e pilhas de estéril

Machado (2007) enfatiza que em obras de grande porte como é o caso das barragens de rejeitos e pilhas de estéril, é necessário que o engenheiro conheça as técnicas de medição, acompanhe as variações dos comportamentos apresentados e verifique possíveis discrepâncias entre valores esperados e obtidos em leituras *in situ*. Para isso devem ser instalados instrumentos apropriados capazes de fornecer dados relevantes para o monitoramento das forças envolvidas na disposição do rejeito e estéril.

As técnicas de auscultação do comportamento de barragens incluem a seleção do tipo e da quantidade de instrumentos necessários, bem como a sua localização, modo de instalação, aquisição, análise e interpretação adequadas dos dados. Esse conjunto de técnicas conhecido como instrumentação geotécnica tem sido objeto de interesse nos últimos anos, tendo se intensificado por causa dos graves acidentes ocorridos com barragens de repercussão mundial.

Tanus (2018) enfatiza a importância de entender que as inspeções de campo e a instrumentação de auscultação das estruturas devem ser sempre vistas como complementares. A análise conjunta dos dados obtidos traz maior confiabilidade ao monitoramento, pois muitas vezes os problemas surgem em regiões não instrumentadas, onde apenas as inspeções de campo podem detectá-los.

É importante ressaltar que há diversos outros métodos de monitoramento além dos explorados nesse trabalho, como por exemplo já citado nesse trabalho o InSAR (*Synthetic Aperture Radar Interferometry*), que é uma tecnologia ainda pouco explorada ou até mesmo desconhecida de muitos geotécnicos e muito eficaz para detectar e monitorar movimentos de longo prazo da superfície terrestre.

Essa geotecnologia emprega a técnica de interferometria em imagens obtidas por satélites. A interferometria é a ciência que estuda e mede a interferência de ondas. A técnica utiliza o fenômeno de interferência de duas ondas eletromagnéticas para medir distâncias por meio da diferença de fase dessas ondas. A diferença de fase é devida, na maior parte, à diferença na distância percorrida por cada onda.

A seguir atém-se a dois dos principais instrumentos capazes de monitorar com precisão e atestar a segurança das estruturas de disposição ou de contenção mais comuns na mineração.

2.6.1 Sismógrafos

Os sismos de origens naturais ou induzidos são e devem ser sempre uma grande preocupação para os geotécnicos responsáveis por barragens. Eventos sísmicos são possíveis gatilhos para rupturas.

Sismógrafos, como os da Figura 22, são responsáveis pelo monitoramento de vibrações de diferentes fontes, tais como detonações e trânsito de veículos pesados próximos às estruturas. Esses instrumentos têm por objetivos mitigar riscos de rupturas e atestar que essas perturbações não estão sendo prejudiciais a segurança da barragem.

Figura 22 - Sismógrafo S100



Fonte: ZTEX (2024)

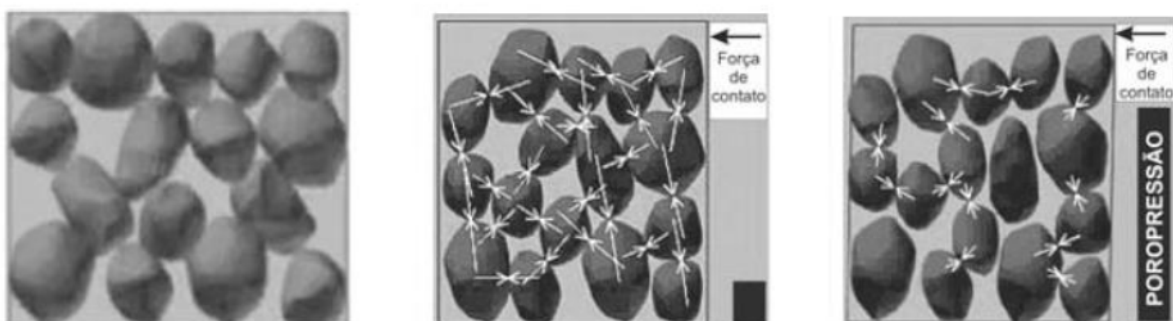
Ferreira (2020) alega que a preocupação com os efeitos das vibrações induzidas por desmonte de rochas por explosivos se deve à segurança da estabilidade de estruturas dentro da mina. As vibrações são capazes de causar instabilidade em maciços terrosos, como as barragens, a ponto de diminuir a resistência ao cisalhamento do maciço, possibilitando a geração de rupturas.

A estabilidade de maciços terrosos sob os efeitos da vibração pode ser determinada pela relação entre a oscilação das partículas e o aumento da poropressão do maciço.

De acordo com Taiebat et al. (2010), materiais com alto grau de saturação apresentam um comportamento elástico descrito pelo arranjo das partículas sólidas junto aos fluidos entre os grãos. Com o efeito das vibrações, esses materiais sofrem uma redução do seu volume, aumentando a poropressão. Com esse aumento, o fluido intersticial tenderá a se comportar como uma camada entre as partículas, aumentando a distância entre elas e ocasionalmente diminuindo o contato entre os grãos.

Conseqüentemente, a coesão do material diminui, refletindo na redução da resistência ao cisalhamento do maciço. A Figura 23 ilustra o processo físico que ocorre com as partículas do solo.

Figura 23 - Processo do aumento da poropressão em um maciço terroso e consequente liquefação e ruptura da estrutura.



Fonte: Ferreira (2020)

O produto do monitoramento geralmente são relatórios, contendo os dados obtidos dos eventos que ocorreram durante o período, que se balizam, segundo Ferreira (2020), pelas normas OSRME/USBM (RI 8507) e NP-2074:2015.

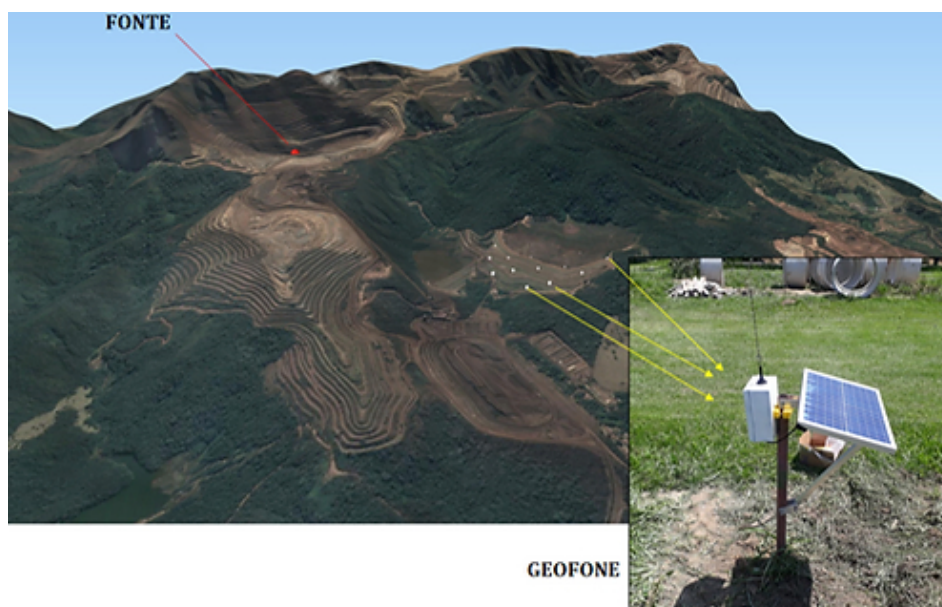
O guia para avaliação dos efeitos dos sismos provocados por desmontes usando explosivos, a ABNT NBR 9653:2018, não leva em consideração o tipo da estrutura como em outras normas pelo mundo, sendo assim não é a mais indicada para determinar limites de vibrações para aferir estabilidade de barragens de rejeito.

Outra abordagem de grande interesse aos investigadores geotécnicos dessas infraestruturas de disposição de resíduos de mineração é a microssísmica. De Freitas e De Freitas (2022) conceituam que a disciplina que estuda ondas sísmicas de pequena amplitude, muitas vezes imperceptíveis na sismografia convencional, causadas principalmente por atividades humanas como mineração e tráfego de equipamentos, é chamada de microssísmica.

O monitoramento com análise microssísmica é vantajoso pois, segundo Vita (2021), auxilia o entendimento da evolução das tensões atuantes na mina e na geomecânica envolvida, trazendo benefícios tanto para o planejamento e operação quanto para a segurança do empreendimento.

A Figura 24 traz um arranjo possível para os geofones na aplicação de monitoramento em barragens, indicando também uma fonte de ondas de baixa magnitude.

Figura 24 - Abordagem convencional. Monitoramento de fontes ativas naturais e antrópicas a partir de sismogramas para obter os parâmetros da fonte sísmica.



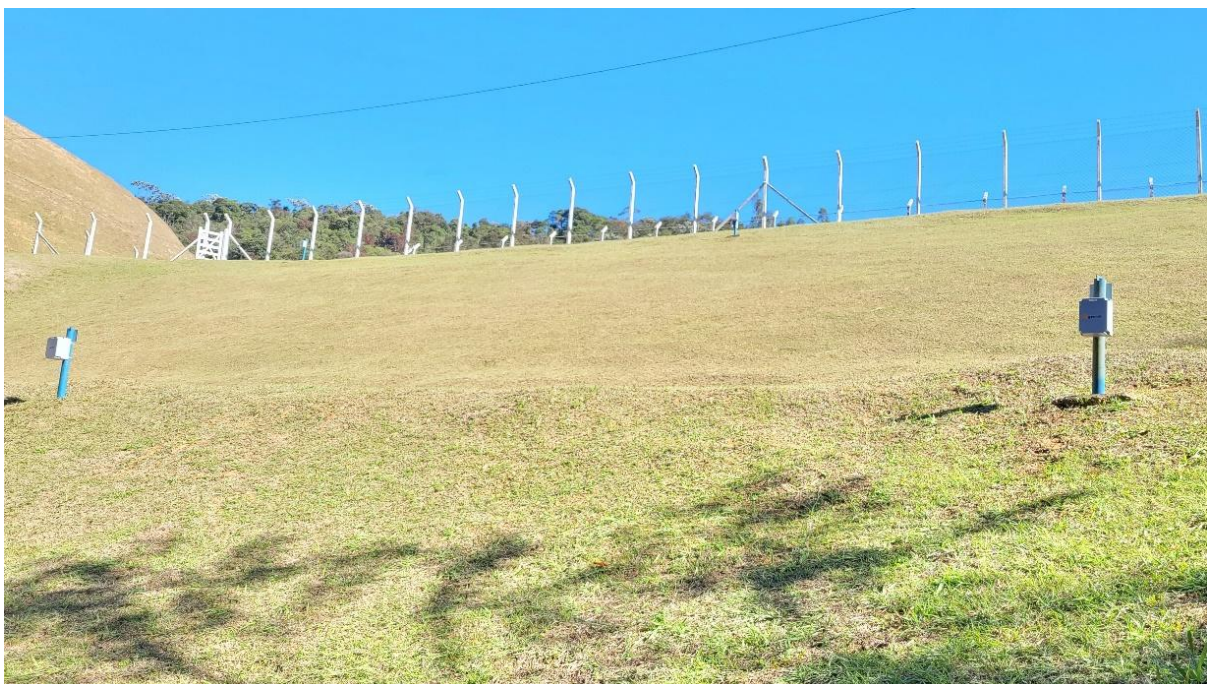
Fonte: Invision geofísica. Disponível em: <https://encurtador.com.br/nGBzO>. Acesso em: 01 ago. 2024.

A microssísmica é uma área do monitoramento geotécnico de barragens que têm tido relevante destaque no seguimento de implantação de novas tecnologias, sendo fundamentada pelo uso e aplicação de sismógrafos de engenharia capazes de perceberem a propagação de ondas sísmicas superficiais (ondas Love e ondas Rayleigh, por exemplo) e, a partir da mensuração dessas ondas obter-se a velocidade de partícula, um dos parâmetros considerados ao realizar os estudos de performance e estabilidade de estruturas geotécnicas.

2.6.2 Piezômetros

Os piezômetros, como os da Figura 25, são essenciais para a segurança das barragens de mineração. Eles monitoram a água subterrânea, a pressão hidrostática e também outros dados importantes para analisar e prever possíveis problemas de estabilidade e a eficiência dos sistemas de drenagem. A detecção precoce desses problemas permite que as equipes de geotecnia tomem medidas preventivas para corrigir o problema antes que cause danos significativos.

Figura 25 - Piezômetros instalados em barragem de mineração.



A importância desse tipo de instrumento se concretiza devido à precisão e confiabilidade dos dados, baixo custo e capacidade de medir pressão hidrostática em vários pontos da estrutura de maneira contínua. A conexão a sistemas remotos agiliza coletas e análises, mas instalação e manutenção podem ser desafiadoras. Recomenda-se automação para coletas em tempo real e para diminuição da exposição dos trabalhadores ao trabalho sobre uma barragem.

2.6.2.1 Piezômetro de corda vibrante

Silveira (2006) contextualiza historicamente que a técnica de medição empregando o princípio da corda vibrante foi desenvolvida em torno de 1930 pela *Telemac*, na França, e pela *Maihak*, na Alemanha. Posteriormente, esses instrumentos passaram a ser fabricados e amplamente utilizados na Noruega pela *Geonor* e na Inglaterra pela *Gage Technique*. Atualmente são fabricados por algumas empresas destacando-se *Maihak*, *Rocktest*, *Geonor*, *Soil Instruments*, *Geokon* e *SisGeo*.

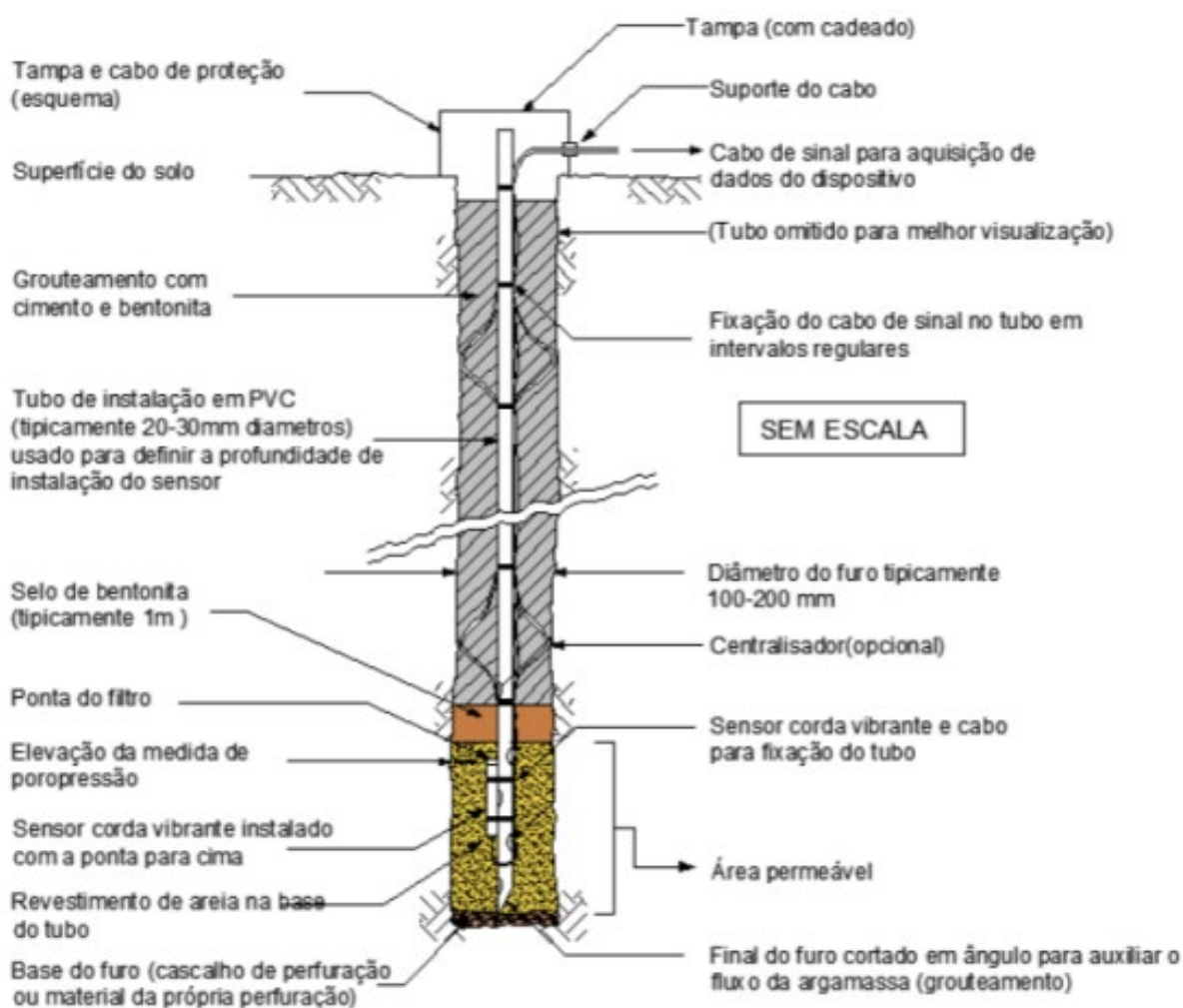
De acordo com Dunniclif (1988), esses Piezômetros medem a pressão da água dos poros em solo e rocha total ou parcialmente saturado. Um piezômetro de fio vibratório consiste basicamente em:

- um diafragma de aço inoxidável sensível;
- um fio magnético de alta resistência à tração, uma extremidade do qual é ancorada e a outra extremidade é fixada a um diafragma;
- filtro de ar baixo de cerâmica (filtros de alta entrada de ar de latão também são usados, dependendo dos requisitos do local);
- termistor para leituras de temperatura;
- vedação de vidro para metal com quatro terminais para conexão de cabo;

- corpo de aço inoxidável com resistência à ferrugem ou corrosão contra diversos tipos de impurezas dissolvidas encontradas na água em condições de campo.

A Figura 26 mostra, em detalhes, o Piezômetro de Corda Vibrante.

Figura 26 - Piezômetro de Corda Vibrante pelo método convencional

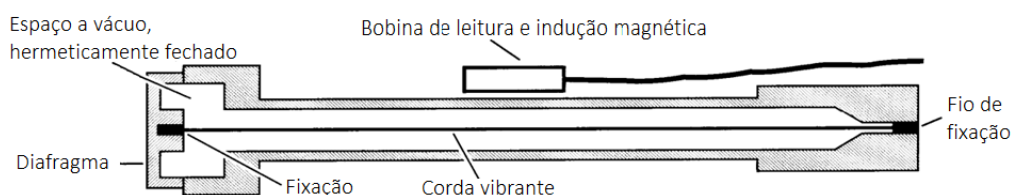


Dunniclif (1988) explica que os piezômetros elétricos de corda vibrante funcionam assim:

A pressão intersticial da água é transmitida através da pedra porosa para um diafragma interno, cuja deflexão é medida por um transdutor de corda vibrante instalado perpendicularmente ao plano do diafragma.

A Figura 27 traz a estrutura interna de um piezômetro de corda vibrante, com detalhes de fabricação do instrumento.

Figura 27 - Princípio de funcionamento de um piezômetro de corda vibrante



Dunniclif (1988) cita por exemplo vários modelos da fabricante *Geokon*, com diferentes formatos e posições da pedra porosa, de acordo com a finalidade do instrumento, por exemplo, modelos para automação de piezômetros Casagrande, ou *standpipe*, modelos para barragens de terra ou enrocamento, sendo resistentes às movimentações e deformações para aplicações no interior de aterros, e demais aplicações que estão ilustradas na Figura 28.

Figura 28 - Diferentes modelos de piezômetros de corda vibrante da Geokon

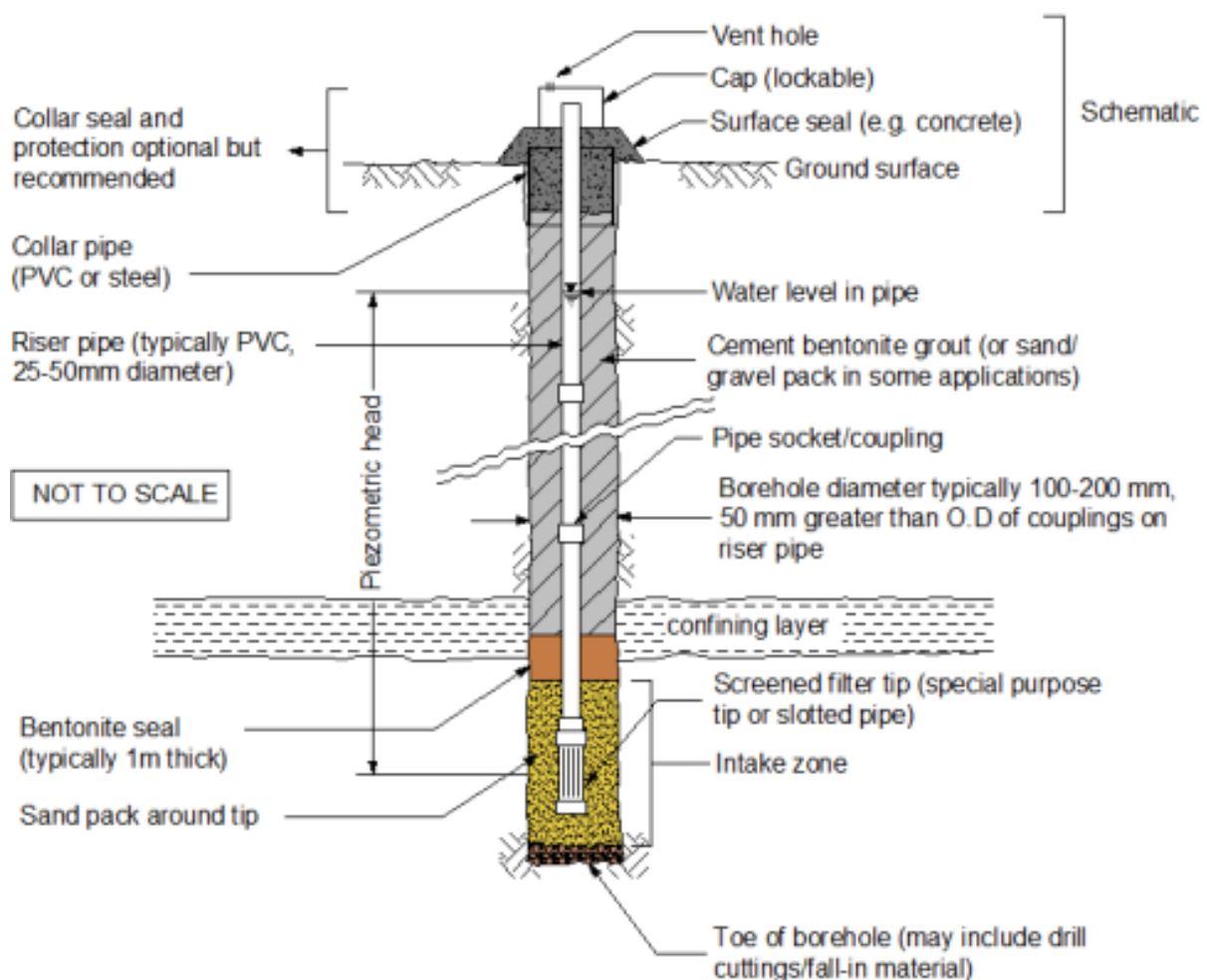


2.6.2.2 Piezômetro Casagrande ou Piezômetro de tubo aberto

Cerqueira (2017) alega que o piezômetro de Casagrande consiste em um tubo em PVC, tubo metálico ou tubo geomecânico, ranhurado ou perfurado em um ou mais trechos de geralmente 1 metro cada, inserido em um furo de sondagem. O fluxo da

água subterrânea através das ranhuras do tubo submetida à uma determinada carga piezométrica faz com que o nível da água no interior da tubulação suba ou desça conforme a variação das condições deste fluxo. O nível da água no interior desta tubulação representa a carga piezométrica na posição da célula de areia. Um selo de bentonita evita que a leitura seja influenciada pelas condições piezométricas das camadas superiores à célula de areia. Esta célula de areia fica conectada à superfície do terreno por meio da tubulação e, portanto, tem suas variações medidas sujeitas às condições barométricas. Os componentes físicos do piezômetro de Casagrande descritos estão representados na Figura 29.

Figura 29 - Piezômetro de Casagrande.



De acordo com Silveira (2006) as principais vantagens dos piezômetros Casagrande são:

- instrumentos simples, confiáveis, se devidamente instalados, duráveis e com manutenção frequente e robustos;

- de baixo custo de instalação e manutenção;
- possuem boa acurácia, podendo ser verificada seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do NA;
- possibilidade de estimar o coeficiente de permeabilidade do solo no local onde se encontra o instrumento

As principais desvantagens dos piezômetros Casagrande são:

- alto tempo de resposta a um aumento ou diminuição de pressão, quando instalado em solos com baixa permeabilidade;
- geralmente inadequado para a medição de poropressões durante o período construtivo da barragem;
- restrições quanto à sua instalação a montante da linha freática;
- dificuldade de acesso aos terminais de leitura devido a necessidade de ir ao local para efetuar a medição.

O autor explica que o piezômetro é composto por um anel que é preenchido com areia, entre o furo e o filtro poroso, e que as superfícies superior e inferior da areia são seladas com bentonita e o resto do furo é preenchido com uma argamassa de cimento/bentonita. A pressão da água subterrânea empurra a água para dentro e para cima do tubo vertical, até que o nível de água dentro do tubo vertical seja equivalente à pressão da água dos poros no solo, na elevação do filtro poroso.

3 METODOLOGIA

A primeira etapa consistiu na escolha do tema e dos objetivos da pesquisa. O tema selecionado foi o monitoramento geotécnico de estruturas de mineração, abrangendo minas a céu aberto, minas subterrâneas, estruturas de contenção de rejeitos e disposição de estéreis, sistemas de suporte e reforço. Os objetivos são ratificar a importância do monitoramento em tais estruturas e estabelecer as vantagens e desafios presentes em alguns dos instrumentos disponíveis para estruturas em condições semelhantes. Também serão apresentados históricos de acidentes e incidentes que corroboram a escolha do tema e os objetivos que se buscam alcançar por meio desse trabalho.

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

A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica na área de lavra e geotecnia, com o objetivo de compreender os principais modos de exploração de minérios desenvolvidos no mundo, assim como os diversos métodos de lavra empregados em cada um deles, as estruturas de mineração existentes para contenção de rejeitos e disposição de estéreis gerados pela exploração e beneficiamento dos minérios, os métodos de construção dessas estruturas, a legislação brasileira relacionada e os modos de falha em cavas, galerias, barragens e pilhas.

Também foram estudados os sistemas de sustentação das estruturas na mineração subterrânea, que são responsáveis por manter a estabilidade geotécnica das escavações e, conseqüentemente, a segurança dentro desses locais.

Além disso, foram explorados os princípios e os tipos de instrumentos utilizados para o monitoramento geotécnico e a importância da automatização dessa instrumentação geotécnica.

A partir disso, dentro da pesquisa e por meio da bibliografia exposta deu-se foco a casos de acidentes geotécnicos dessas estruturas. Sobre ocorrências em

minas a céu aberto abordou-se o risco de ruptura do talude norte da Mina de Gongo Soco, o monitoramento e as consequências de uma ruptura hipotética. Ao focar sobre barragens de rejeito, o modo de construção do tipo a montante foi definido como prioritário a ser abordado. Foram analisados trabalhos e relatórios específicos da ruptura da Barragem I na mina de Ferro Córrego do Feijão, em Minas Gerais, Brasil, que resultou em um fluxo de lama catastrófico que se deslocou rapidamente a jusante. No tocante as pilhas de estéril, relatou-se o caso da ruptura de um talude em uma PDE (pilha de deposição de estéril) em uma mineradora localizada em Minas Gerais.

4 ESTUDOS DE CASO

4.1 Estudo de caso: risco de ruptura de talude da Mina de Gongo Soco

A Mina de Gongo Soco está localizada na região central do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais. O acesso à área da mina é feito pela BR-262/381 (Belo Horizonte – Vitória), até o entroncamento com a rodovia estadual MG-435, e, deste ponto, até a cidade de Caeté e à mina, este último trecho sendo de 14 km em estrada. Outro acesso possível é pela cidade de Barão de Cocais, também por 14 km.

A Figura 30 apresenta o complexo de Gongo Soco com a mina, barragens e, no detalhe, as cidades mais próximas.

A localização da jazida de minério de ferro de Gongo Soco se dá no local denominado serra do Congo, pertencente a serra do Espinhaço. O complexo minerário de Gongo Soco em Barão de Cocais coloca o município em evidência no cenário da mineração nacional.

Uma das barragens do complexo, a barragem Sul Superior, construída pelo já conhecido método de alteamento a montante, está classificada como de alto risco na categoria de risco (CRI), alto dano potencial associado (DPA) e no nível de emergência 3 desde março de 2019, o mais alto da classificação, do plano de ação de emergência de barragens de mineração (PAEBM). Ela apresenta a altura de 85 metros e volume de 4,86 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro (ANM, 2019a).

Desde 2016, a cava ilustrada na Figura 31 e todas as obras do complexo minerário de Gongo Soco estavam paralisadas, isso devido ao risco de ruptura do talude da cava e não da barragem como um todo, que fica a 1,5 km de distância da cava.

Figura 31 - Talude norte da cava da Mina de Gongo Soco



No início da segunda quinzena de maio de 2019, a ANM informou que deu permissão somente de operações seguras para recuperar a estabilidade das

estruturas. Segundo a agência, o talude norte da cava de Gongo Soco estava se deslocando 10 cm por ano desde 2012, medida aceitável para uma cava profunda. Mas, desde o fim de abril de 2019, a velocidade do deslocamento aumentou para 5 cm por dia.

Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), a estabilidade e a segurança da barragem Sul Superior poderiam ser afetadas pela possível vibração gerada pela ruptura do talude, que ocorreria com a gravidade. Desde então, somente operações visando à manutenção da estabilidade das estruturas têm sido realizadas no local de forma a minimizar os riscos. Em caso de colapso da barragem, a onda de rejeitos alcançaria a cidade de Barão de Cocais em aproximadamente uma hora (ANM, 2019b).

A cronologia dos fatos é a seguinte:

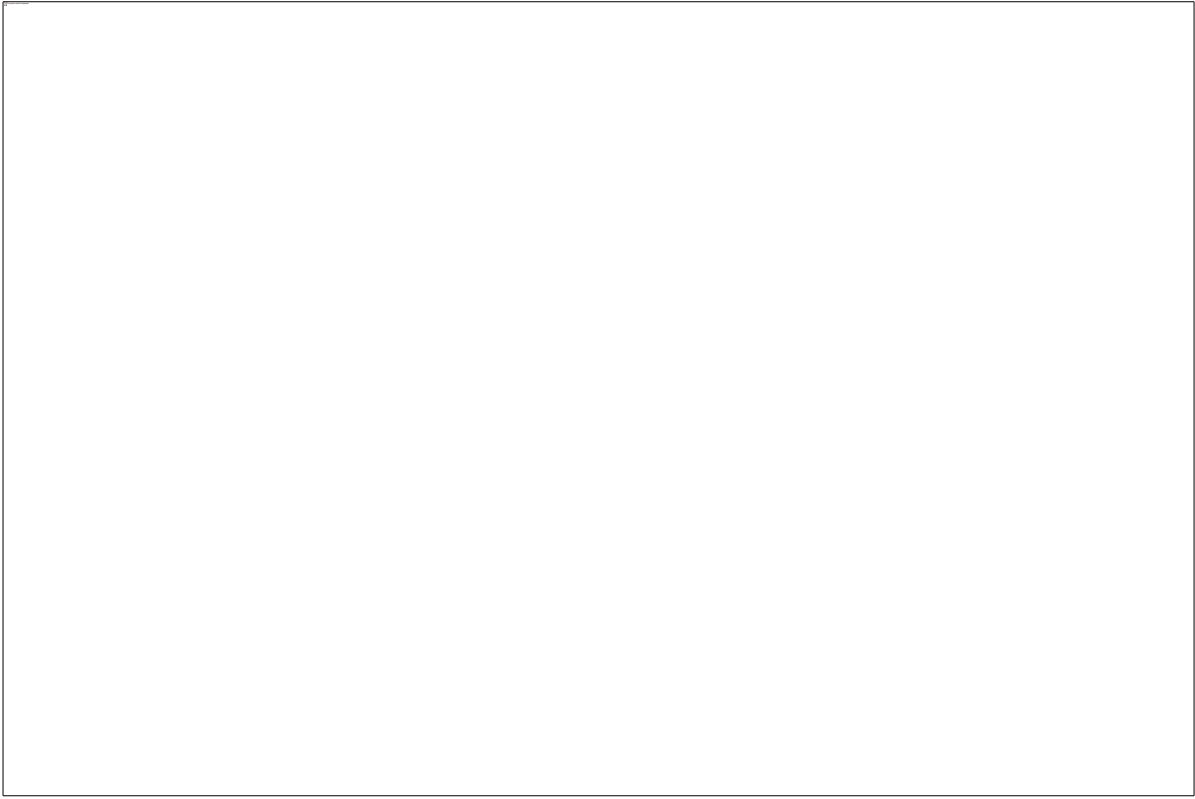
1. em maio de 2000, a Mina de Gongo Soco foi adquirida pela CVRD (Companhia Vale do Rio Doce), e a Mineração Socoimex, empresa do grupo Santa Inês que já havia adquirido, em 1960, o controle acionário da São Carlos Minério S.A., a primeira empresa que obteve concessão para lavrar minério de ferro, foi incorporada e extinta em setembro do mesmo ano;
2. em 29/04/2016, a Vale anunciou a paralisação por tempo indeterminado as operações de extração de minério de ferro na mina de Gongo Soco, alegando que a decisão se baseou no esgotamento das reservas minerais economicamente viáveis no cenário do mercado de mineração à época;
3. em 08/02/19, a Agência Nacional de Mineração determinou a evacuação de área à jusante da barragem e a retirada de 239 pessoas das comunidades de Socorro, Tabuleiro e Piteiras, em Barão de Cocais após a empresa de consultoria Walm negar a Declaração de Condição de Estabilidade à estrutura;
4. em 22/03/19, a Vale acionou o protocolo para início do nível 3 do PAEBM para a barragem;
5. em 25/05/19, a ANM informou que a movimentação do talude norte chegou a 19 cm, em alguns pontos isolados da estrutura. Na porção inferior do talude norte, a movimentação média é de 14,2 cm por dia;
6. em 31/05/19, o canal de imprensa da Vale informou que houve um deslizamento de fragmentos do talude em questão, que não provocaram danos

estruturais ou materiais, mas que avaliações preliminares indicaram que a parede estava deslocando gradualmente, confirmando avaliações de que qualquer deslizamento adicional deveria ocorrer sem grandes consequências. A notícia ainda frisava que a cava e a Barragem Sul Superior, que fica a 1,5 km da mina, são monitoradas remotamente 24 horas por dia, utilizando radar e uma estação robótica capaz de detectar movimentos milimétricos, além de sobrevoos com drones;

7. em 15/08/19, o canal de imprensa da Vale anunciou que estava executando obras de contenção de rejeito a jusante da barragem e que a data prevista para conclusão das estruturas de contenção, com 36 metros de altura por 306 metros de extensão e localizada a 6 km da barragem, seria dezembro daquele ano. Na mesma notícia veiculada pelo canal a Vale informou que já haviam sido finalizadas obras emergenciais que consistiram na instalação de duas barreiras de telas metálicas e uma de blocos de granito;
8. em 31/08/2019, de acordo com a ANM o talude já havia se deslocado 33,3 metros desde o início da aceleração daquele ano.

A estrutura de contenção a jusante (ECJ), da Figura 32, que tinha intuito de mitigar os impactos sociais e ambientais decorrentes de eventual ruptura desta estrutura foi implementada em 2020.

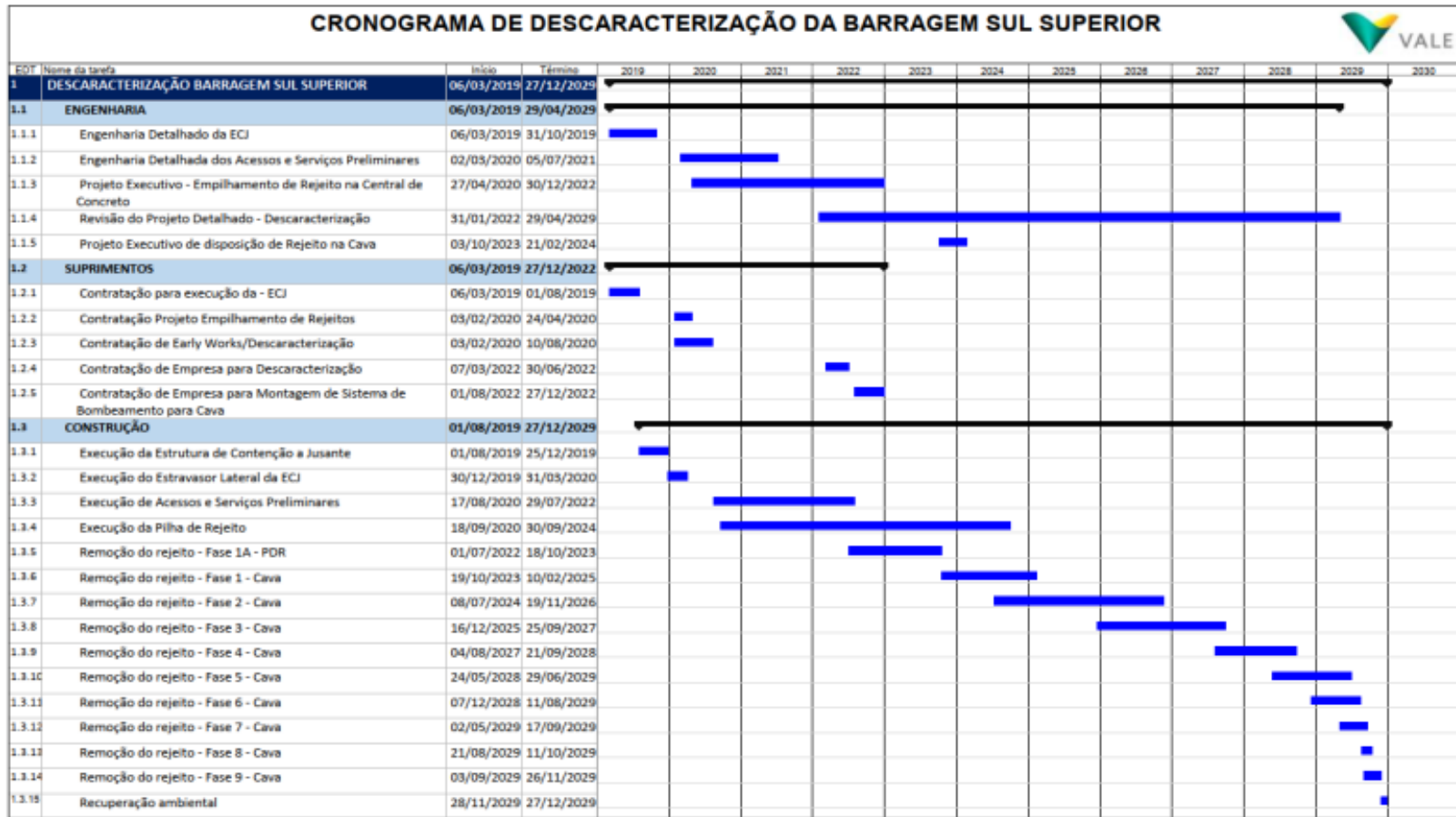
Figura 32 - Estrutura de Contenção Jusante (ECJ), construída na área da barragem Sul Superior, em Barão de Cocais.



Fonte: Vale S.A.

O desenvolvimento da engenharia de descaracterização da barragem foi iniciado em 2019, sendo elaborado o projeto conceitual e posteriormente o projeto detalhado. A descaracterização da Barragem Sul Superior foi iniciada em 2021, e de acordo com o relatório trimestral de novembro de 2023 tem 13,41% das obras concluídas, sendo o avanço previsto para o mesmo período de 15,01%, ou seja, com atraso de 1,60% ao avanço planejado para o período e tem previsão de conclusão em 2029, como evidencia a Figura 33

Figura 33 - Cronograma de atividades de descaracterização da Barragem Sul Superior.



De acordo com Alvares (2004) a área da mina apresenta uma complexa conjugação de fatores geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos que causam sérios problemas às operações de lavra e comprometimento significativamente nos cronogramas previstos de produção exigindo, portanto, estudos concentrados em termos das análises de estabilidade dos taludes com a evolução da cava da mina.

À época do trabalho, apresentado por Alvares (2004), a operação da mina tinha previsão de movimentar cerca de 14 milhões de toneladas de materiais, sendo 7 milhões de minério de ferro destinadas às instalações de tratamento e outros 7 milhões de toneladas de estéreis depositados sob a forma de pilhas com disposição por bancadas ascendentes.

Porém resultados de estudos mostraram que essa projeção seria inadequada e inconsistente com os condicionantes geotécnicos da mina, implicando, portanto, pesquisas e planejamentos adicionais, particularmente em termos do domínio das características hidrogeológicas dos maciços locais e dos procedimentos de retaludamento da cava, a partir da remoção de elevados volumes de estéreis nas zonas mais altas dos taludes.

Desde meados de 2019, segundo a Vale, a cava da Mina de Gongo Soco, em Barão de Cocais (MG), vem sendo monitorada 24 horas por dia de forma remota, com o uso de radar e estação robótica capazes de detectar movimentações milimétricas da estrutura, além de sobrevoos com drone. O vídeo-monitoramento é feito em tempo real pela sala de controle em Gongo Soco e no Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG) - quatro equipamentos estão localizados na sala de controle em Gongo Soco e outros dois no CMG.

4.2 Estudo de caso: Barragem de rejeitos B-I na mina de minério de Ferro do Córrego do Feijão. Brumadinho, Minas Gerais, Brasil.

Os resultados da pesquisa elaborada foram obtidos a partir de parte da bibliografia existente da ruptura da Barragem I na mina de Ferro Córrego do Feijão de propriedade da Vale S.A., ocorrido em 2019, o maior acidente de trabalho no Brasil em perda de vidas humanas e o segundo maior desastre industrial do século. Foi um

dos maiores desastres ambientais da mineração do país, depois da ruptura de barragem em Mariana.

No dia 25 de janeiro de 2019, aproximadamente às 12h28min no horário local, a barragem B-I da mina do Córrego do Feijão da Vale S.A. sofreu uma ruptura repentina. As filmagens de câmeras de monitoramento mostram claramente uma ruptura do talude da barragem, iniciando-se na crista e estendendo-se para uma área logo acima do primeiro alteamento, a Barragem inicial. A Figura 34 mostra o início da ruptura, com a queda da crista e consequente abaulamento para fora da região do pé da barragem. A ruptura se estendeu por grande parte da face da barragem, e o colapso do talude ocorreu em menos de 10 segundos.

Figura 34 - Ruptura da Barragem B-I Da mina do Córrego do Feijão.



Fonte: Vale S.A. (2019)

Robertson *et al* (2019) concluem que a falta de recursos de drenagem significativos, juntamente com a presença de camadas de rejeitos finos menos permeáveis dentro da própria barragem, resultou em um nível de água alto dentro da barragem.

Ademais contextualizou-se que uma percolação na face da barragem logo acima do pé era observada periodicamente, desde a época do quarto alteamento da barragem e que apesar da cessação do lançamento de rejeitos em meados de 2016, a análise dos dados dos piezômetros instalados dentro da barragem mostrou que o nível de água não reduziu significativamente após a cessação do lançamento de rejeitos.

Atesta-se também que nesse período os níveis de água na parte superior da barragem estavam caindo lentamente, mas permaneciam altos na região do pé da

barragem. Isto ocorreu principalmente devido à alta precipitação regional na estação chuvosa, combinada à drenagem interna limitada na barragem.

Ao analisar-se o estado de tensão dentro da barragem, conclui-se que partes significativas da barragem estavam sob carregamentos muito elevados devido à inclinação da barragem, ao alto peso dos rejeitos e ao alto nível de água.

Portanto, alegou-se que dentre as condições que geraram instabilidade na Barragem I, estavam presentes duas aqui ressaltadas: a falta de drenagem interna significativa que resultou em um nível de água persistentemente alto na barragem, principalmente na região do pé da barragem, e a precipitação regional alta e intensa na estação chuvosa, o que pode resultar em perda significativa de sucção, produzindo uma pequena perda de resistência nos materiais não-saturados acima do nível da água.

O Painel de especialistas constatou que a ruptura e o deslizamento de lama resultante decorreram da liquefação estática, ou seja, a súbita perda de resistência de solos muito fofos, como areia, que causaram deslizamentos dos rejeitos dentro da barragem.

Fato que chama atenção é que foi solicitado aos especialistas que respondesse uma série de perguntas em que se destacam duas delas relacionadas com o tema desse trabalho:

- “O que os dados de vários dispositivos de monitoramento da Barragem I (incluindo piezômetros) durante os 12 meses anteriores a ruptura indicaram (se é que indicaram) sobre as causas técnicas da ruptura da Barragem I?”; e
- “Ocorreram deformações ou movimentos no local da Barragem I nos 12 meses anteriores à ruptura? Se sim, o que essas deformações ou movimentos indicam sobre as causas técnicas da ruptura da Barragem I?”

A primeira resposta foi que nenhum dos dispositivos de monitoramento detectou precursores da ruptura. Em vez disso, a ruptura da barragem foi súbita e

abrupta, decorrente de altas tensões de cisalhamento no talude a jusante da barragem e da resposta frágil e não drenada dos rejeitos.

A conclusão para a segunda pergunta foi que a Barragem I não mostrou sinais de instabilidade, como grandes deformações que gerassem rachaduras e abaulamentos, antes da ruptura. A análise dos dados do InSAR mostrou que ocorreram pequenas deformações nos 12 meses anteriores à ruptura e que estas deformações foram principalmente na direção vertical. Essas deformações eram pequenas e lentas demais para serem detectadas pelo radar de solo e pelos outros dispositivos de monitoramento habitualmente usados em barragens de rejeitos.

O relatório cita que a ruptura ocorreu sem sinais aparentes de instabilidade antes do ocorrido. Monitoramentos recentes por drone e usando uma ampla combinação de instrumentos como marcos topográficos ao longo da crista da barragem, inclinômetros para medir deformações internas, radares de solo para monitorar as deformações da superfície da face da barragem e piezômetros para medir mudanças nos níveis internos de água, dentre outros instrumentos eram utilizados e nenhum desses métodos detectaram deformações ou alterações significativas antes do evento.

Bortolli (2023) cita que após a ruptura da Barragem I, especialistas do *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería* (UPC - *Universidad Politécnica de Catalunya*) conduziram estudos e produziram um relatório intitulado “Análise computacional da ruptura da Barragem I na Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho” que indicaram a liquefação como a causa mais provável do evento. Análises baseadas em ensaios de campo e laboratório, realizados tanto antes quanto após a ruptura, confirmam o estado dos rejeitos: fofo, saturado e com más condições de drenagem. Esses resultados históricos reforçam a compreensão da fragilidade do material presente na barragem e sua alta suscetibilidade à liquefação.

De acordo com o laudo de perícia criminal federal realizado por peritos do setor técnico – científico da polícia federal o monitoramento geotécnico da Barragem I do Córrego do Feijão, da Vale S.A., era realizado, no seu estágio final, por 194 instrumentos ativos, sendo 93 piezômetros, 37 indicadores de nível d’água, 7 marcos

superficiais, 53 pontos de medição de vazão em saída de drenos, um medidor de vazão residual, dois inclinômetros, um pluviômetro e um sismógrafo.

Em dezembro de 2018 foram implementadas melhorias no monitoramento, tais como a implantação de radar interferométrico e o início da automatização de pelo menos 40 piezômetros (SETEC, 2019). A Figura 35 ilustra duas unidades de instrumentos instalados na Barragem B-I.

Figura 35 - Piezômetros e/ou medidores de nível de água e marcos superficiais instalados na Barragem B-I Mina Córrego Feijão.



Fonte: Tüv Süd (2018)

Por fim, é importante ressaltar que, até a presente data, a causa, ou as causas, técnicas da ruptura da Barragem B-I do Córrego do Feijão não foram oficializadas, porém diversos fatores foram enumerados como contribuintes para desencadear a ruptura da Barragem B-I.

4.3 Estudo de caso: ruptura de um talude em uma pilha de deposição de estéril em uma mineradora

Alves *et al.* (2020) apresentam o estudo da ruptura de um talude, identificado na Figura 36, em uma pilha de deposição de estéril (PDE) de uma mineradora, com o objetivo de determinar os parâmetros geotécnicos oriundos da análise da instabilidade do talude da pilha. Esta análise é importante pois fornece subsídios à elaboração de soluções de engenharia para deposição deste material.

Figura 36 – À esquerda, a ruptura na pilha de estéril; à direita, a vista geral do vale.



Fonte: Alves et al. (2020)

Em meados de janeiro de 2018, ocorreu um incidente numa região de um vale, em função da instabilidade dos taludes executados em um acesso. O talude onde houve a instabilidade possui, aproximadamente, 28,0m de altura e com inclinação média de cerca de 33°.

Os estudos se deram a partir do diagnóstico de campo e retroanálise da ruptura desencadeada no talude. A retroanálise teve, como objetivo, definir os parâmetros de resistência das camadas de solo existentes e contribuiu para delimitar o perfil litológico, sobretudo da camada de sedimento transportado.

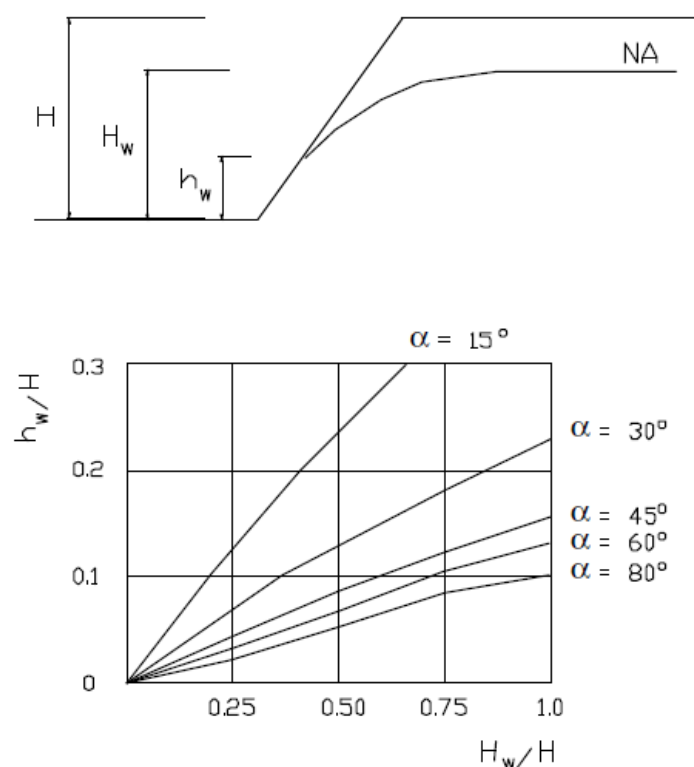
A técnica de retroanálise, segundo Alves *et al.* (2020), consiste na observação e análise dos dados precedentes de materiais compreendidos pela mesma formação geológica, permitindo a definição dos parâmetros de resistência ao cisalhamento por meio da combinação de parâmetros.

Esta é uma técnica rápida, confiável e de baixo custo que segundo Alves *et al.* (2020) se baseia na consideração de que, quando um talude sofre ruptura, seu fator

de segurança atingiu um valor inferior à unidade, permitindo o cálculo dos parâmetros de resistência nestas condições. Sendo possível determinar a geometria do talude, pode-se estabelecer via tentativa vários pares de coesão e ângulo de atrito, parâmetros da equação de Mohr-Coulomb, de modo que a condição Fator de segurança seja igual a um (FS=1,00).

A geometria do talude foi recomposta por levantamento topográfico preexistente. A camada de solo de fundação e conseqüentemente a camada restante composta por estéril foi determinada pela cicatriz da ruptura. O nível d'água foi observado em campo no topo do solo residual e sua altura no talude (H_w) foi definida conforme ábaco ilustrado na Figura 37 estabelecido por Gomes (2003).

Figura 37 - Ábaco de Sharp para estimativa da altura do NA.



Fonte: Hoek (1972)

Por meio das observações de campo, constatou-se que o mecanismo de ruptura se deu pela fundação. Foi identificada uma nascente d'água na fundação do talude. Os autores destacam que em virtude do risco associado a vida dos trabalhadores não foi permitido a execução de um sistema de drenagem interna no

vale. O sistema visava drenar as nascentes e nível freático presente na fundação da pilha e, desta forma, proporcionar o alívio de pressões neutras na fundação.

O aspecto geral observado nas vistas de campo realizadas mostra que a pilha foi sujeita a instabilizações recentes em suas fundações, resultando na movimentação de um volume significativo de materiais em direção ao vale de jusante. O rastejo dos materiais atingiu o reservatório de uma barragem, construída para a retenção de sedimentos carreados da pilha. Os taludes da pilha também mostram estar em movimentação, com fatores de segurança ao deslizamento próximos do limite de estabilidade geral.

O projeto proposto por Alves *et al.* (2020) foi elaborado com a finalidade de estabilizar o talude em estéril existente no vale. Foi proposto como solução a execução de um acesso com a função de estabilizar as condições atuais da pilha. Este acesso é previsto com escavação do talude atual, a fim de melhorar as condições de estabilidade. Adicionalmente, o próprio acesso terá a função de berma de equilíbrio. A técnica utilizada para adequação da região possibilita incrementos de segurança estrutural da pilha antes da continuidade das operações de disposição de estéreis.

O estudo de diagnóstico e retroanálise feito não cita se havia algum tipo de monitoramento sendo feito na pilha estudada.

Junior (2022) lembra que por mais que exista considerável avanço na sofisticação de modelos e ferramentas que visam representar o comportamento dos solos dificilmente é possível prever e modelar todas as variáveis envolvidas nos projetos de geotecnia. Ele conclui que o projeto deve sempre considerar a instrumentação e o monitoramento para garantir a segurança em seu projeto, tanto em pilhas permanentes quanto também em pilhas temporárias.

Por fim o autor elenca pontos críticos a serem levados em conta durante a fase de projeto, para, mais tarde, serem contemplados durante a fase de elaboração do plano de monitoramento. São eles:

- nível piezométrico;
- compressibilidade dos materiais;

- deslocamento da face e dos taludes;
- surgências nas faces;
- níveis de tensão;
- vazões de água;

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A melhoria dos parâmetros de segurança das atividades relacionadas aos processos desenvolvidos pela mineração deve ser o objetivo de todos os responsáveis envolvidos. A importância de seguir normas de execução de projetos, de manutenção preventiva ou corretiva, e de monitoramento impostas às estruturas geotécnicas tem se mostrado indispensável após os últimos acidentes geotécnicos de grande proporção no Brasil e no mundo.

A legislação referente à construção, manutenção, instrumentação e monitoramento das estruturas geotécnicas na mineração está sendo gradualmente revisada e atualizada em resposta às falhas técnicas cometidas por equipes geotécnicas responsáveis que causaram danos ao longo do histórico de rupturas. Esse processo reflete uma crescente conscientização sobre a importância de garantir a segurança e a eficiência das estruturas geotécnicas na indústria da mineração.

O avanço das novas geotecnologias, que permitem uma aplicação mais ampla e precisa, é também motivo para revisão da literatura empregada. Além disso, há a necessidade de detalhar características e comportamentos específicos dessas obras de engenharia.

Com o estudo de caso da cava da Mina de Gongo Soco, em Barão de Cocais (MG), em que foram detectadas movimentações no talude norte, monitorado 24 horas por dia de forma remota, com o uso de radar e estação robótica capazes de detectar movimentações milimétricas da estrutura, além de sobrevoos com drone, foi possível prever a ruptura do talude e resguardar a vida dos trabalhadores e da população envolvida, além de mitigar os efeitos de uma possível ruptura por meio de uma estrutura de contenção a jusante da cava.

O estudo de caso envolvendo barragens demonstrou a importância de tornar os instrumentos mais eficientes na detecção de movimentações e principalmente da necessidade do emprego conjunto do monitoramento com as investigações geológico-geotécnicas e visitas a campo para se validar as informações. No caso da Barragem B-I de Brumadinho, nenhum dos dispositivos de monitoramento detectou precursores de ruptura, e o radar InSAR não mostrou sinais de instabilidade, como

grandes deformações que gerassem rachaduras e abaulamentos. Neste caso as deformações eram pequenas e lentas demais para serem detectadas pelo radar de solo e pelos outros dispositivos de monitoramento habitualmente usados em barragens de rejeitos.

Ao caracterizar os instrumentos de monitoramento de estruturas de mineração de acordo com suas funções e associá-los às características intrínsecas do ambiente a ser monitorado, seja em escavações a céu aberto ou subterrâneas, barragens de rejeito e pilhas de estéril, foi possível comprovar a essencialidade de utilizar essas ferramentas de maneira adequada, em conjunto com outras técnicas complementares, para garantir a estabilidade e sustentação das estruturas e manter um ambiente de trabalho seguro. Essa abordagem permite uma gestão mais eficaz dos riscos associados às operações mineradoras, contribuindo para a prevenção de acidentes e para a proteção do meio ambiente. Além disso, o uso inteligente de tecnologias de monitoramento proporciona dados precisos e em tempo real, facilitando a tomada de decisões assertivas para a manutenção e o aprimoramento contínuo das práticas de segurança na indústria da mineração.

A Tabela 5 apresenta um paralelismo entre os instrumentos de monitoramento geotécnico e as estruturas geotécnicas de mineração em que são implementados. Ela destaca a finalidade do monitoramento, os principais parâmetros monitorados e a correlação desses dados com os sistemas de sustentação da estabilidade.

Tabela 5 – Paralelismo entre os instrumentos de monitoramento geotécnico e as estruturas geotécnicas da mineração em que são implementados, a finalidade do monitoramento, os principais parâmetros monitorados e a correlação com sistemas de sustentação da estabilidade.

Instrumento	Estrutura	Finalidade	Principais Parâmetros Monitorados	Observações	Correlação com sistemas de sustentação
Inclinômetro	Mineração a Céu Aberto	Monitoramento de deformações horizontais	Deslocamento lateral	Usado em taludes e encostas	Relacionado a taludes sustentados por muros de contenção, ancoragens, etc.
Piezômetro	Mineração a Céu Aberto	Monitoramento do nível freático	Pressão da água intersticial	Controle da estabilidade de taludes	Relacionado ao controle de pressão em sistemas de drenagem
<i>InSar</i>	Mineração a Céu Aberto	Monitoramento remoto de deslocamentos superficiais	Deformações de superfície	Usado em grandes áreas	Pode ser usado para monitorar estabilidade em áreas com sistemas de sustentação
<i>Lidar (Light Detection and Ranging)</i>	Mineração a Céu Aberto	Mapeamento de superfícies	Topografia de alta resolução	Deteção de deformações e estruturas	Pode auxiliar no monitoramento de estruturas de contenção
Extensômetro	Mineração Subterrânea	Monitoramento de deslocamentos em profundidade	Deformação longitudinal	Aplicado em escavações e túneis	Relacionado ao monitoramento de suporte de rochas e estruturas de suporte internas
Medidor de convergência	Mineração Subterrânea	Monitoramento da convergência de galerias	Deslocamento entre pontos	Indicador de estabilidade de escavações	Usado para verificar a eficiência de sistemas de suporte, como tirantes e concreto projetado
Medições de tensões por overcoring	Mineração Subterrânea	Avaliação de tensões <i>in situ</i>	Tensões residuais	Técnica invasiva	Relacionado ao dimensionamento e verificação de suportes
<i>TDR (Time Domain Reflectometry)</i>	Mineração Subterrânea	Monitoramento de deslocamentos e fraturas	Mudança na resistência elétrica	Monitoramento de rupturas e deslizamentos	Pode ser relacionado ao monitoramento de suportes em áreas instáveis
Piezômetro	Barragens de Rejeitos	Monitoramento do nível d'água e pressão intersticial	Nível piezométrico, pressão intersticial	Fundamental para avaliação de segurança	Relacionado ao controle de pressão em sistemas de drenagem de barragens
Inclinômetro	Barragens de Rejeitos	Monitoramento de deslocamentos horizontais	Deslocamento lateral	Usado no monitoramento de barragens	Relacionado ao monitoramento de deslocamentos em barragens sustentadas por estruturas de contenção
Medidor de vazão	Barragens de Rejeitos	Monitoramento da vazão de percolação	Taxa de percolação	Controle de infiltração em barragens	Pode estar relacionado ao monitoramento da eficiência de sistemas de drenagem
<i>Crackmeter</i>	Barragens de Rejeitos	Monitoramento de fissuras e aberturas	Abertura de fissuras	Usado para monitorar rachaduras	Pode ser usado para monitorar fissuras em barragens com estruturas de suporte
Tiltímetro	Empilhamento a Seco de Estéril	Monitoramento de inclinação e movimentos angulares	Inclinação	Controle de estabilidade de pilhas	Relacionado ao monitoramento de inclinação em estruturas de contenção de pilhas
Célula de Carga	Empilhamento a Seco de Estéril	Monitoramento de pressões em pontos específicos	Pressão	Monitoramento de sobrecarga	Pode ser relacionado ao monitoramento de pressão em suportes de pilhas
Estação Total	Todas as Estruturas	Monitoramento topográfico de precisão	Coordenadas, distâncias, ângulos	Versátil para várias aplicações	Pode ser usada para monitorar a movimentação de estruturas de suporte
<i>Lidar (Light Detection and Ranging)</i>	Todas as Estruturas	Mapeamento de superfícies	Topografia de alta resolução	Deteção de deformações e estruturas	Pode auxiliar no monitoramento de estruturas de sustentação

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho não foram abordadas referências a custos dos instrumentos, em comparação com os investimentos empenhados na atividade mineradora ou com as receitas obtidas pelas empresas do mercado.

Como sugestão para trabalhos futuros, além da correlação dos investimentos em monitoramento na composição de gastos das empresas com monitoramento geotécnico, seria interessante investigar mais a fundo os avanços obtidos nos últimos anos sobre os instrumentos geotécnicos abordados no trabalho, visto que as inovações tecnológicas sobre o tema estão sendo intensamente exploradas por pesquisadores acadêmicos e profissionais.

Essas análises mais detalhadas poderiam proporcionar percepções valiosas para aprimorar as técnicas de monitoramento e análise de dados geotécnicos, contribuindo para uma gestão mais eficiente e segura de projetos e obras relacionadas à engenharia civil e geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR. 13028. **Mineração-Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água-Requisitos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029. **Coletânea de normas de mineração e meio ambiente** - Rio de Janeiro, 2006.

ALVARES, R. A. **Análises Probabilísticas dos Taludes da Mina de Gongo Soco / CVRD**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2003. 130p.

ALVES, G.; PAULA, A.; AMARAL, T.; BATISTA, D.; MATA, A. **Determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento de talude de pilha de estéril por retroanálise**. XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Campinas, São Paulo. 2020.

ANM. **Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas**. Agência Nacional de Mineração. 2018.

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ARNEZ, F. I. V. **Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeitos causados pelos fatores geológicos e geotécnicos**. São Paulo, SP, 1999. 83p + anexo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ATLAS COPCO. **Mining Methods in Underground Mining**. 2nd Ed., Sweden. 2007

BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991. **Mined Rock and Overburden Piles. Investigation & Design Manual. Interim Guidelines**, 128p.

BORTOLLI, L. R. S. P. **Análise computacional de liquefação estática da barragem B1 na mina Córrego do Feijão em Brumadinho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro. 2023. 165 f.

Bowker Associates Science & Research In The Public Interest. (2015). *Samarco Dam Failure Largest By Far In Recorded History*.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock Mechanics: for Underground Mining**. 3. ed. Boston: Kluwer Academic, 2004. 628 p.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining**. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2006. 626 p.

Cacciari, P. P.; Futai, M, M. **Mapeamento de Descontinuidades Geológicas em Túneis Utilizando Imagens Geradas por Scanner a Laser 3D**. 2014

CARMIGNANI, Luigi; FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2. ed. rev. e ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009.

CBPO; Figueiredo Ferraz (Empresas). O NATM – Novo Método Austríaco de Execução de Túneis “*New Austrian Tunneling Method*”. Manual técnico, 1994.

CERQUEIRA, H. M. L. D. **Critérios de Projeto Para Instrumentação Piezométrica de Diversas Estruturas Geotécnicas em Mineração**. Universidade Federal de Ouro Preto. [S.I.]. 2017.

COUZENS, T. R. *Planning Models: Operating and Environmental Implications*. In: MCCARTER, M. K. **Design of Non-impounding Mine Waste Dumps**. AIME, New York, 1985. Capítulo 2, p. 15-19.

CURI, A. **Lavra de Minas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

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

De FREITAS, I. V. L., Sênior, E. G., Vale, N. L., DE FREITAS, G. A. S. C., Técnico, V. D., & Geocontrole, N. L. **Revisão Metodológica para a Análise de Monitoramento e Instrumentação de Barragem de Rejeitos de Mineração**. COBRAMSEG. 2022.

DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral, Brasília, DF. 2013.

DOWDING, C.H. (1985) **Blast Vibration Monitoring and Control**. Prentice-Hall Inc., New Jersey.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. New York: Wiley, 1998.

EATON, T., BROUGHTON, S., BERGER, K. C., *Piteau Associates Engineering Ltd* (2005). **Course Introduction Design and Operation of Large Waste Dumps. Under Licence from the British Columbia Ministry of Energy and Mines - Mine Dump Committee**.

FENG, Q.; WANG, G.; RÖSHOFF, K. **A 3D laser scanning technique and its application to rock mechanics and rock engineering**. In: *Rock Mechanics and Engineering Volume 4*. CRC Press, 2017. p. 561-592.

FERREIRA, F. V. **Ação dinâmica do desmonte de rochas por explosivos em barragem de rejeito.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas. 2020

FILHO, U. G. **A importância da instrumentação automatizada para a gestão de segurança de barragens de rejeito.** Monografia. (Graduação em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, 2021.

GOMES, B. O. **Análise comparativa dos resultados de monitoramento em ancoragens de escavações subterrâneas em mineração.** 2019. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2019.

GONTIJO, A. **Proposta e desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo de convergência em ambientes subterrâneos.** Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017. 100 p.

GUADAGNINI, P. H.; ROCHA, F. S.; BARLETTE, V. E. **Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força.** Latin-American Journal of Physics Education, v. 5, p. 753-762, 2011.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering.** 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2002. 570 p.

HOEK, E. **Estimando a Estabilidade de Taludes Escavados em Minas a Céu Aberto,** Tradução n. 4, APGA, São Paulo. (1972).

HOEK, E.; BROWN, E.T. **Practical Estimates of Rock Mass Strength.** *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 34, n. 8, p. 1165-1186, 1997.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. **Support of underground excavations in hard rock.** 1. ed. Londres: CRC Press, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** 5. ed. Disponível em: < https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2020/12/ibram_5aedioao_informacoes-e-analises-da-economia-mineral-brasileira_port.pdf>. Acesso em 21, Fev, 2024.

IBRAM. (2013). **Kiruna: Um depósito de ferro que quebra todos os paradigmas.** Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/kiruna-um-deposito-de-ferro-que-quebra-todos-os-paradigmas/>. Acesso em: 21, Dez, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração;** organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

IBRAM. (2019). **Relatório Anual de Atividades.** Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/04/2018-2019.pdf> Acesso em 21, Fev, 2024.

IBRAM. (2023). **Setor mineral. Primeiro semestre de 2023.** Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2023/07/20230718_Coletiva-de-Imprensa-Resultados-1S23_rev02.pdf> Acesso em 21, Fev, 2024.

JUNIOR, L. S. **Instrumentação e Monitoramento de Pilhas de Estéril e de Rejeitos.** 2022. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/instrumenta%C3%A7%C3%A3o-e-monitoramento-de-pilhas-est%C3%A9ril-rejeitos-effy%C3%ADa/?originalSubdomain=pt> . Acesso em: 08 abr. 2024.

LEÃO, M. F. **Tecnologias Avançadas de Monitoramento e Controle na Mineração: Impulsionando a Eficiência e a Segurança.** Disponível em: <https://acadmin.com.br/2024/03/tecnologias-avancadas-de-monitoramento-e-controle-na-mineracao-impulsionando-a-eficiencia-e-a-seguranca/>. 2024. Acesso em: 06/08/2024

LIMA, T. C. A. **Análise Técnica e Econômica para Utilização de Cabos Duplos em Realces de Sublevel na Mina Pequizão - Mineração Serra Grande, Crixás – GO.** Dissertação de Mestrado. 2016.

LOBO, L. B. **O Sequenciamento Verde e Seu Impacto no Valor Presente Líquido das Operações de Lavra.** Dissertação de Mestrado. 2023.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. 2007.

MARR, W. Allen; FAIRHURST, Charles. ***Nondestructive and automated testing for soil and rock properties.*** ASTM International, p 113-114. 1999.

NUNES, D. dos R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia.** 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

O que é o SIGBM? Instituto Minere. 17 Out 2018. Disponível em: <https://institutominere.com.br/blog/o-que-e-o-sigbm>. Acesso em: 25 ago 2023

POTVIN, Y.; DIGHT, P.; WESSELOO, J. ***Some pitfalls and misuse of rock mass classification systems for mine design.*** *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v.112, 2012.

PRIEST, S. D. ***Discontinuity Analysis for Rock Engineering.*** London: Chapman & Hall, 1993. 470 p.

ROBERTSON, P.K., DE MELO, L., WILLIAMS, D.J., & WILSON, G.W. (2019). ***Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I.*** Disponível em: <<http://www.b1technicalinvestigation.com/>>. Acesso em: 22 fev. 2024.

SETEC. Setor Técnico-Científico. Laudo de Perícia Criminal Federal nº 1070/2019. Superintendência Regional da Polícia Federal em Minas Gerais. MJSP. Belo Horizonte, 2019. 207p. Disponível em <https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto->

macedo/wpcontent/uploads/sites/41/2019/11/laudo_1070_2019_setec_sr_pf_mg_as sinado-2.pdf. Acesso em 21/02/2024

SILVA, A. **Desafios e obstáculos do monitoramento geotécnico no Brasil: Tendências e soluções**. 10º Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia – SEFE 10 e 4a Feira da Indústria de Fundações e Geotecnia. Disponível em: <<https://sefe10.com.br/evento/sefe10/trabalhosaprovados/naintegra/1095>>. Acesso em: 6 ago. 2024. 2023

SILVA, J. M. **Sustentação de Escavações Subterrâneas Civis e de Mineração**. In: THE MINE, n.73, p. 31-33, 2018. Disponível em: <https://www.inthemine.com.br/site/sustentacao-de-escavacoes-subterraneas-civis-e-de-mineracao/>. Acesso em: 24, Ago, 2023.

SILVA, J. M. **Estabilidade de Escavações Subterrâneas- Suportes Descontínuos**. DEMIN-EM-UFOP. 2022.

SILVA, J. M.; TERRA, K. L. M.; LIMA, C. A. **Tendências no Atirantamento Subterrâneo**. Brasil Mineral, 1998.

SILVA, J. M. (2005). **Estudo do fluxo de material fragmentado na mineração subterrânea, com o uso de modelos físicos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais.

SILVEIRA, J. F.; **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento**. Editora Oficina de Textos, São Paulo, 2006.

SIMPÓSIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS, 2, Anais: Auscultação e instrumentação de barragens no Brasil, Belo Horizonte: CBDB, 1996, v.1, 123 p

SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: **Tratamento de minérios**, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Cap.19. p. 831-888.

TAIEBAT M., JEREMIC B., DAFALIAS F.Y., KAYNIA A.M., CHENG Z. **Propagation of seismic waves through liquefied soils. Soil Dynamics and Earthquake Engineering**. v. 30, p. 236-257. (2010).

TANUS, H. M. **Importância da inspeção na prevenção de falhas em barragens: estudo de caso**. Monografia de Conclusão de Curso – Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2018.

TRÓPIA, I. R. **Análise das tensões in situ em ambiente de lavra subterrânea - Mina Cuiabá – Sabará/MG**. 2013. 217 f. Dissertação. Mestrado em Geotecnia.

VALE / Coffey (2016): Estudos Comparativos e Avaliação de Piezômetros de Corda Vibrante e Casagrande, 234p.

WELSH, J.D. *Geotechnical Site Investigation*. In: MCCARTER, M. K. (Ed.). **Design of Non-Impounding Mine Waste Dumps**. AIME, New York, 1985. Capítulo 4, p. 31-34.