



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



**JOÃO PAULO CORRÊA MOREIRA**

**Análise da eficácia de rampas de drenagem modulares em saprólitos e filito:  
Um estudo de caso da mina de ouro em Paracatu, MG**

**Ouro Preto – MG  
2025**

JOÃO PAULO CORRÊA MOREIRA

Análise da eficácia de rampas de drenagem modulares em saprólitos e filito: Um estudo de caso da mina de ouro em Paracatu, MG

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.

Orientador: Prof. Hernani Mota de Lima

Ouro Preto – MG  
2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**João Paulo Corrêa Moreira**

**Análise da eficácia de rampas de drenagem modulares em saprólitos e filito:  
Um estudo de caso da mina de ouro em Paracatu, MG**

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 24 de outubro de 2025

**Membros da banca**

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
M.Sc. Daniel Prado Azevedo - (Anglo American)  
Engenheiro de Minas - Lucas Jean Wurzner - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/11/2025



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/11/2025, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1007741** e o código CRC **D9D5B016**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.014266/2025-93

SEI nº 1007741

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163  
Telefone: 3135591590 - [www.ufop.br](http://www.ufop.br)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Wanderlei Moreira da Silva e Adelma Corrêa da Silva Moreira, pelo amor incondicional, apoio constante e por serem exemplos de integridade, dedicação e bondade. Agradeço por me proporcionarem todas as oportunidades, por acreditarem em mim e por tornarem o caminho mais leve em todos os momentos. Meu eterno muito obrigado. Ao meu irmão, Luis Gustavo, pelo companheirismo e incentivo, mesmo à distância, sempre presente em minha caminhada.

Um agradecimento especial à República Taberna, por ser meu lar em Ouro Preto durante todos esses anos e por me proporcionar uma segunda família, repleta de companheirismo e aprendizado.

À Kinross, pela oportunidade de estágio que possibilitou meu desenvolvimento profissional. Ao todo o time de Serviços Técnicos, sempre solícito e disposto a me ensinar e transmitir conhecimento. Deixo um agradecimento especial a Aline Rodrigues, Bruno Cabral, Gabriel Gineste, Igor Leite, Jhonnatan, Keiler Carvalho, Marcela Franchini, Rodolpho Machado, Ruann Souto, Talles Fonseca, Vagner Fernandes, por toda a parceria e ensinamentos valiosos, dentro e fora da empresa.

Ao Daniel Azevedo, pela sugestão e apoio na escolha do tema deste trabalho, pela disponibilidade em orientar, tirar dúvidas e me guiar ao longo do desenvolvimento do projeto, Ao Prof. Hernani Mota, meu orientador, pela atenção, paciência e dedicação nas etapas finais deste trabalho, garantindo os ajustes necessários para sua conclusão com qualidade e excelência.

Por fim, estendo meus agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Cada gesto de apoio, palavra de incentivo e troca de conhecimento fez parte essencial desta conquista.

## RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) avalia a eficácia de uma inovadora metodologia de rampas de drenagem modulares implementada em uma mina de ouro a céu aberto em Paracatu, MG. O estudo foi motivado pela necessidade de mitigar problemas de instabilidade de taludes e empoçamento de água, recorrentes em maciços de filito e saprólito, materiais de baixa permeabilidade e alta suscetibilidade à perda de resistência sob saturação. O objetivo central foi propor e validar uma solução de engenharia de baixo custo que garantisse o escoamento eficiente da água superficial, minimizando a poropressão, a erodibilidade e o risco de falhas geotécnicas. A metodologia consistiu na integração de dez rampas de drenagem à própria geometria de lavra, projetadas com inclinações de 8% para otimizar o fluxo de água para os sumps. Os resultados demonstraram a robustez do sistema ao resistir, sem danos ou erosões, a um evento de precipitação de 181,2 mm em seis horas. Além de garantir a segurança operacional e a estabilidade dos taludes (Fator de Segurança de 1.601), a solução gerou uma economia de aproximadamente US\$ 1,5 milhão ao substituir onerosas obras civis de concreto e gabião por estruturas moldadas com equipamentos de mineração existentes. O sucesso da abordagem modular estabelece um novo paradigma na gestão hídrica de minas, sendo incorporado ao planejamento de longo prazo da empresa.

**Palavras-chave:** mineração, drenagem, filito, saprólito, estabilidade, taludes, geotecnia.

## **ABSTRACT**

This Final Course Project (TCC) evaluates the effectiveness of an innovative modular drainage ramp methodology implemented in an open-pit gold mine in Paracatu, MG. The study was motivated by the need to mitigate problems of slope instability and water pooling, which are recurrent in phyllite and saprolite massifs, materials known for their low permeability and high susceptibility to loss of strength under saturation. The main objective was to propose and validate a low-cost engineering solution that would ensure efficient surface water drainage, minimizing pore pressure and the risk of geotechnical failures. The methodology consisted of integrating ten drainage ramps into the mining geometry itself, designed with 8% slopes to optimize water flow to the sumps. The results demonstrated the robustness of the system by withstanding, without damage or erosion, a precipitation event of 181.2 mm in six hours. In addition to ensuring operational safety and slope stability (Safety Factor of 1.601), the solution generated savings of approximately US\$ 1.5 million by replacing costly concrete and gabion civil works with structures molded with existing mining equipment. The success of the modular approach establishes a new paradigm in mine water management and is being incorporated into the company's long-term planning.

**Keywords:** mining, drainage, phyllite, saprolite, stability, slopes, geotechnics.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Presença de erosão nas bermas da mina. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                                                     | 20 |
| Figura 2 - Vala de drenagem concretada em mina. Fonte: CONCRETO FLEXÍVEL, 2013.                                                                                            | 27 |
| Figura 3 - Muro de gabião para contenção de talude. Fonte: BELGO GEOTECH, 2025.                                                                                            | 28 |
| Figura 4 - Escada hidráulica de dissipação de energia. Fonte: TERRA GREEN, 2025.                                                                                           | 29 |
| Figura 5 - Localização da mina Morro do Cruzeiro, Paracatu, Minas Gerais. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                             | 31 |
| Figura 6 - Vista aérea da mina de Morro do Ouro, destacando a proximidade do pit de lavra com a comunidade adjacente. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                 | 32 |
| Figura 7 - Perfil esquemático de intemperismo do maciço rochoso, com as respectivas camadas geológicas. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                               | 32 |
| Figura 8 - Gráfico referente aos dados pluviométricos na mina no mês de dezembro de 2021. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                             | 34 |
| Figura 9 - Comparativo entre o modelo geomecânico antigo e o novo implementado. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                       | 35 |
| Figura 10 - A imagem dos parâmetros de design para cada classe de material. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                           | 36 |
| Figura 11 - Desing do modelo das rampas modulares. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                                                    | 37 |
| Figura 12 - Desing do modelo das rampas modulares. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                                                    | 37 |
| Figura 13 - Equipamentos utilizados para cortar e lavrar as zonas friáveis. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                           | 39 |
| Figura 14 - Verificação do escoamento da água em rampas de drenagem durante a estação chuvosa. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                        | 40 |
| Figura 15 - Modelo topográfico de geometria da mina destacando a execução do projeto de drenagem. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                     | 41 |
| Figura 16 - Gráfico de Dados Mensais de Pluviometria KBM (mm) de 01 a 31 de dezembro de 2023, destacando o pico de chuva de 181,2 mm. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024. | 42 |
| Figura 17 - Resultado final do projeto. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                                                               | 42 |
| Figura 18 - Rampas de drenagem já implementadas e operantes. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                                          | 43 |
| Figura 19 - Crescimento da vegetação nas bancadas saprolíticas após a hidrossemeadura. Fonte: AZEVEDO <i>et al.</i> , 2024.                                                | 44 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Velocidade do escoamento da água por rampa ..... | 38 |
|-------------------------------------------------------------|----|



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |                                                                     |
|---------|---------------------------------------------------------------------|
| ANFO    | - Nitrato de Amônio e Óleo Combustível                              |
| DAM     | - Drenagem Ácida de Mina                                            |
| HEC-RAS | - Software utilizado para otimizar ângulos, fluxo e destino da água |
| VANTs   | - Veículos Aéreos Não Tripulados                                    |

## SUMÁRIO

|          |                                                                            |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                    | <b>10</b> |
| <b>2</b> | <b>OBJETIVOS .....</b>                                                     | <b>12</b> |
| 2.1      | Objetivo Geral .....                                                       | 12        |
| 2.2      | Objetivos Específicos .....                                                | 12        |
| <b>3</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                         | <b>13</b> |
| 3.1      | Fundamentos de Estabilidade de Taludes em Mineração.....                   | 13        |
| 3.1.1    | Conceito de talude e fatores de instabilidade: .....                       | 13        |
| 3.1.2    | Resistência ao cisalhamento .....                                          | 14        |
| 3.2      | A Influência da Água na Estabilidade de Taludes .....                      | 15        |
| 3.3      | Propriedades e Comportamento Geotécnico de Filito e Saprolito.....         | 17        |
| 3.3.1    | Alta Erodibilidade .....                                                   | 18        |
| 3.4      | Desafios da Gestão Hídrica em Minas a Céu Aberto .....                     | 21        |
| 3.4.1    | Controle de Águas Superficiais (Pluviais) .....                            | 21        |
| 3.4.2    | Influência da Água na Perfuração e Desmonte .....                          | 23        |
| 3.4.3    | Custos Operacionais.....                                                   | 24        |
| 3.4.4    | Problemas Associados à Drenagem Inadequada .....                           | 25        |
| 3.5      | Métodos de drenagem em Minas a Céu Aberto .....                            | 25        |
| 3.5.1    | Métodos Convencionais.....                                                 | 26        |
| 3.5.2    | A Abordagem das Rampas Modulares .....                                     | 29        |
| <b>4</b> | <b>METODOLOGIA.....</b>                                                    | <b>31</b> |
| 4.1      | Descrição do caso de estudo .....                                          | 31        |
| 4.2      | Metodologia de drenagem proposta.....                                      | 33        |
| 4.2.1    | Análise Geotécnica e Fatores de Projeto.....                               | 34        |
| 4.2.2    | Detalhes Geométricos e Implementação da Solução .....                      | 36        |
| 4.3      | Coleta e Análise de Dados.....                                             | 39        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                       | <b>40</b> |
| 5.1      | Análise e Discussão da Eficácia das Rampas de Drenagem Modulares ....      | 40        |
| 5.2      | Economia e Desempenho do Projeto.....                                      | 43        |
| 5.3      | Hidrossemeadura e Perspectivas Futuras .....                               | 44        |
| 5.4      | A Importância do Trabalho Multidisciplinar para o Sucesso do Projeto ..... | 45        |
| <b>6</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                          | <b>46</b> |
| <b>7</b> | <b>REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS .....</b>                                       | <b>47</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A engenharia de minas, em sua constante busca por otimização e segurança, enfrenta desafios geotécnicos substanciais, particularmente em operações de lavra a céu aberto onde a gestão da água pluvial é um fator crítico para a estabilidade de taludes. Em ambientes geológicos caracterizados pela predominância de formações como filito e saprólito, os desafios se intensificam devido às propriedades intrínsecas desses materiais, que inclui baixa permeabilidade, alta erodibilidade e elevada capacidade de retenção de umidade. Essas características tornam o desenvolvimento de bancadas eficientemente drenadas uma tarefa complexa, culminando frequentemente em acúmulo de água, redução da eficiência operacional, aumento de riscos de segurança e potenciais falhas de taludes. A influência da água nas propriedades geomecânicas de maciços rochosos e solos é amplamente documentada, sendo reconhecida como um dos principais fatores de instabilidade em taludes de mineração (Hoek & Bray, 1981; Wyllie, Mah, 2004). Este cenário se torna particularmente mais agravante em projetos de mineração localizados próximos a comunidades, onde as restrições operacionais e a necessidade de minimizar impactos ambientais são acentuadas como o controle de poeira, ruído, vibração de desmonte e a necessidade de uma barreira acústica.

Neste contexto, esse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresenta um estudo de caso de uma mina de ouro localizada em Paracatu, Minas Gerais, Brasil, onde a proximidade do pit de lavra com os limites licenciados e com a comunidade impôs requisitos rigorosos para o planejamento e fechamento da mina. A geologia do local, marcada por diferentes camadas, incluindo solo, saprólito e diversas classes de rochas, adicionava complexidade à otimização da geometria da cava e das operações de desmonte de rocha, com o objetivo de reduzir a dependência de caras estruturas de engenharia civil, como chifres de água, muros de gabião e escadas hidráulicas. Uma análise de falhas passadas na mina revelou o empoçamento como uma causa significativa desses eventos em bancadas de material friável e de considerável altura, especialmente em perfis de intemperismo elevados, como saprólitos e rochas de transição.

Para mitigar esses desafios e otimizar a geometria da cava, foi implementado na mina em Paracatu uma solução inovadora: rampas de drenagem modulares

estrategicamente posicionadas para permitir o escoamento eficiente da água e o acesso para manutenção nas encostas. Esta abordagem, detalhada no artigo de Azevedo, Carvalho e Marques (2024), representa uma alternativa de baixo custo em comparação com métodos convencionais, visando não apenas a prevenção de inundações e falhas nas encostas, mas também a condução controlada da água para sumps de reservatório. O projeto envolveu uma nova geometria com bancadas de 12 metros de altura, faces de talude de  $55^\circ$  e bermas de 15 metros de largura em saprólito, com a implementação de 10 rampas modulares distribuídas estrategicamente na encosta, direcionando a drenagem para o leste da cava. Essa solução evidenciou a importância de um planejamento prévio e do engajamento de todas as equipes multidisciplinares para o sucesso do projeto, resultando em economia de custos e maior eficiência operacional e segurança.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar a eficácia e os benefícios técnico-econômicos e ambientais da implementação das rampas de drenagem modulares como uma solução de engenharia de baixo custo para a gestão hídrica e estabilidade de taludes em uma mina a céu aberto situada em formações de filito e saprólito.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Para cumprir o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Descrever as particularidades geotécnicas e os desafios operacionais associados à gestão da água em formações de filito e saprólito, identificando os fatores que contribuem para a instabilidade de taludes e o empoçamento em bancadas;
- Detalhar o projeto e o processo de implementação das rampas de drenagem modulares na mina de Paracatu, apresentando a geometria adotada, os materiais envolvidos, as etapas de execução e as adaptações realizadas, com base nos dados do estudo de caso.
- Avaliar a eficácia das rampas de drenagem modulares na mitigação de problemas de drenagem e na melhoria da estabilidade de taludes, utilizando os resultados operacionais, de segurança e ambientais documentados no estudo de caso.
- Comparar a solução das rampas modulares com os métodos de drenagem convencionais em mineração, destacando os diferenciais em termos de custos, sustentabilidade e eficiência operacional.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Fundamentos de Estabilidade de Taludes em Mineração**

A estabilidade de taludes em operações de mina a céu aberto é um pilar fundamental para a segurança, a viabilidade econômica e o sucesso operacional. A estabilidade é definida pelo equilíbrio entre as forças que promovem o movimento da massa rochosa ou do solo (forças de instabilidade) e as forças que se opõem a esse movimento (forças de resistência). Um talude de mina é considerado estável quando o fator de segurança é superior a 1, indicando que as forças de resistência são maiores que as forças de instabilidade (Hoek; Bray, 1981).

A Mecânica dos Solos e a Mecânica das Rochas são as disciplinas que fornecem os princípios e métodos para avaliar o comportamento mecânico dos materiais geotécnicos. O estudo desses comportamentos é essencial para o projeto de taludes seguros e eficientes, especialmente em ambientes complexos como os de minas de grande escala (Goodman, 1989; Bieniawski, 1989).

O conceito de resistência ao cisalhamento é a base para a avaliação da estabilidade de taludes. A resistência ao cisalhamento de um material geotécnico é sua capacidade de resistir à ruptura por cisalhamento e é caracterizada por dois parâmetros principais: a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ). O critério de Mohr-Coulomb é amplamente utilizado na geotecnia para modelar essa resistência. Um dos fatores mais críticos que afetam a estabilidade de taludes é a presença de água.

##### **3.1.1 Conceito de talude e fatores de instabilidade:**

Em operações de mineração a céu aberto, um talude pode ser definido como qualquer superfície inclinada de uma massa de solo ou rocha. A estabilidade dessas estruturas é um pilar fundamental da engenharia geotécnica, uma vez que a ruptura de um talude pode resultar em perdas financeiras significativas, danos ambientais e, mais criticamente, riscos de segurança (ABRAMSON *et al.*, 2002).

A instabilidade de um talude é o resultado da interação de diversos fatores, que podem ser classificados em:

- **Características Geométricas:** A altura e o ângulo do talude são parâmetros críticos. Taludes mais altos e com ângulos mais íngremes tendem a ter um fator de segurança menor, sendo, portanto, mais suscetíveis à ruptura (HOEK; BRAY, 1981; WYLLIE; MAH, 2004).
- **Propriedades Geotécnicas dos Materiais:** A resistência do solo ou rocha à ruptura por cisalhamento, caracterizada pela coesão ( $c$ ) e pelo ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), é a principal força de resistência. A instabilidade ocorre quando as tensões de cisalhamento superam a resistência do material (HOEK; BRAY, 1981; WYLLIE; MAH, 2004).
- **Descontinuidades Geológicas:** Em maciços rochosos, as descontinuidades, como falhas, fraturas, xistosidades e juntas, representam superfícies de baixa resistência. O modo de ruptura de um talude rochoso é frequentemente controlado pela orientação dessas descontinuidades em relação à face do talude, podendo ocorrer rupturas planares, em cunha ou por basculamento (HOEK; BRAY, 1981; WYLLIE; MAH, 2004).
- **Cargas Externas e Fatores Ambientais:** Cargas adicionais no topo do talude, como pilhas de material ou equipamentos pesados, podem aumentar as tensões e comprometer a estabilidade. Eventos sísmicos também podem induzir vibrações que reduzem temporariamente a resistência do material, levando à falha (HOEK; BRAY, 1981; WYLLIE; MAH, 2004).

### 3.1.2 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de um material geotécnico é sua propriedade fundamental para resistir a rupturas por escorregamento ou deslizamento e é a base para a avaliação da estabilidade de taludes. Essencialmente, é a capacidade do solo ou da rocha de suportar tensões de cisalhamento sem falhar. O entendimento e a caracterização correta dessa propriedade são cruciais para o projeto seguro e eficaz de estruturas geotécnicas.

Em solos, a resistência ao cisalhamento é classicamente modelada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que relaciona a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) com a tensão normal ( $\sigma$ ) na superfície de ruptura. Essa resistência é definida por dois parâmetros principais: a coesão ( $c$ ), que representa a força de atração entre as

partículas, e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), que reflete o atrito entre elas. Segundo o princípio da tensão efetiva, a resistência ao cisalhamento depende da tensão normal efetiva, ou seja, a porção da tensão total que é transmitida através dos contatos entre as partículas. Esses parâmetros de resistência são determinados em laboratório através de ensaios específicos, como o ensaio de cisalhamento direto e o ensaio triaxial (LAMBE; WHITMAN, 1969).

Equação 1 - Critério de resistência de Mohr-Coulomb

$$\tau = c + (\sigma - u)$$

Em maciços rochosos, a resistência ao cisalhamento é um conceito mais complexo, pois é governada tanto pela resistência da rocha intacta quanto, e principalmente, pelas descontinuidades geológicas (GOODMAN, 1989). A presença de falhas, fraturas e juntas com baixa resistência pode se tornar o ponto fraco de toda a estrutura. A estabilidade de um talude rochoso é, portanto, diretamente influenciada pelas propriedades de cisalhamento dessas descontinuidades, bem como pela sua orientação em relação à face do talude. A análise dessas características é vital para prever os mecanismos de ruptura e para o projeto de taludes rochosos seguros (HOEK; BRAY, 1981).

### **3.2 A Influência da Água na Estabilidade de Taludes**

A presença de água é um dos fatores mais críticos e frequentemente decisivos para a estabilidade de taludes, tanto em solo quanto em rocha. Ela atua como um agente de instabilidade ao modificar as propriedades mecânicas do material e ao adicionar forças que promovem o movimento.

O princípio central para compreender essa influência é o princípio da tensão efetiva, formalizado por Terzaghi. De acordo com esse conceito, a resistência ao cisalhamento de um material geotécnico não depende da tensão total (o peso do material acima), mas sim da tensão efetiva ( $\sigma'$ ), que é a porção da tensão total ( $\sigma$ ) transmitida através dos contatos entre as partículas. A água, ao preencher os vazios do material, exerce uma pressão hidrostática denominada poropressão ( $u$ ). Essa poropressão se opõe à tensão total, reduzindo diretamente a tensão efetiva ( $\sigma' = \sigma - u$ ) e, conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do material. Essa



compreensão é particularmente crucial em formações de baixa permeabilidade e alta retenção de umidade, como o filito e o saprólito, onde a água pode se acumular e causar instabilidade crítica. (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

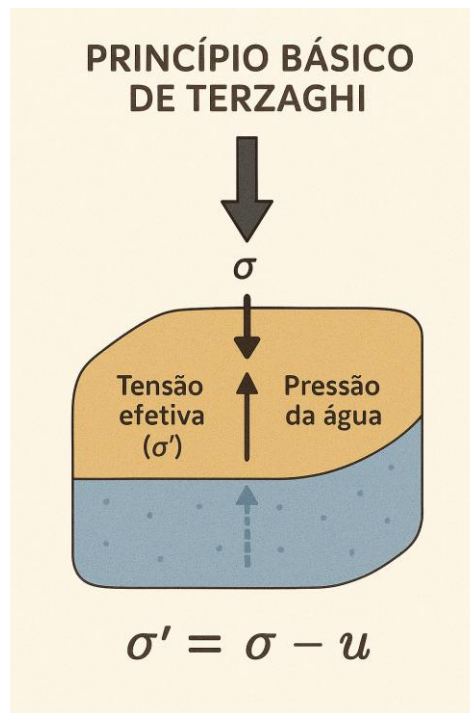


Figura 1 - Representação da equação da tensão efetiva de Terzaghi

Em maciços de solo e rocha, o aumento da umidade ou a saturação completa do maciço elevam a poropressão. Em solos, a saturação reduz a coesão e o atrito interno, podendo levar à liquefação em solos não coesivos. Em maciços rochosos, a água penetra nas descontinuidades (fraturas e falhas), gerando uma pressão que atua como uma força de empuxo. Essa pressão pode se acumular e ser suficiente para empurrar um bloco de rocha para fora da face do talude (HOEK; BRAY, 1981). O peso do talude, quando saturado, aumenta, elevando as tensões que promovem o movimento. Em taludes de rocha, a água pode ainda atuar como um lubrificante nas superfícies de descontinuidade, diminuindo o atrito e facilitando o deslizamento. Por esses motivos, o controle e o gerenciamento da água, por meio de sistemas de drenagem, são ações essenciais para manter a estabilidade em taludes de mineração (ORTIGÃO; CUNHA, 2002; DUNCAN; WRIGHT, 2005).

A presença de água no maciço rochoso ou de solo é o principal fator de desestabilização geotécnica, mas a compreensão desse mecanismo deve ir além da

simples elevação do nível freático. É crucial reconhecer que a ruptura de taludes, especialmente em solos residuais (saprólitos), não exige a saturação total, mas sim o atingimento de um grau de saturação crítico que destrói a coesão do material. A resistência ao cisalhamento em solos não saturados é governada pela tensão efetiva, que por sua vez é influenciada pela sucção matricial ( $U_a - U_w$ ) onde  $U_a$  é a pressão neutra do ar e  $U_w$  é a pressão da água. Em condições de baixa saturação (solo relativamente seco), a sucção matricial cria uma "coesão aparente" que contribui significativamente para a estabilidade do talude (FREDLUND; RAHARDJO, 1993). O problema ocorre quando há a redução dessa sucção devido à infiltração de água. Mesmo que o grau de saturação permaneça abaixo de 100% (ou seja, a água não preencha todos os vazios), um aumento moderado na umidade pode ser suficiente para destruição da coesão aparente e aumento da poropressão.

### **3.3 Propriedades e Comportamento Geotécnico de Filito e Saprólito**

O filito é uma rocha metamórfica foliada de baixo a médio grau, derivada principalmente da metamorfose de argilitos ou ardósias sob condições moderadas de temperatura e pressão (RAMAMURTHY, 1993; ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2024). Mineralogicamente, é composto predominantemente por sericita, muscovita, clorita e quartzo. A estrutura do filito é caracterizada por foliação bem desenvolvida, granulação muito fina e anisotropia acentuada, o que faz com que suas propriedades mecânicas variem de acordo com a orientação dos planos de clivagem.

Em condições secas, o filito apresenta resistência relativamente alta; contudo, quando saturado, ocorre redução significativa da resistência à compressão e facilidade de cisalhamento ao longo da foliação (RAMAMURTHY, 1993; WEN *et al.*, 2022).

A presença de água exerce papel crucial no comportamento geotécnico dos filitos. A foliação e as microfissuras funcionam como caminhos preferenciais de percolação, resultando em um fluxo hidráulico anisotrópico. A água tende a reduzir a coesão e o atrito interno entre as lâminas micáceas, além de promover alterações químicas nos minerais sericíticos e argilosos. Assim, o aumento da umidade pode ocasionar perda de resistência e maior

deformabilidade, favorecendo processos de instabilidade em taludes e escavações (WEN *et al.*, 2022).

O saprólito é um material de alteração *in situ*, resultante do intemperismo químico e físico de uma rocha mãe. Apesar de bastante alterado, mantém a estrutura original da rocha, sendo considerado uma transição entre rocha e solo residual (MANDISODZA *et al.*, 2019). Os saprólitos apresentam alta porosidade, variabilidade de permeabilidade e baixa coesão, dependendo do grau de alteração e da composição mineralógica. A presença de óxidos de ferro e argilas secundárias confere coloração avermelhada e textura friável, frequentemente com preservação de estruturas originais da rocha mãe (MANDISODZA *et al.*, 2019). Sua resistência mecânica varia de saprólitos duros, próximos da rocha alterada, a saprólitos moles, que se comportam como solos residuais.

A água é o principal agente formador e modificador dos saprólitos. A ação da circulação da água acelera os processos de alteração mineral e lixiviação. Do ponto de vista geotécnico, a saturação desses materiais é crítica: o aumento da umidade provoca elevação das pressões neutras e redução da resistência ao cisalhamento, favorecendo movimentos de massa e erosões internas (MANDISODZA *et al.*, 2019).

### 3.3.1 Alta Erodibilidade

A erodibilidade, que é a suscetibilidade de um material ser removido pela ação da água, é elevada tanto no filito quanto no saprólito. O filito, devido à sua intensa foliação, pode desintegrar-se facilmente quando exposto às intempéries, com a água penetrando nas superfícies de descontinuidade. O saprólito, por sua vez, é um solo residual com baixa coesão aparente e estrutura granular, que pode ser facilmente arrastado pela chuva e pelo escoamento superficial. A alta erodibilidade pode causar o recuo da face do talude, a formação de sulcos e, em casos mais graves, o minamento da base da estrutura, levando à perda de suporte e, potencialmente, a uma ruptura em grande escala. A erodibilidade, que é a suscetibilidade de um material ser removido pela ação da água, é um problema sério tanto no filito quanto no

saprólito. A foliação intensa do filito é a principal causa de sua alta erodibilidade. A água penetra facilmente nas superfícies de descontinuidade, causando a desintegração do material em lâminas finas. Esse processo é acelerado pela ação do intemperismo, que enfraquece as ligações entre as lâminas.

O saprólito, por sua vez, é um solo residual com baixa coesão aparente e estrutura granular que pode ser facilmente arrastado pela chuva e pelo escoamento superficial. A remoção de partículas nas superfícies mais inclinadas (face do talude) pode causar a formação de sulcos e voçorocas, que, com o tempo, podem se aprofundar, comprometendo a estabilidade geral da estrutura. Em casos mais graves, a erosão pode minar a base do talude (footwall), levando à perda de suporte e, potencialmente, a uma ruptura em grande escala. (VITTOR, 2016).

A alta erodibilidade do filito e do saprólito agrava a instabilidade de duas maneiras:

- Perda de material: A remoção de solo e rocha superficial reduz a massa do talude, alterando as tensões internas e podendo levar a pequenas falhas superficiais que se não devidamente tratadas podem gerar rupturas.
- Exposição de material menos resistente: A erosão remove a camada superficial, expondo material mais alterado e menos resistente às ações da água.

A Figura 1 representa um conjunto de casos de erosões encontrados na berma de bancadas na mina, sendo elas resultado do fluxo das águas fluvial e a retenção e empoçamento da água e das características naturais estruturais do saprólito e do filito.



Figura 1 - Presença de erosão nas bermas da mina. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

A característica mais crítica e perigosa do filito e do saprólito é a acentuada perda de resistência ao cisalhamento quando o maciço está saturado. Esse fenômeno é uma consequência direta de suas propriedades únicas, que os tornam particularmente vulneráveis aos efeitos da água.

A baixa permeabilidade desses materiais é o ponto de partida do problema. Devido à sua granulometria fina e, no caso do filito, à sua estrutura foliada que dificulta o fluxo de água, esses maciços não conseguem drenar o excesso de umidade de forma eficiente. Quando a água preenche os vazios do material, ela fica retida, e a poropressão aumenta. Conforme o princípio da tensão efetiva, essa poropressão reduz a tensão efetiva do material, que é a tensão que de fato governa sua resistência (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

A diminuição da tensão efetiva provoca uma queda significativa nos parâmetros de resistência, como a coesão e, principalmente, o ângulo de atrito interno. Em taludes de filito, a água sob pressão nas discontinuidades pode

atuar como um agente de empuxo, reduzindo a resistência por atrito e desencadeando a ruptura (HOEK; BRAY, 1981).

### 3.4 Desafios da Gestão Hídrica em Minas a Céu Aberto

A gestão hídrica em minas a céu aberto é um dos pilares mais críticos para a sustentabilidade, segurança e conformidade ambiental de um empreendimento (RIBEIRO, 2018). A presença de água, seja superficial, subterrânea ou de processo, representa uma dualidade: é um recurso essencial para diversas etapas da operação, mas também a principal causa de problemas geotécnicos e ambientais (SANTOS, 2020). Uma gestão ineficiente pode resultar em inundações, instabilidade de taludes, prejuízos operacionais e, em casos mais graves, desastres ambientais (GOMES, 2021). Portanto, a pesquisa e a aplicação de soluções para esses desafios são temas de alta relevância na engenharia de minas e geotecnia.

A crítica central da engenharia geotécnica no contexto de taludes de mineração é a determinação e a manutenção de um Fator de Segurança (FS) adequado. O Fator de Segurança é a razão entre as forças que resistem ao movimento (resistência do material, como coesão e atrito) e as forças que impulsionam o movimento (tensão de cisalhamento, peso próprio do maciço). Matematicamente, o FS é expresso como:

Equação 2 – Equação fundamental do fator de segurança

$$FS = \frac{\text{Resistência do Material}}{\text{Tensão Atuante}}$$

Na prática, um FS igual a 1,0 indica que o talude está em estado de equilíbrio-limite, ou seja, na iminência da ruptura. Por isso, a ABNT e a prática da engenharia exigem que o FS para taludes permanentes seja superior a este valor, usualmente **1,3 a 1,5**, dependendo do risco de perda de vidas e dos danos econômicos e ambientais envolvidos (ABNT NBR 11682, 1991).

#### 3.4.1 Controle de Águas Superficiais (Pluviais)

A água de chuva é um dos principais desafios a serem gerenciados. Em minas a céu aberto, as grandes áreas expostas e a geometria em bancadas e rampas criam

um ambiente propício para o acúmulo e o escoamento descontrolado (SOARES, 2019). Os principais problemas associados a isso são:

- Erosão: O escoamento pluvial, especialmente em solos erodíveis como filito e saprólito, pode causar erosões nas bermas, pistas e taludes (LANA; SILVA, 2010). Isso compromete a estabilidade das estruturas, causa o recuo das faces e pode levar à perda de suporte do maciço rochoso. A erosão descontrolada também contribui para o carreamento de sedimentos para os corpos d'água, causando assoreamento e poluição (VITTOR, 2016).
- Inundação da Cava: O acúmulo de água no fundo da cava pode interromper as operações de lavra e carregamento, tornando as pistas escorregadias e danificando equipamentos (SANTOS; SAMPAIO, 2002). Para resolver esse problema, são necessários sistemas de bombeamento e drenagem, que por sua vez aumentam o custo operacional e o consumo de energia (HOEK; BRAY, 1981).
- Contaminação da Água: A água da chuva que entra em contato com o material rochoso exposto, especialmente em minas de sulfetos, pode gerar Drenagem Ácida de Mina (DAM) (BRUNNER, 2017). Esse fenômeno acidifica a água e carrega metais pesados e outros contaminantes, representando um grave risco de poluição para rios e aquíferos (FERREIRA, 2019).

A aplicação de softwares de modelagem e simulação geotécnica tem se mostrado fundamental para compreender o comportamento de materiais complexos como filitos e saprólitos, especialmente frente às variações de saturação e às condições anisotrópicas de resistência. Por meio de programas como o PLAXIS 2D/3D, GeoStudio, FLAC e Rocscience, é possível realizar simulações numéricas baseadas em elementos finitos ou diferenças finitas que reproduzem o comportamento tensão-deformação desses materiais sob diferentes condições de umidade, poropressão e orientação estrutural. Estudos recentes demonstram que essas ferramentas permitem avaliar com maior precisão a influência da foliação em filitos e a heterogeneidade dos saprólitos na estabilidade de taludes e fundações, possibilitando a calibração de parâmetros obtidos em ensaios laboratoriais e de campo (WEN *et al.*, 2022; MANDISODZA *et al.*, 2019). Tais simulações também contribuem para a previsão de cenários de instabilidade induzidos pela infiltração de

água, além de auxiliar no dimensionamento de sistemas de drenagem e na definição de fatores de segurança mais realistas para condições naturais e pós-intervenção

Para mitigar esses problemas, as mineradoras utilizam sistemas de drenagem superficial que incluem canaletas, bueiros, bacias de sedimentação e poços de captação (SILVA, 2015). O planejamento desses sistemas deve ser dinâmico e se adaptar ao avanço da lavra. O uso de tecnologias como veículos aéreos não tripulados (VANTS) e geoprocessamento tem se mostrado eficaz no diagnóstico e no planejamento preventivo da drenagem (SOUZA, 2021).

### 3.4.2 Influência da Água na Perfuração e Desmonte

A etapa de perfuração é uma das primeiras a ser impactada pela presença de água nas bancadas ou pela elevação do nível freático. A saturação do material torna a rocha mais macia e dificulta a penetração das brocas, reduzindo a eficiência do processo e aumentando o tempo necessário para a execução dos furos. Além disso, a instabilidade gerada pela umidade pode provocar o colapso das paredes dos furos antes mesmo da inserção dos explosivos (GUIDICINI; NIEBLE, 1993), exigindo retrabalho e aumentando o consumo de energia e de insumos. Outro problema recorrente é a contaminação dos explosivos pela água, especialmente no caso do ANFO (Nitrato de Amônio e Óleo Combustível), cuja sensibilidade à umidade é elevada. A infiltração de água pode dissolver o nitrato de amônio, reduzindo significativamente a potência do explosivo ou tornando-o completamente inoperante (BRUNNER, 2017). Para contornar essa limitação, é necessário empregar explosivos à prova d'água ou revestir os furos com mantas plásticas, soluções que, embora eficazes, elevam o custo operacional e o tempo de carregamento.

A presença de água também contribui para o aumento do desgaste das brocas e dos componentes das perfuratrizes, ocasionando mais paradas de manutenção e reposição de peças. No desmonte, as consequências são igualmente expressivas: a detonação de explosivos contaminados pela água resulta em fragmentação ineficiente da rocha, gerando blocos superdimensionados que não podem ser processados diretamente e exigem etapas adicionais e onerosas de britagem secundária. Em maciços rochosos saturados, a água contida nos poros e fissuras atua como um amortecedor da energia de detonação, absorvendo parte da onda de



choque e diminuindo sua eficácia na fragmentação (HOEK; BRAY, 1981). Esse fenômeno torna o desmonte menos eficiente, reduz a produtividade e aumenta o risco de danos à estabilidade do maciço remanescente (SANTOS; SAMPAIO, 2002).

Após o desmonte, se não houver um planejamento adequado de drenagem e manejo das águas pluviais, a água acumulada pode intensificar processos de erosão nas pilhas de estéril e de minério fragmentado, arrastando partículas finas para o fundo da cava. Em minas que exploram minerais sulfetados, essa condição favorece a formação de Drenagem Ácida de Mina (DAM), agravando os impactos ambientais (FERREIRA, 2019).

### 3.4.3 Custos Operacionais

A influência da água nas operações de mina não se limita aos impactos técnicos imediatos, mas estende-se profundamente à esfera econômica e estratégica da gestão do empreendimento. A necessidade constante de controle do nível freático e de drenagem da cava representa um dos principais componentes do custo operacional, devido à operação contínua de bombas, manutenção de sistemas hidráulicos e consumo elevado de energia elétrica (PFEIFER, 2016). No entanto, os custos não se restringem à infraestrutura física: a eficiência da gestão hídrica está diretamente ligada à produtividade global da mina. Uma drenagem mal dimensionada, por exemplo, pode provocar paralisações não planejadas, afetando cronogramas de lavra, contratos de fornecimento e fluxos logísticos (GOMES, 2021). Além disso, o excesso de água influencia o design mineiro taludes mais suaves e rampas alongadas são frequentemente adotados como medida de segurança, o que aumenta o volume de estéril movimentado e reduz a relação estéril/minério (HOEK; BRAY, 1981).

Sob a ótica geotécnica, a água interfere na eficiência da operação de escavação e na estabilidade das estruturas, exigindo medidas corretivas e preventivas que se traduzem em custos adicionais. Drenos horizontais, poços de alívio e instrumentação de monitoramento são essenciais para reduzir a poropressão e preservar a integridade dos taludes, mas representam investimentos contínuos (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Por fim, deve-se considerar o impacto financeiro decorrente da conformidade ambiental. O tratamento de efluentes contaminados por Drenagem Ácida de Mina

(DAM) e o controle de sedimentos demandam tecnologias avançadas de neutralização e filtragem, além de monitoramento constante da qualidade da água (FERREIRA, 2019). O descumprimento de exigências legais acarreta penalidades, suspensão de licenças e danos reputacionais, configurando custos indiretos, porém significativos. Dessa forma, a gestão hídrica eficiente, quando integrada ao planejamento econômico e geotécnico da mina, não deve ser vista apenas como uma obrigação operacional, mas como um investimento estratégico na sustentabilidade e na competitividade de longo prazo do empreendimento.

#### 3.4.4 Problemas Associados à Drenagem Inadequada

Uma drenagem ineficaz pode gerar problemas de longo prazo que se estendem além da vida útil da mina. A falta de controle da água superficial pode resultar em erosão severa e transporte de sedimentos para cursos d'água vizinhos (FREEZE; CHERRY, 1979). A infiltração de água nas pilhas de estéril ou de rejeitos pode lixiviar metais pesados ou minerais sulfurados, gerando a drenagem ácida de mina (DAM), um dos maiores desafios ambientais da indústria. Além disso, a gestão inadequada da água no fundo da cava pode levar à formação de lagos de cava (pit lakes) com baixa qualidade de água, representando um passivo ambiental de difícil remediação. A drenagem inadequada, portanto, não é apenas um problema operacional, mas uma questão de responsabilidade ambiental e social (LACERDA; FILHO, 2018).

### 3.5 Métodos de drenagem em Minas a Céu Aberto

A drenagem em minas a céu aberto é um conjunto de técnicas e procedimentos essenciais para o controle de águas superficiais e subterrâneas. O objetivo principal é garantir a estabilidade geotécnica dos taludes, a segurança das operações e a qualidade da água lançada no meio ambiente (ANA, 2021). A ausência ou a falha de um sistema de drenagem adequado pode resultar em instabilidade de taludes, interrupção das operações e danos a equipamentos.

A escolha do método de drenagem depende de fatores como a geologia do local, a pluviometria, a profundidade da cava, o tipo de minério e a presença de lençóis freáticos (NINANYA DE LA CRUZ *et al.*, 2014). Os métodos podem ser categorizados

em duas grandes abordagens: os convencionais, que tratam as águas superficial e subterrânea de forma distinta e pontual, e abordagens mais recentes, como a das Rampas Modulares, que integram a gestão da água ao projeto da lavra.

### 3.5.1 Métodos Convencionais

Os métodos convencionais de drenagem focam no controle e na remoção da água diretamente da área da lavra. Eles são amplamente utilizados na indústria e podem ser divididos em técnicas para o controle de águas superficiais e de águas subterrâneas (JUNIOR; LEITE, 1987). O enfoque do trabalho é na drenagem de águas superficiais, sendo projetado lidar com as águas da chuva que escoam pela área da mina. As principais técnicas incluem:

- **Valas e Canais de Drenagem:** As valas e canais de drenagem são as soluções mais comuns para o gerenciamento do escoamento superficial. Elas agem como a primeira linha de defesa, interceptando a água da chuva antes que ela cause danos maiores, como erosão ou instabilidade de taludes (DNIT, 2023). A função das valetas de proteção, por exemplo, é desviar o fluxo de água para fora de taludes de corte, impedindo a infiltração. Já os canais de condução, localizados nas bermas ou no pé dos taludes, coletam essa água e a transportam de forma controlada para pontos de descarga, como bacias de decantação. A eficácia dessas estruturas depende de sua geometria, que pode ser triangular, trapezoidal ou retangular, e do seu revestimento. Em áreas com alta vazão ou solo erodível, é crucial o revestimento com concreto, gabiões ou geomembranas para evitar o carreamento de sedimentos e a degradação da estrutura (LUNA, 2015). O dimensionamento dessas valas e canais é feito com base em cálculos hidráulicos para garantir que eles suportem o volume de água esperado (UFPA, 2024). O principal instrumento para isso é a Equação de Manning, que permite calcular a vazão (Q) e a velocidade do escoamento (V) em canais abertos sob regime uniforme. A equação é definida como:

Equação 3 – Equação de Manning para o cálculo de vazão e velocidade em canais abertos

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Onde (Q) é a vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$ ; (A) é a área da seção molhada em  $\text{m}^2$ ; (R) é o raio hidráulico; (S) é a declividade da linha d'água (ou do canal); e (n) é o coeficiente de rugosidade de Manning. Este coeficiente é um parâmetro empírico crucial, pois reflete o atrito do fluxo com as paredes e o fundo do canal. Ele varia em função do material de revestimento (por exemplo, 0,013 para concreto liso e valores maiores para canais revestidos em solo ou vegetação) e é determinante para garantir que a velocidade de escoamento não seja nem excessivamente alta (causando erosão) nem muito baixa (causando sedimentação).



Figura 2 - Vala de drenagem concretada em mina. Fonte: CONCRETO FLEXÍVEL, 2013.

- **Muro de Gabião:** O muro de gabião é uma estrutura versátil, usada tanto para contenção quanto para drenagem, especialmente onde o controle de erosão e a estabilização de taludes são críticos. Ele é composto por cestos de tela de arame de malha hexagonal, preenchidos com pedras de granulometria específica. A principal vantagem do gabião é sua permeabilidade natural, que permite que a água escoe livremente pelos espaços entre as pedras. Isso alivia a poropressão no solo e evita o acúmulo de água atrás da estrutura, o que o torna ideal para a estabilização de taludes e margens de rios com a presença constante de umidade (GEOSSINTEC, 2023). A flexibilidade do muro de gabião

também permite que ele se adapte a pequenas movimentações do solo sem fissurar, diferentemente de muros rígidos de concreto. Na mineração, ele é usado para proteger o pé de taludes, canalizar cursos d'água e construir muros de arrimo (DIPROTEC GEO, 2021). A combinação de gabiões com geotêxteis é comum, pois o geotêxtil atua como filtro, impedindo que o solo fino seja carregado pela água através da estrutura, garantindo sua eficiência a longo prazo.



Figura 3 - Muro de gabião para contenção de talude. Fonte: BELGO GEOTECH, 2025.

- **Escadas Hidráulicas:** As escadas hidráulicas, também conhecidas como escadas de dissipação de energia, são soluções para conduzir grandes volumes de água em taludes com alta declividade de forma segura. O principal objetivo dessa estrutura é reduzir a velocidade do fluxo de água, dissipando sua energia cinética em cada degrau para evitar a erosão severa do solo na encosta (TERRAGREEN, 2024). A escada é composta por uma série de degraus ou bacias que quebram a inclinação do terreno. Ao escoar sobre esses degraus, a água realiza o fenômeno do ressalto hidráulico, que reduz drasticamente sua velocidade e seu



poder de erosão. As escadas podem ser construídas com concreto, gabiões ou pedras encaixadas em colchões de gabião, dependendo da vazão e da velocidade esperadas. O correto dimensionamento é crucial para garantir a máxima dissipação de energia e a segurança do talude (BELGO GEOTECH, 2024). Na mineração, essas escadas são estratégicas para conduzir a água de valetas de crista de corte até o pé do talude, especialmente em locais de alta inclinação, onde um simples canal não seria suficiente para conter a força da água.



Figura 4 - Escada hidráulica de dissipação de energia. Fonte: TERRA GREEN, 2025.

### 3.5.2 A Abordagem das Rampas Modulares

Enquanto os métodos convencionais de drenagem se apoiam em estruturas fixas e, muitas vezes, de alto custo, a abordagem das rampas modulares surge como uma solução de engenharia mais flexível e econômica. Trata-se de uma técnica que integra o sistema de drenagem à própria geometria de lavra, utilizando o projeto da cava para direcionar o escoamento superficial de forma eficiente. O conceito de rampa modular permite que o sistema de drenagem seja adaptado às condições geotécnicas do local e evolua em conjunto com a operação da mina.

Este conceito propõe que as rampas de acesso à cava, em vez de serem meramente vias de transporte, sejam projetadas para também funcionar como canais de drenagem. Ao incorporar valas e canais com inclinação e formato adequados ao longo das bermas e no corpo das rampas, a água da chuva é interceptada e direcionada para fora da cava ou para pontos de coleta, como bacias de decantação, de forma controlada. O princípio é que a água não deve se acumular na base dos taludes ou nas bancadas, onde poderia saturar o solo e comprometer a estabilidade do maciço rochoso (MARQUES *et al.*, 2017).

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Descrição do caso de estudo

O estudo de caso foi desenvolvido em uma mina de ouro a céu aberto localizada em Paracatu, Minas Gerais, no sudeste do Brasil. A operação geotécnica na região é particularmente desafiadora devido às formações de rocha de filito e saprólito e a aproximação do limite de cava com comunidades locais. O projeto, detalhado no artigo de Azevedo, Carvalho e Marques, foi apresentado no evento Slope Stability 2024.

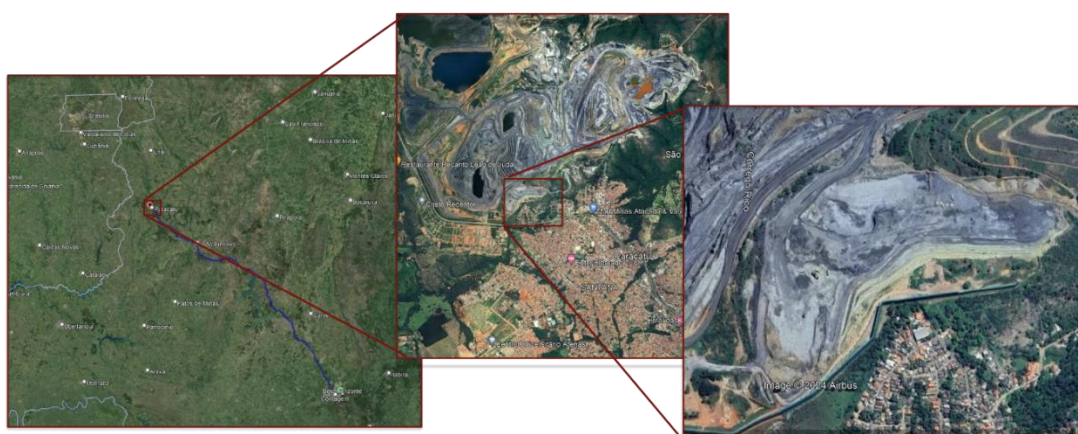


Figura 5 - Localização da mina Morro do Cruzeiro, Paracatu, Minas Gerais. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

O contexto do estudo é singular, pois parte do pit de lavra confronta os limites licenciados e a comunidade local ao sul da área de mineração, distanciamento de 150 metros. Essa proximidade impõe requisitos rigorosos para o planejamento da mina, a geometria de fechamento e as operações diárias, resultando na implementação de construção de barreira acústica, um controle de vibração mais rigoroso nos desmontes, com um limite de 3 mm/s. Para o controle de ruído, foi implementado um limite máximo de 40 decibéis, o que exigiu a redução do maquinário pesado ou a paralisação das frentes de lavra durante o período noturno. Adicionalmente, para o controle de poeira, foi aplicado um fluxo maior de caminhões-pipa, umidificando as vias com maior frequência. O contexto da mina e a sua proximidade com a comunidade são apresentados na Figura 5.





Figura 6 - Vista aérea da mina de Morro do Ouro, destacando a proximidade do pit de lavra com a comunidade adjacente. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

O pit de lavra apresenta diferentes camadas geológicas, incluindo solo, saprolito, rochas de diversas classes na zona de transição e rocha sã em profundidade. Apresentado esquema de perfil de intemperismo e testemunhos de sondagem na Figura 7.

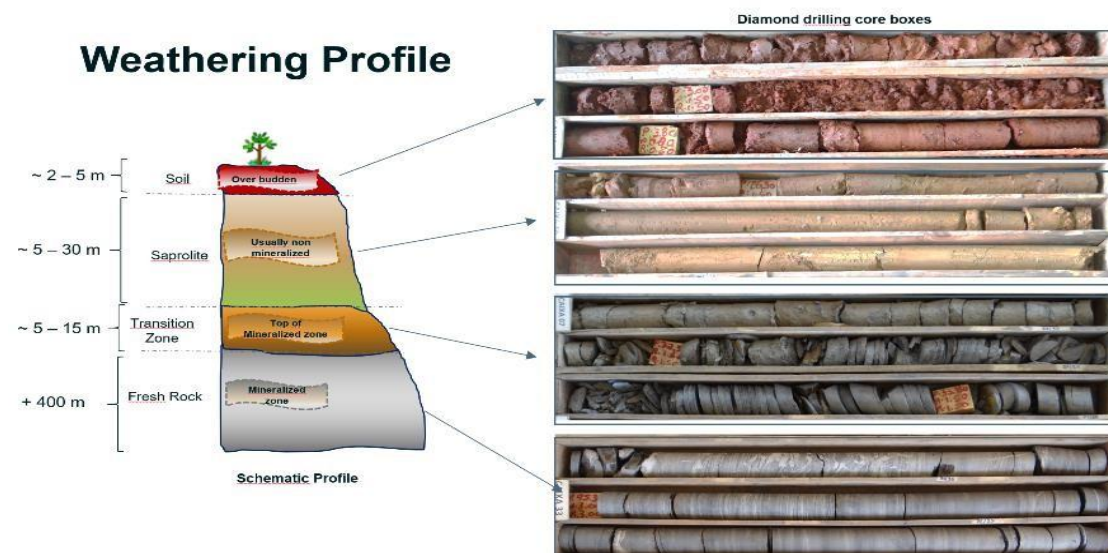


Figura 7 - Perfil esquemático de intemperismo do maciço rochoso, com as respectivas camadas geológicas. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

O problema central a ser abordado consistia nas dificuldades operacionais para o desenvolvimento de bancadas eficientemente drenadas nas formações de filito

e saprólito. As propriedades inerentes do filito, como a baixa permeabilidade, alta erodibilidade e a elevada capacidade de retenção de umidade, tornam a drenagem eficaz um desafio. A análise de falhas passadas na mina revelou que o empoçamento de água era uma das principais causas desses eventos em bancadas de material friável. O projeto buscou, portanto, otimizar a geometria da cava para mitigar esses problemas e, ao mesmo tempo, minimizar a necessidade de obras civis caras, como escadas hidráulicas, canais de concreto e muros de gabião.

## **4.2 Metodologia de drenagem proposta**

Para resolver os problemas de acúmulo de água e evitar a repetição de falhas históricas em bancadas de saprólito, a metodologia escolhida foi a implementação de rampas de drenagem modulares. Essa abordagem representou uma solução inovadora, viável e de baixo custo para otimizar a geometria da cava e evitar a dependência de estruturas de engenharia civil caras, como escadas hidráulicas, canais de concreto e muros de gabião. O principal objetivo era prevenir inundações nas bancadas, a formação de poças e as falhas nos taludes, canalizando a água de forma eficiente para os sumps de reservatório.

Uma das grandes vantagens desse projeto foi a capacidade de executá-lo com a equipe interna da empresa. Os métodos convencionais de drenagem, como escadas hidráulicas, canais de concreto e muros de gabião, frequentemente exigem a mobilização de empresas com mão de obra qualificada e recursos caros. Além disso, a contratação de empresas externas para essas obras, muitas vezes, leva tempo, com processos de licitação que podem durar cerca de 6 meses. A execução das rampas modulares com a equipe interna evitou esses longos prazos e a dependência de licitações.

A utilização de equipes externas para a realização de obras civis em uma mina também aumentaria o fluxo de pessoas e veículos no local, o que, por sua vez, eleva o risco de acidentes e compromete a segurança da operação. Ao contrário disso, o projeto de rampas de drenagem modulares foi executado por equipes internas, que já operavam no local. Essa abordagem minimizou os riscos, uma vez que as equipes já estavam familiarizadas com os rigorosos padrões de segurança da mina.

#### 4.2.1 Análise Geotécnica e Fatores de Projeto

A equipe do projeto analisou estudos de falhas anteriores nas bancadas com o objetivo de identificar os principais fatores que causaram esses eventos no passado. Para isso, foram estudadas fotografias e índices pluviométricos para compreender a dinâmica da água na mina. A principal preocupação era com a formação de poças de água, que, segundo o estudo, era a causa principal de falhas nas bancadas de material friável.

O gráfico de dados pluviométricos de dezembro de 2021 (Figura 8) serve para demonstrar a grande variação na precipitação diária no local. Durante esse mês, houve dias consecutivos sem chuva, mas também dia com chuvas intensas de mais de 100 mm. Essa variação demonstra a necessidade de uma estrutura robusta capaz de suportar um alto volume de água em um curto período de tempo sem sofrer danos. A análise desse padrão de chuva reforçou a importância do projeto de drenagem para mitigar os riscos de falhas causadas pelo acúmulo de água nas bancadas de filito e saprólito.

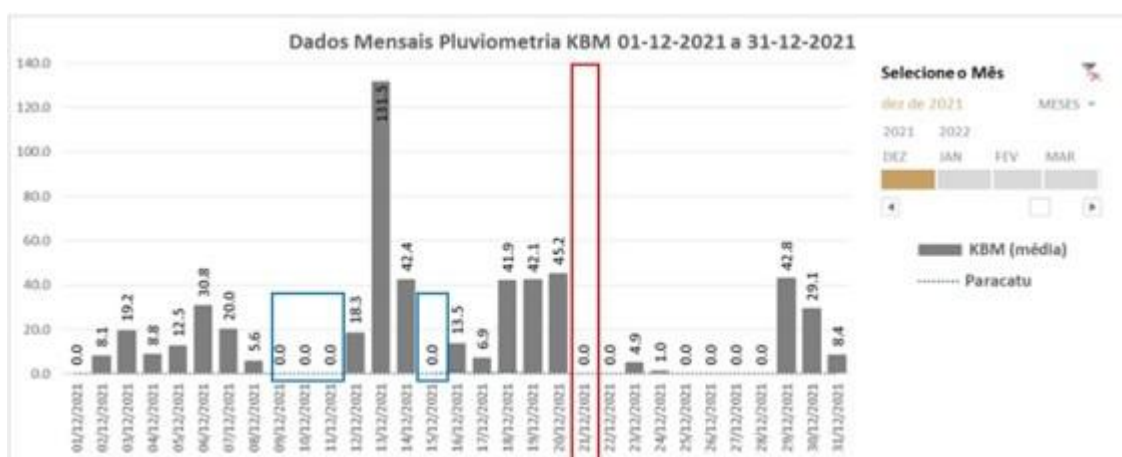


Figura 8 - Gráfico referente aos dados pluviométricos na mina no mês de dezembro de 2021. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

A análise do modelo geomecânico foi um fator determinante para o projeto. Uma atualização do modelo, realizada em janeiro de 2023, revelou um aumento na espessura da camada de solo saprólito de 22m para 44m na camada de rochas fracas. Essa alteração fez com que o projeto tivesse que lidar com quatro bancadas de rocha fraca em vez de duas. A estratigrafia do maciço rochoso foi analisada, revelando uma camada de solo, uma espessa camada de aproximadamente 40

metros de saprólito, uma camada de transição (composta por rochas de classe IV e III) e rocha sã (classes II/I) em profundidade.

A classificação geomecânica das rochas é uma etapa fundamental na caracterização de um maciço rochoso, pois permite definir o comportamento do material frente aos esforços de escavação, estabilidade e interação com a água. No contexto geotécnico, a classificação em classes de rocha (I a V) baseia-se principalmente no grau de alteração e de fraturamento do material, conforme proposto por autores como Terzaghi (1946), Bieniawski (1973) e sistematizado em metodologias amplamente utilizadas na engenharia de minas e obras civis.

De modo geral, as rochas de Classe I correspondem à rocha sã, com alta resistência, baixa permeabilidade e fraturamento mínimo, mantendo a estrutura original intacta. As rochas de Classe II apresentam leve alteração e fraturamento moderado, conservando ainda grande parte de sua resistência mecânica. As Classes III e IV representam materiais intensamente alterados e fraturados, com perda significativa da coesão e da resistência ao cisalhamento, sendo mais suscetíveis à degradação quando em contato com a água. Por fim, as rochas de Classe V correspondem aos saprólitos e solos residuais, materiais profundamente intemperizados, geralmente de comportamento transicional entre solo e rocha, caracterizados por elevada porosidade, baixa coesão e alta plasticidade (HOEK; BRAY, 1981).

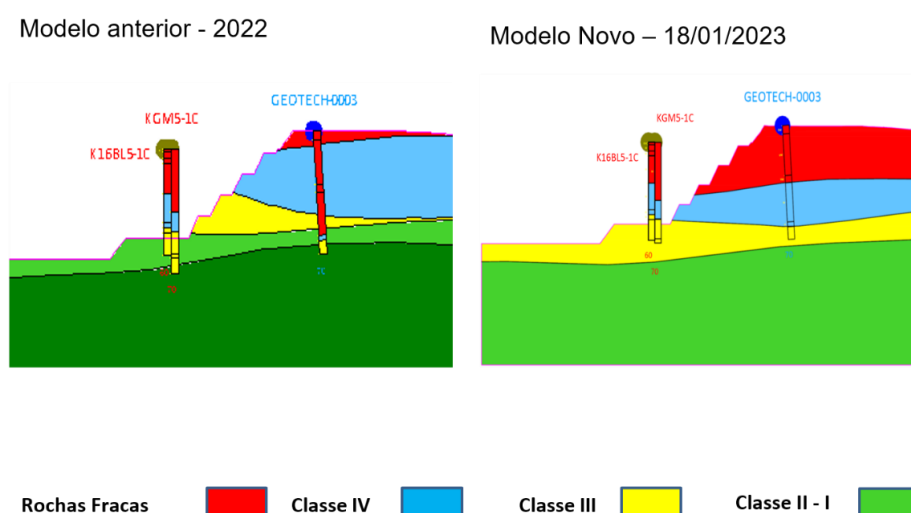


Figura 9 - Comparativo entre o modelo geomecânico antigo e o novo implementado. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.



#### 4.2.2 Detalhes Geométricos e Implementação da Solução

Os parâmetros geomecânicos demonstrados na Figura 10 destacam os critérios de design para cada classe de material, como o ângulo da face e a largura da berma. Para o solo e saprólito, os ângulos da face são de 55° e as bermas possuem 15 metros de largura. Para as rochas de classe III/IV, o ângulo da face é de 70° com bermas de 7 metros, enquanto para as rochas de classe I/II, o ângulo da face também é de 70°, mas com bermas de 9.5 metros. Esses parâmetros foram estabelecidos com base nas propriedades de Mohr-Coulomb dos materiais, onde a coesão (c) e o ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) são definidos para cada tipo de solo e rocha.

A decisão de assumir o risco de colapsos em bancadas únicas (single benches) foi tomada em consideração para viabilizar o projeto. Essa estratégia de risco foi adotada devido à proximidade da comunidade, o que exigiu um Fator de Segurança de 1.5, conforme indicado na imagem. O modelo geotécnico da imagem, mostrando a simulação da estabilidade do talude, valida que mesmo com a nova geometria, o fator de segurança de 1.601 foi alcançado, garantindo a segurança geral.

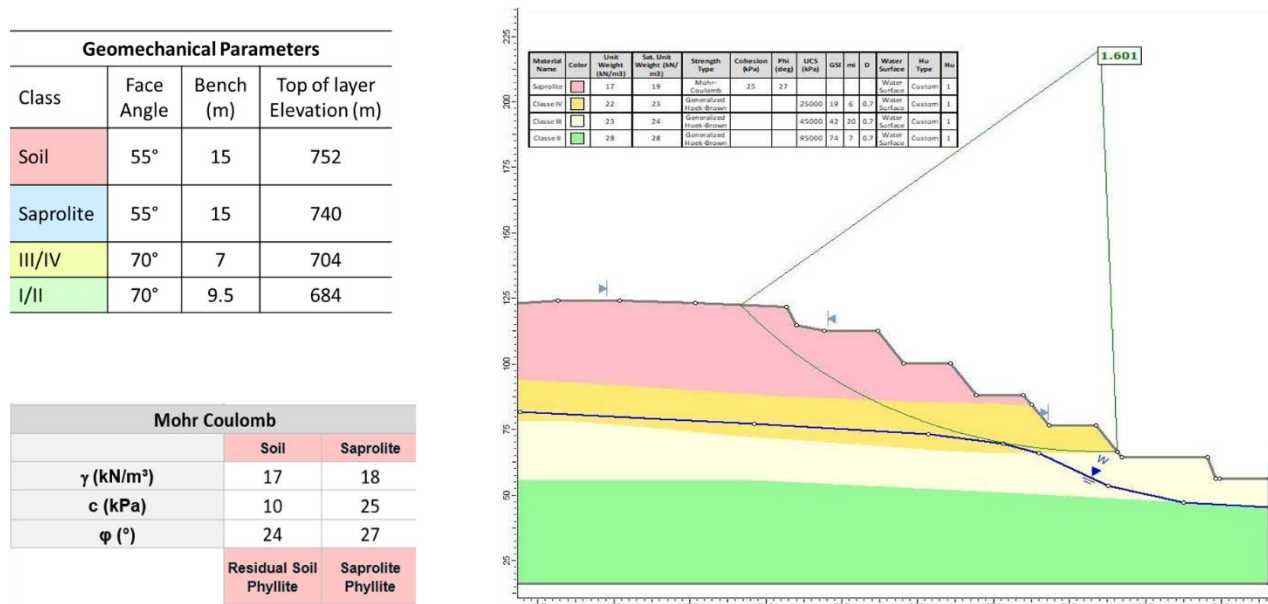


Figura 10 - A imagem dos parâmetros de design para cada classe de material. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

A solução de drenagem foi implementada com uma geometria específica, que se ajustou às bancadas já existentes da mina, de 12 metros de altura. As limitações de equipamentos levaram à necessidade de se utilizar um ângulo de face de 55° e bermas de 15 metros de largura, diferente do ângulo de face ideal de 40° e bermas

de 8 metros de largura. O projeto envolveu a implementação de 10 rampas modulares distribuídas estrategicamente na encosta, com aproximadamente 120 metros de comprimento cada, estendendo-se do ponto baixo da bancada superior até o ponto alto da bancada inferior, direcionando todo o escoamento para o leste.

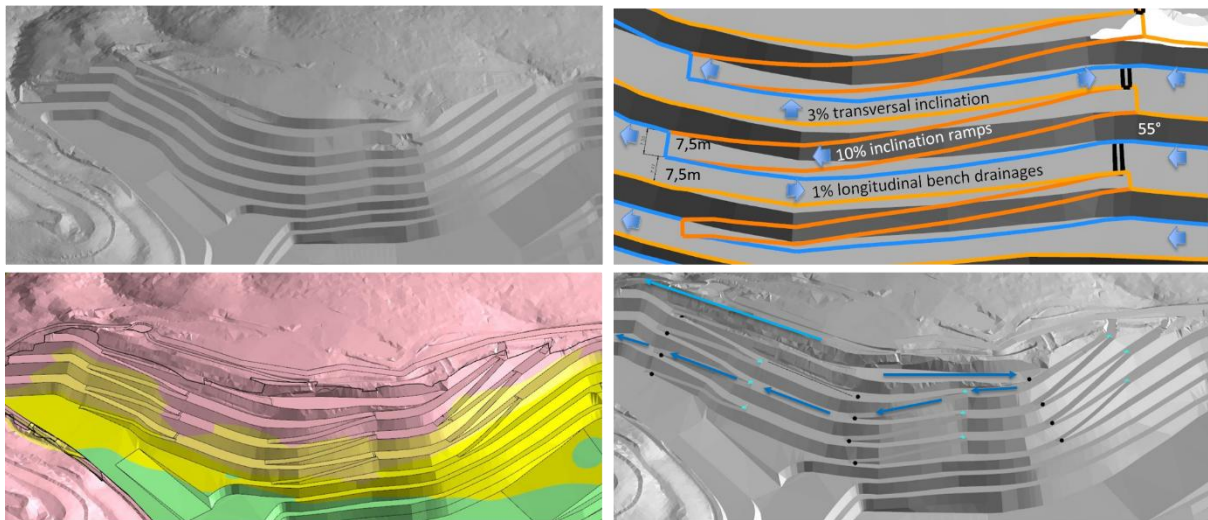


Figura 11 - Desing do modelo das rampas modulares. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

As bermas foram projetadas com inclinações de 1% longitudinal e 3% transversal. Essa inclinação foi planejada para que a velocidade do fluxo da água fosse baixa e não apresentasse risco de danos às bermas. Em contrapartida, as rampas possuíam uma inclinação de 8%, promovendo velocidades de fluxo mais altas, com uma média de 0.3 m/s e velocidade de até 0.45 m/s, garantindo o direcionamento eficiente da água. Mesmo com as velocidades mais elevadas, a estrutura das rampas foi planejada para permitir manutenção, caso ocorresse erosão local, já que as rampas de acesso possibilitam a circulação de equipamentos como caminhões e escavadeiras para reparos.

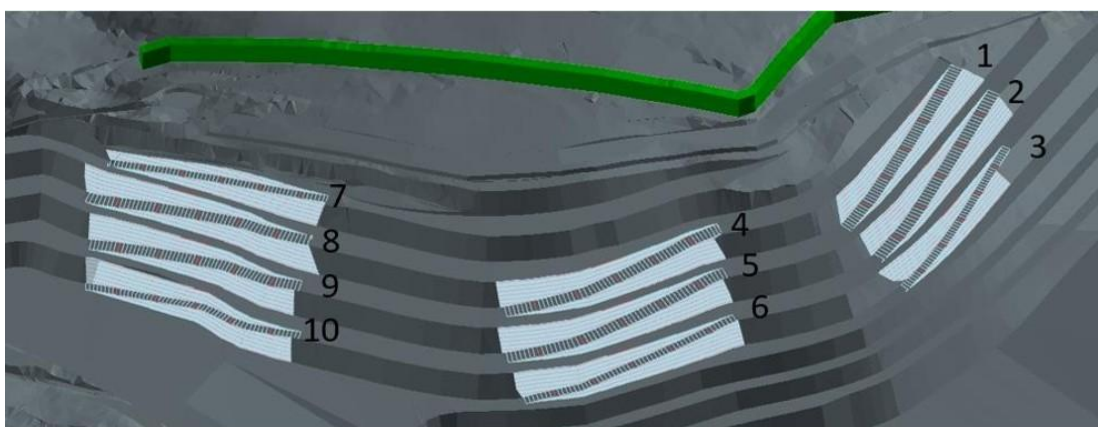


Figura 12 - Desing do modelo das rampas modulares. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

Estudos anteriores e simulações de cenários por empresa contratada foram realizados para otimizar os ângulos, o fluxo e o destino da água, utilizando o software HEC-RAS. As áreas de contribuição também foram calculadas para dar uma noção do fluxo de água, considerando uma taxa de recarga de 1.000 anos. A taxa de recarga de 1.000 anos, nesse contexto, não se refere a um processo geológico lento, mas sim a um cenário hidrológico extremo. Ela representa a magnitude de um evento de chuva de grande escala, ou seja, uma chuva tão intensa que estatisticamente só ocorre uma vez a cada 1.000 anos. Ao utilizar essa taxa de recarga nos cálculos, os engenheiros garantiram que o sistema de drenagem modular seria capaz de lidar com eventos pluviométricos excepcionalmente fortes e raros, reforçando a robustez e a segurança da estrutura.

Tabela 1 - Velocidade do escoamento da água por rampa

| <b>Rampas</b> | <b>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Fluxo<br/>Escoamento<br/>(m<sup>3</sup>/s)</b> |
|---------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>1</b>      | 0,008                            | 0,22                                              |
| <b>2</b>      | 0,015                            | 0,42                                              |
| <b>3</b>      | 0,003                            | 0,06                                              |
| <b>4</b>      | 0,004                            | 0,09                                              |
| <b>5</b>      | 0,008                            | 0,26                                              |
| <b>6</b>      | 0,009                            | 0,31                                              |
| <b>7</b>      | 0,018                            | 0,49                                              |
| <b>8</b>      | 0,001                            | 0,32                                              |
| <b>9</b>      | 0,021                            | 1,07                                              |
| <b>10</b>     | 0,008                            | 0,19                                              |

A geometria foi implementada apenas nos cortes de saprólitos e rochas. As zonas friáveis foram cortadas e mineradas utilizando escavadeiras e tratores de esteira para ajustes de geometria. O controle de qualidade e a precisão foram assegurados por meio da marcação topográfica de toda a estrutura, bancada por bancada, realizada antes dos cortes das máquinas. Com isso, a cada avanço de bancada, novas marcações para pés de bancada, cristas e rampas eram feitas para garantir que todas as geometrias fossem implementadas conforme o planejado.



Figura 13 - Equipamentos utilizados para cortar e lavar as zonas friáveis. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

### 4.3 Coleta e Análise de Dados

A coleta de dados deste Trabalho de Conclusão de Curso baseou-se na análise de um estudo de caso único, cujo material de referência foi o artigo "Drainage Ramps as a Solution for rainfall drainages on phyllite saprolite in a gold mine closure project", de Azevedo, Carvalho e Marques (2024). O método de análise consistiu na avaliação crítica das informações contidas na fonte primária, correlacionando os achados práticos da metodologia com os conceitos teóricos da Revisão Bibliográfica. O objetivo foi validar a eficácia da solução de engenharia proposta e discutir seus benefícios técnicos, econômicos e ambientais no contexto específico do estudo.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o conhecimento claro agora sobre a metodologia utilizada, agora se discorre a respeito dos resultados obtidos com a implementação das rampas de drenagem modulares na mina de Paracatu, seguido por uma análise crítica e uma discussão aprofundada de seus benefícios, em alinhamento com a fundamentação teórica exposta na Revisão Bibliográfica.

### 5.1 Análise e Discussão da Eficácia das Rampas de Drenagem Modulares

A abordagem de drenagem por rampas modulares, implementada na mina de Paracatu, representa uma resposta direta e inovadora aos desafios geotécnicos e hidrológicos, particularmente em formações de filito e saprólito. A metodologia adotada buscou, portanto, solucionar a questão da saturação do maciço rochoso, um fator crítico que reduz a resistência ao cisalhamento e promove a instabilidade de taludes. A Figura 14 que apresenta a checagem das rampas de drenagem e oferece evidências visuais e analíticas da eficácia da solução proposta.



Figura 14 - Verificação do escoamento da água em rampas de drenagem durante a estação chuvosa. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

Já a Figura 15 representa a visualização da topografia digital, confirmada por verificações semanais em campo e com o auxílio do software Deswik, ilustrando o desenho intencional das rampas e o direcionamento estratégico da drenagem onde as partes em azul claro representam as bancadas, e as partes em azul escuro indicam as rampas de maior inclinação, sugerindo a direção da drenagem. Isso demonstra a integração entre o planejamento da mina e o controle hídrico, um conceito-chave da abordagem de rampas modulares.

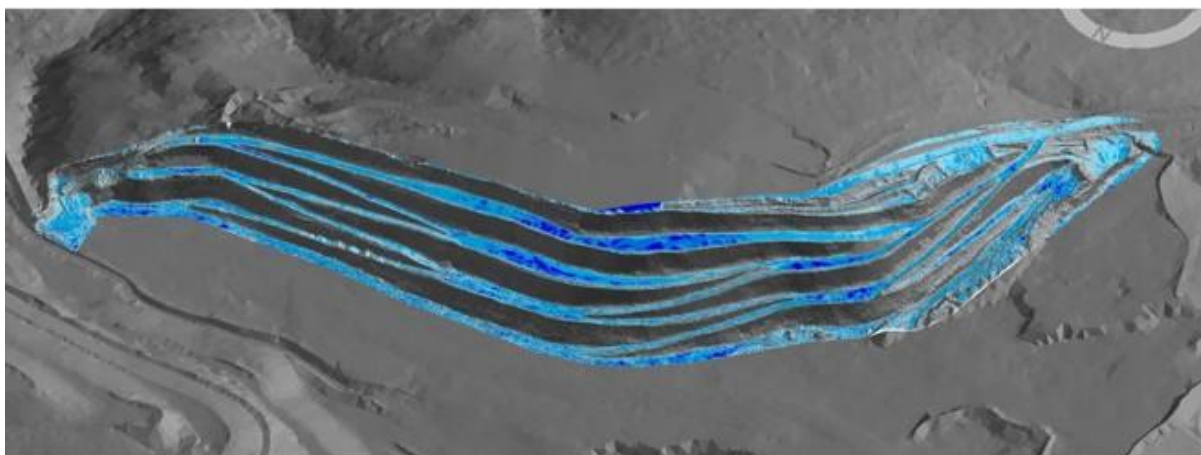


Figura 15 - Modelo topográfico de geometria da mina destacando a execução do projeto de drenagem. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

Os acompanhamentos em campo e por meio de softwares atestam que as rampas estão cumprindo seu propósito de interceptar a água da chuva nas bancadas e conduzi-la de forma controlada para canais e o fundo da cava. A observação de um fluxo contínuo e direcionado, em vez de empoçamento, valida o projeto que buscou evitar a saturação dos taludes, um problema recorrente em formações de baixa permeabilidade como o filito e o saprólito.

A geometria das rampas, com inclinações de 8%, foi planejada para promover velocidades de fluxo mais altas (média de 0.3 m/s e picos de 0.45 m/s), assegurando um escoamento eficiente e impedindo a formação de poças, principal causa das falhas passadas. As fotos demonstram que, mesmo com a velocidade mais elevada, a estrutura das rampas foi capaz de conter o fluxo e direcioná-lo adequadamente. Isso é de suma importância em um contexto onde a alta erodibilidade do filito e do saprólito representa um risco significativo de degradação das estruturas e perda de suporte na base dos taludes. O fato de o projeto ter sido concebido para permitir a circulação de equipamentos de mineração para manutenção, como tratores e escavadeiras, em caso de erosões locais, reflete uma abordagem pragmática e econômica que evita a necessidade de estruturas civis caras.

A eficácia do projeto foi evidenciada quando a estrutura resistiu a um evento de chuva de 181,2 mm em 6 horas, o que corresponde a uma precipitação de 5000 anos. Durante e após esse evento, não foram observadas anomalias, erosões ou colapsos. Esse resultado demonstrou a eficiência do sistema de drenagem em lidar

com volumes de água significativos, um dos principais desafios em formações de filito e saprólito.

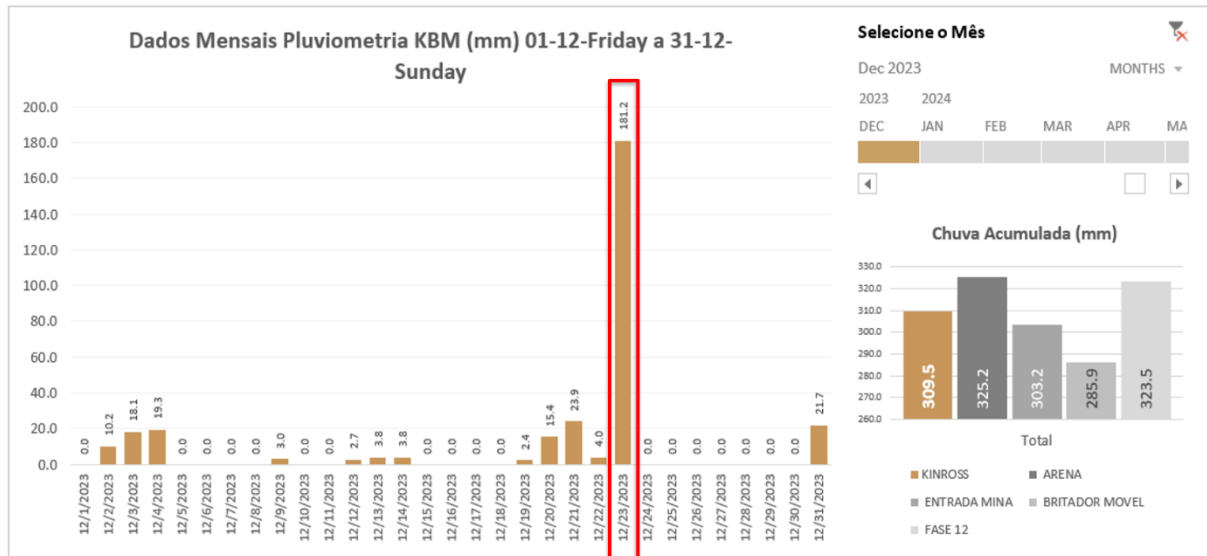


Figura 16 - Gráfico de Dados Mensais de Pluviometria KBM (mm) de 01 a 31 de dezembro de 2023, destacando o pico de chuva de 181,2 mm. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

Dessa forma, a análise visual e a observação de campo confirmaram que a metodologia de rampas modulares está em total consonância com os princípios geotécnicos de estabilidade de taludes. Ao controlar a água na sua origem e impedir a elevação da poropressão, o projeto contribuiu para a manutenção da tensão efetiva, garantindo a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso. Este sucesso inicial reforça a viabilidade e a eficiência da solução como uma alternativa de baixo custo aos métodos de drenagem convencionais.



Figura 17 - Resultado final do projeto. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.



## 5.2 Economia e Desempenho do Projeto

A solução de engenharia de rampas de drenagem modulares na mina de Paracatu não só se mostrou tecnicamente eficaz, mas também demonstrou uma superioridade econômica e operacional em relação aos métodos de drenagem convencionais. A mina obteve uma economia de aproximadamente US\$ 1.5 milhão, sem nenhum gasto com construções civis, como escadas hidráulicas, canais de concreto e muros de gabião.

A viabilidade econômica dessa abordagem é um diferencial marcante quando comparada às técnicas tradicionais. Conforme a revisão bibliográfica, os métodos convencionais de drenagem, exigem a instalação de estruturas fixas de alto custo. Esses métodos, além de demandarem investimentos significativos em materiais, também implicam em custos elevados com a mobilização de mão de obra qualificada e em despesas de manutenção a longo prazo.

A abordagem das rampas modulares, por outro lado, permitiu a incorporação do sistema de drenagem diretamente na geometria da mina. Isso foi possível através de um planejamento que utilizou o próprio recurso mineral e equipamentos de mineração já existentes, como escavadeiras e tratores, para moldar as estruturas de drenagem. As rampas foram projetadas para direcionar o escoamento superficial de forma eficiente, eliminando a dependência de caras estruturas de engenharia civil.



Figura 18 - Rampas de drenagem já implementadas e operantes. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

### 5.3 Hidrossemeadura e Perspectivas Futuras

Complementando a gestão hídrica, a hidrossemeadura foi um passo adicional para garantir a estabilidade das encostas de saprólito a longo prazo. O processo foi realizado em três etapas (outubro, dezembro e fevereiro) para promover a vegetação das encostas, preservando as estruturas de forma permanente e prevenindo a erosão nas faces dos taludes. Esta prática reforça a estratégia de sustentabilidade ambiental da operação, um benefício adicional da implementação das rampas de drenagem modulares.



Figura 19 - Crescimento da vegetação nas bancadas saprolíticas após a hidrossemeadura. Fonte: AZEVEDO *et al.*, 2024.

Olhando para o futuro, a metodologia de rampas de drenagem modulares se estabeleceu como um modelo de sucesso para a mina. O projeto da Fase 15, com previsão para 2025, já incorpora a mesma metodologia como parte de seu plano de longo prazo. A atualização do novo modelo geomecânico também foi utilizada como parâmetro para o planejamento dessas futuras rampas de drenagem, garantindo a continuidade da eficácia e segurança do método. A replicação da metodologia demonstra a confiança da empresa na solução de baixo custo, que se mostrou

eficiente na gestão da água, na estabilidade dos taludes e na otimização dos recursos.

#### **5.4 A Importância do Trabalho Multidisciplinar para o Sucesso do Projeto**

O sucesso do projeto de implementação das rampas de drenagem em Paracatu não pode ser atribuído apenas à inovação técnica da solução, mas também, e de forma crucial, ao forte entrosamento e à colaboração entre as equipes multidisciplinares da mina. O projeto exigiu o engajamento total das áreas de planejamento de mina, geotecnia, operação de mina, infraestrutura e meio ambiente.

A gestão hídrica em minas a céu aberto é um desafio complexo que envolve múltiplos setores, e a falta de comunicação entre eles pode comprometer todo o projeto. Neste caso, o engajamento de todas as equipes foi um dos maiores benefícios, permitindo que a solução de drenagem fosse implementada de forma coesa e eficiente antes do início da estação chuvosa.

Essa colaboração garantiu que as adaptações necessárias no modelo geomecânico fossem integradas ao planejamento, que a execução da nova geometria fosse precisa e que o monitoramento em campo fosse alinhado com as simulações em software. O projeto demonstrou que a cooperação entre os diferentes departamentos é fundamental para o desenvolvimento de soluções de baixo custo e alta eficiência, que geram economia e aumentam a segurança operacional da mina. A abordagem bem-sucedida de Paracatu se tornou um estudo de caso positivo, reforçando que o trabalho em equipe é um pilar essencial para a excelência em projetos de mineração.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este TCC analisou a eficácia e os benefícios técnico-econômicos e ambientais da implementação de rampas de drenagem modulares em uma mina a céu aberto localizada em Paracatu, Minas Gerais, com formações de filito e saprólito. O estudo de caso demonstrou que essa solução de engenharia de baixo custo é uma alternativa viável e eficiente para a gestão hídrica e a estabilidade de taludes.

Os resultados comprovaram a capacidade das rampas de drenagem em mitigar o acúmulo de água e a instabilidade em taludes de material friável. A eficácia do sistema foi atestada pela ausência de anomalias, erosões ou colapsos, mesmo após um evento de chuva de 181 mm em 6 horas. Este desempenho validou a premissa de que a gestão controlada da água, ao prevenir o aumento da poropressão, mantém a tensão efetiva e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso, um princípio fundamental da geotecnia.

Além dos benefícios técnicos, a implementação das rampas modulares gerou uma economia de aproximadamente US\$ 1.5 milhão, eliminando a necessidade de obras civis externas. Essa abordagem se destacou dos métodos convencionais por sua flexibilidade e baixo custo de execução, utilizando equipamentos de mineração já existentes e integrando o sistema de drenagem à própria geometria da cava. O projeto também contribuiu para a segurança operacional, ao reduzir riscos para os trabalhadores.

Um fator-chave para o sucesso do projeto foi o engajamento de equipes multidisciplinares, desde o planejamento até a execução. A colaboração entre as equipes envolvidas no projeto permitiu uma execução coesa e alinhada com os objetivos de segurança e economia.

Por fim, o estudo também evidencia a necessidade crítica de uma análise aprofundada dos recursos disponíveis. A experiência em Paracatu destaca que o estímulo ao desenvolvimento, à inovação e à busca pela excelência entre os colaboradores é um fator decisivo. Essa abordagem proativa e colaborativa resulta no surgimento de novas ideias e projetos que maximizam o potencial da equipe e otimizam a utilização dos recursos existentes da cava.

## 7 REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS

ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. *Slope stability and stabilization methods*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2002.

BARBOSA, A. L. *Tratamento de efluentes de mineração por filtração com membranas*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

BELGO GEOTECH. *Entenda por que fazer drenagem com gabiões em escadas de dissipação*. Belo Horizonte: Belgo Geotech, 2024.

BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. New York: Wiley, 1989.

BRITO, C. R. *Hidrogeologia aplicada à mineração: um estudo de caso em uma mina de ferro*. 2019. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BRUNNER, S. *Drenagem ácida de mina: avaliação e estratégias de mitigação*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2017.

CIANFLONE, P. *Water management challenges in open-pit mining: a case study on the impact of pit dewatering*. *International Journal of Mining Science and Technology*, v. 30, n. 3, p. 353–359, 2020.

DIPROTEC GEO. *Aplicação do geotêxtil Bidim no revestimento de canal em gabião no Córrego das Areias em Betim – Minas Gerais*. Diprotec Geo, 2021.

DNIT (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES). *Drenagem – Sarjetas e valetas – Especificação de serviço*. Norma DNIT 018/2023–ES. Brasília, 2023.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. *Soil strength and slope stability*. New York: John Wiley & Sons, 2005.

FERNANDES, J. *Monitoramento geotécnico em tempo real em minas a céu aberto*. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.



- FERREIRA, M. S. *Gerenciamento de recursos hídricos na mineração*. 3. ed. Belo Horizonte: Edições Técnicas, 2019.
- FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.
- GEOSSINTEC. *Muro de gabião: o que é, tipos, benefícios e como escolher*. Geossintec, 2023.
- GOMES, P. F. *Estabilidade de taludes e gestão hídrica em mineração de filito*. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- HOEK, E.; BRAY, J. D. *Rock slope engineering*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1981.
- JÚNIOR, C. D. S. S.; LEITE, A. M. B. C. *The use of ground penetrating radar for geotechnical investigations*. In: *International Congress on Rock Mechanics*, 1987.
- LACERDA, M. S.; FILHO, L. C. P. *Gestão de recursos hídricos em minas: o desafio da drenagem de cavas*. Belo Horizonte: Editora, 2018.
- LANA, C.; SILVA, A. *Propriedades geotécnicas e comportamento de solos residuais de filito*. *Revista Brasileira de Geotecnia*, v. 2, n. 1, p. 10–25, 2010.
- LUNA, H. A. *Manutenção em canais de irrigação revestidos em concreto*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- MARQUES, F. B.; LIMA, S. R.; SILVA, A. S.; FERREIRA, L. R. M. *Análise de soluções de engenharia para controle de drenagem em minas a céu aberto*. *Revista Geotecnia*, v. 45, n. 2, p. 115–128, 2017.
- MEDEIROS, J. P. et al. *Aplicações de modelagem hidrogeológica em desaguamento de minas e drenagem em pilhas de estéril*. In: *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, 17., 2021, Foz do Iguaçu. Anais... São Paulo: ABAS, 2021.
- NASTEY, M. *Hydrogeological considerations in mine planning and operation*. *CIM Magazine*, v. 7, n. 1, p. 57–61, 2012.

NINANYA DE LA CRUZ, H. D. *Modelagem numérica para avaliação do controle das águas na mineração*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

PFEIFER, R. S. *Rebaixamento de nível d'água em mineração a céu aberto*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016.

RIBEIRO, L. C. *Sustentabilidade e gestão de recursos hídricos na indústria de mineração*. Rio de Janeiro: Cengage Learning, 2018.

SANTOS, J. B.; SAMPAIO, F. A. *Erosão e instabilidade de taludes em solos residuais*. *Revista de Engenharia Civil*, v. 10, n. 3, p. 55–68, 2002.

SANTOS, P. R. *Reúso de água em mineração: uma abordagem sustentável*. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

SILVA, A. C. *Hidrologia e drenagem em minas a céu aberto*. 4. ed. Ouro Preto: Editora da UFOP, 2015.

SOARES, F. L. *O papel da água na estabilidade de taludes em rochas metamórficas*. 2019. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SOUZA, R. P. *Aplicação de drones no monitoramento ambiental de áreas minerárias*. 2021. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

TERRAGREEN BIOENGENHARIA. *Escada hidráulica: eficácia e inovação em projetos de engenharia geotécnica*. Belo Horizonte: Terragreen Bioengenharia, 2024.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. *Soil mechanics in engineering practice*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ (UFPA). *Drenagem de vias terrestres*. Belém: UFPA, 2024.

VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

VITTOR, G. A. *Análise de erodibilidade e suas implicações em taludes de mineração*. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. *Rock slope engineering*. 4. ed. London: Spon Press, 2004.