



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS DA ESCOLA  
DE MINAS



**CORNEILLE MIDOKPE FABRICE ALODJI**

**UTILIZAÇÃO DE DRENOS  
HORIZONTAIS PROFUNDOS PARA  
GERAR ESTABILIDADE E OTIMIZAR OS  
TALUDES DE MINA DE FOSFATO**

Ouro Preto, 2021

CORNEILLE MIDOKPE FABRICE ALODJI

UTILIZAÇÃO DE DRENOS HORIZONTAIS  
PROFUNDOS PARA GERAR ESTABILIDADE E  
OTIMIZAR OS TALUDES DE MINA DE FOSFATO

*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. Hernani Mota de Lima

Ouro Preto, 2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A453u Alodji, Corneille Midokpe Fabrice.

Utilização de drenos horizontais profundos para gerar estabilidade e otimizar os taludes de mina de fosfato. [manuscrito] / Corneille Midokpe Fabrice Alodji. - 2021.

52 f.: il.: color., gráf., tab., mapa. + Figuras.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. 2. Águas subterrâneas. 3. Solos - Umidade. 4. Minérios. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.136

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas



Departamento de Engenharia de Minas - DEMIN

---

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos trinta dias do mês de agosto de 2021, às 15h00min, foi instalada a sessão pública remota para a defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Corneille Midokpe Fabrice Alodji**, matrícula 15.1.1993, intitulado: **“UTILIZAÇÃO DE DRENOS HORIZONTAIS PROFUNDOS PARA GERAR ESTABILIDADE E OTIMIZAR OS TALUDES DE UMA MINA DE FOSFATO”**, perante comissão avaliadora constituída pelo orientador do trabalho, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, Prof. Dr. José Margarida da Silva e o Eng.º de Minas Caio Oliveira Rodrigues. A sessão foi realizada com a participação de todos os membros por meio de videoconferência, com base no regulamento do curso e nas normas que regem as sessões de defesa de TCC. Inicialmente, o presidente da comissão examinadora concedeu ao discente 20 (vinte) minutos para apresentação do seu trabalho. Terminada a exposição, o presidente concedeu, a cada membro, um tempo máximo de 20 (vinte) minutos para perguntas e respostas ao candidato sobre o conteúdo do trabalho, na seguinte ordem: primeiro o Prof. Dr. José Margarida da Silva, segundo o Eng.º de Minas Caio Oliveira Rodrigues e em último, o Prof. Dr. Hernani Mota de Lima. Dando continuidade, ainda de acordo com as normas que regem a sessão, o presidente solicitou ao discente e aos espectadores que se retirassem da sessão de videoconferência para que a comissão avaliadora procedesse à análise e decisão. Após a reconexão do discente e demais espectadores, anunciou-se, publicamente, que o discente foi aprovado por unanimidade, com a nota 8,8 (oito e oito), sob a condição de que a versão definitiva do trabalho incorpore todas as exigências da comissão, devendo o exemplar final ser entregue no prazo máximo de 15 (quinze) dias. Para constar, foi lavrada a presente ata que, após aprovada, foi assinada pela presidente da comissão. O discente, por sua vez, encaminhará para o Repositório Institucional da UFOP uma versão final, contemplando todas as recomendações apresentadas pelos avaliadores. Ouro Preto, 30 de agosto de 2021.

**HERNANI MOTA DE LIMA:46880488668** Assinado de forma digital por  
HERNANI MOTA DE LIMA:46880488668  
Dados: 2021.08.30 16:35:51 -03'00'

Presidente: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Membro: Prof. Dr. José Margarida da Silva

Membro: Eng.º de Minas Caio Oliveira Rodrigues

Discente: Corneille Midokpe Fabrice Alodji

## RESUMO

A interceptação do nível freático pela lavra caracteriza-se como um problema recorrente nas minas a céu aberto, sendo que, devido a este fato, diversas formas e procedimentos vêm sendo aplicados na prática atual da engenharia de minas com o escopo de se minimizar os impactos do nível freático nas frentes de lavras. Os impactos diretos e indiretos da umidade nas frentes lavras são diversos. Assim, um dos grandes desafios operacionais em uma mina a céu aberto é a retirada de umidade das frentes de lavra tornando a operação mais produtiva além de garantir o atendimento de todos os parâmetros geotécnicos para manter a estabilidade de todo maciço rochoso durante sua operação. O objetivo deste trabalho foi avaliar a recuperação de minério na lavra a partir da redução da umidade em uma frente de lavra de uma mina à céu aberto de fosfato após a instalação de DHP's (Drenos Horizontais Profundos). Para isso, avaliou-se a estabilidade do maciço por meio do *software* Slide com a possível alteração dos ângulos dos taludes na frente de lavra e verificou-se a quantidade de minério liberado. A justificativa desse trabalho se dá devido a necessidade de aumentar a quantidade de minério liberado, utilizando o máximo do recurso mineral disponível nessa mina, otimizando assim a sua exploração. Além disso, objetivou-se a avaliação do aumento da quantidade de matéria prima para a fabricação de fertilizantes e conseqüentemente otimizando a operação de mina/produção da empresa mineradora. Com o estudo realizado conseguiu-se lavar 1.188.642 t de minério, com teor médio de 11,67% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e relação de estéril/minério de 1,69 toneladas que não estava sendo computada no plano de produção da empresa devido a geometria da cava não possibilitar a lavra desse minério anteriormente.

Palavras-chave: Mineração; Drenos Horizontais Profundos; Rebaixamento de nível freático; Minério.

## **ABSTRACT**

A recurring problem in open pit mining is when a mine intercepts the groundwater. Several forms and procedures have been applied in current mining engineering practice to minimize groundwater level impacts on the mine's front. The direct and indirect impacts of moisture on the front are diverse. One of the major operational challenges at open pit mine is the removal of moisture from the mining fronts making the operation more productive and ensuring that all geotechnical parameters are met to maintain the stability of every rock's mass during its operation. The objective of this work was to evaluate the impact of moisture reduction on a mining front of an open pit phosphate mine after the installation of DHP's (Deep Horizontal Drains). "In order to do that, the rock mass stability was evaluated by the use of RocScience Slide software with the possible alteration of the slope angles in the mine's front and the amount of ore released was verified. The main purpose for this work is due to the need to increase the minimum amount released, using the maximum available mineral resources in this mine, thus optimizing the resources exploitation. In addition, the evaluation of the increase in the amount of raw material for the manufacture of fertilizers and consequently the optimization of the mining company's operation / production. This study resulted in an increase of mined ore of 1,188,642 t with an average content of 11.67% of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and waste / ore ratio of 1.69 this volume was not computed in the production plan once the pit geometry was not previously allowing mining operations at this ore.

Keywords: Mining; Deep Horizontais Drains; Lowering of the water table; Ore.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – DHP’s em operação – frente 2.....	15
Figura 2 - Desenho da área em estudo .....	16
Figura 3 - Terminologia usada.....	22
Figura 4 - Escorregamento. ....	23
Figura 5 - Rastejo .....	24
Figura 6 – Desprendimento de terra ou rocha .....	24
Figura 7 – Métodos para diminuição da inclinação de taludes.....	26
Figura 8 – Revestimeto do talude com grama esmeralda .....	27
Figura 9 – Aplicação de calda fluída de cal com aglutinantes fixadores.....	28
Figura 10 – Utilização de Bermas.....	29
Figura 11 – Componentes do Ciclo Hidrológico .....	30
Figura 12 – Métodos de drenagem superficial e profunda .....	31
Figura 13 - Exemplo de dreno horizontal profundo .....	35
Figura 14 – Perfis do lençol freático (baixo e alto) .....	37
Figura 15 – Condicionantes geológicos desfavoráveis à estabilidade de um talude .....	37
Figura 16 – Resultados de análise pela pesquisa do círculo crítico.....	39
Figura 17 - Operação estéril na área estudada .....	40
Figura 18 – Desenho das cavas estudadas.....	42
Figura 19 –Análise de estabilidade da seção A, cuja geometria apresentou FS maior que 1.3.....	43
Figura 20 – Análise de estabilidade da seção B, cuja geometria apresentou FS maior que 1.3.....	44
Figura 21 – Análise de estabilidade da seção C, cuja geometria apresentou FS maior que 1.3.....	45
Figura 22 – Área planejada com infraestrutura para lavra do local estudado .	46

Figura 23 – Diagrama de blocos..... 48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Check list</i> para seleção dos métodos de rebaixamento .....	33
Tabela 2 – Fatores de segurança global e local, obtidos considerando a cava atual .....	41
Tabela 3 – Fatores de segurança global e local, obtidos considerando a cava solicitada pela equipe de planejamento de lavra .....	41
Tabela 4 – Geometria proposta pela área de Geotecnia para a lavra da região estudada.....	45
Tabela 5 – Volumes de estéril e minério após alteração do ângulo de talude.	47

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>15</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
<b>4.1 Lavra a céu aberto</b> .....	<b>18</b>
<b>4.2 Geotecnia</b> .....	<b>21</b>
<b>4.3 Taludes</b> .....	<b>21</b>
4.3.1 Taludes e seus movimentos .....	23
4.3.2 Movimentos dos taludes e suas causas .....	25
4.3.3 Estabilização dos taludes .....	25
4.3.3.1 Diminuição da inclinação do talude .....	26
4.3.3.2 Revestimento do talude .....	26
4.3.3.3 Emprego de materiais estabilizantes .....	27
4.3.3.4 Muros de arrimo e ancoragem .....	28
4.3.3.5 Utilização de bermas .....	28
<b>4.4 Hidrogeologia</b> .....	<b>29</b>
4.4.1 Ciclo Hidrológico.....	30
4.4.2 Drenagem (profunda e superficial).....	31
4.4.3 Métodos para rebaixamento do Lençol Freático.....	31
4.4.4 Drenos horizontais profundos (DHP) .....	34
4.4.5 Impacto do nível da água na lavra à céu aberto.....	36
<b>4.5 Programa Slide</b> .....	<b>38</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>40</b>
<b>5.1 Indicadores de variação do nível de água no maciço estudado</b> .....	<b>40</b>

<b>5.2 Análises de Estabilidade da Região estudada .....</b>	<b>31</b>
5.2.1 Rebaixamento do Lençol Freático após instalação dos DHP's.....	42
5.2.1.1 Análise de Estabilidade da Seção A .....	42
5.2.1.2 Análise de Estabilidade da Seção B .....	43
5.2.1.3 Análise de Estabilidade da Seção C .....	44
5.2.1.4 Geometria aprovada pela equipe de Geotecnia.....	45
<b>5.3 Volume de Estéril e Minério a ser movimentado na área estudada.....</b>	<b>46</b>
<b>6 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>50</b>

## 1 - INTRODUÇÃO

Em empreendimentos de mineração, as atividades de lavra assumem uma relevância especial, uma vez que à lavra do bem mineral se impõe em diferentes frentes de avanço e limites cada vez mais extremos. Os desafios tornam-se cada vez mais ousados, principalmente em cavas em que o minério mergulha a grandes profundidades, exigindo-se a adoção de metodologias de escavação que possibilitem, de forma segura e econômica, a lavra da substância de interesse. Do ponto de vista geotécnico, a estabilidade de taludes constitui ferramenta essencial na definição final das geometrias da cava.

O tema deste trabalho de conclusão de curso é intitulado de **“utilização de drenos horizontais profundos para gerar estabilidade e otimizar os taludes de mina de fosfato”**. O tema tende a ser ainda mais amplo no contexto das minerações, por envolver análises da estabilidade dos taludes de pilhas de estéril, de taludes de barragens para contenção de rejeitos e até mesmo de taludes de vias ou acessos rodoviários. Em todos os casos, a boa prática implica a utilização de metodologias adequadas e consistentes. No domínio da cava, entretanto, estes estudos têm repercussão direta em termos da segurança operacional, uma vez que um eventual colapso de um talude pode ocasionar riscos à segurança de pessoal e equipamentos, comprometimentos/dificuldades operacionais das etapas primárias de lavra (perfuração, desmonte, carregamento e transporte) operações auxiliares da lavra.

Neste contexto, o estudo da estabilidade dos taludes de uma cava de mineração implica a determinação da geometria de escavação com acesso direto ao bem mineral de interesse e com a maior segurança possível. Esta geometria contempla a determinação dos ângulos dos taludes individuais, ângulos gerais da cava, alturas de bancadas e dimensões das bermas.

Este trabalho parte do seguinte questionamento de pesquisa. “Qual o ganho de minério liberado para a produção, caso houvesse uma redução significativa do nível de água subterrânea e da umidade no maciço após a instalação dos Drenos Horizontais Profundos (DHP's) e consequente aumento do ângulo dos taludes individual e geral?” Foram objetivos deste trabalho: simular a quantidade de minério liberada com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos para a redução

do nível de água subterrânea que reflete diretamente na umidade dos taludes em uma empresa mineradora. Além disso, buscou-se estimar a relação estéril/minério com a redução de umidade proporcionada pelo sistema de DHP's.

Este trabalho teve por justificativa a necessidade de aperfeiçoar as drenagens em minas a céu aberto que já chegaram ao nível de água subterrânea ou detêm frentes de lavra com excesso de umidade, em especial as que lavram em espessos mantos de intemperismo. Além da própria água, que pode se tornar um enorme transtorno operacional para a lavra, há ainda a questão da umidade dos taludes, que aumenta a instabilidade geotécnica e limita o ângulo de talude, podendo reduzir consideravelmente o volume de minério lavrável. A umidade do minério pode acarretar ainda enormes desafios ao longo do processamento mineral desde o transporte, britagem, empilhamento até a retomada para a usina de beneficiamento.

## **2 - OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho foi simular a quantidade de minério liberada com a utilização de sistema de drenos horizontais profundos para a redução do nível de água subterrâneo que reflete diretamente na umidade dos taludes em uma empresa mineradora. Além disso, estimou-se a relação estéril/minério com a redução de umidade proporcionada pelo sistema de DHP's.

### 3 – METODOLOGIA

Este trabalho considerou primeiramente a pesquisa bibliográfica referente aos conceitos iniciais relacionados às áreas de geotecnia, hidrogeologia e lavra de mina a céu aberto com os fundamentos teóricos e soluções para verificar os efeitos da utilização de drenos horizontais profundos para estabilidade e otimização de taludes.

Em seguida, realizou-se uma pesquisa de campo numa mina a céu aberto de fosfato. O estudo teve caráter exploratório da aplicação prática após a utilização do método de Drenos Horizontais Profundos em uma determinada região na mina. Após a instalação dos DHP's da frente 1, foram instalados 4 INA's (Indicador de Nível de Água) na região do maciço em estudo.

Na frente 2 não foi possível a instalação de INA's devido ao trânsito de equipamentos que operavam nesse local, porém foi possível visualmente evidenciar que foram cessadas surgências de água constantes em taludes superiores, e no INA-309 e INA-231, mesmo que distante dos DHP's, aconteceu o rebaixamento do nível d'água, conforme se mostra na figura 1.



Figura 1 - DHP's em operação – frente 2

Fonte: Relatório interno Hidrogeologia 2020

A equipe de hidrogeologia, após um período de quase 2 anos de operação dos

DHP's, com os dados de nível de água oriundos do monitoramento dos instrumentos novos e existentes na região, gerou a superfície potenciométrica que representa o nível de água subterrânea.

Diante do rebaixamento do nível d'água gerado pelos DHP's, verificou-se a possibilidade de ganho de lavra de minério pela equipe de produção da mina em conjunto com a equipe de planejamento de lavra hidrogeológica e geotécnica. Para isso foi proposta uma cava planejada visando a maior recuperação de minério, com o aumento dos ângulos de talude e estreitamento de bermas.

A Figura 2 mostra a cava da mina com a área estudada demarcada em vermelho, juntamente com seções A, B e C e o INA-330. As seções foram escolhidas porque tiveram maior interferência no maciço, com maior possibilidade de liberação de minério e menor lavra de estéril, garantindo uma menor relação estéril/minério (REM) e menor custo operacional. Somente o INA-330 aparece na figura porque é o que sofre maior influência da variação do lençol freático.

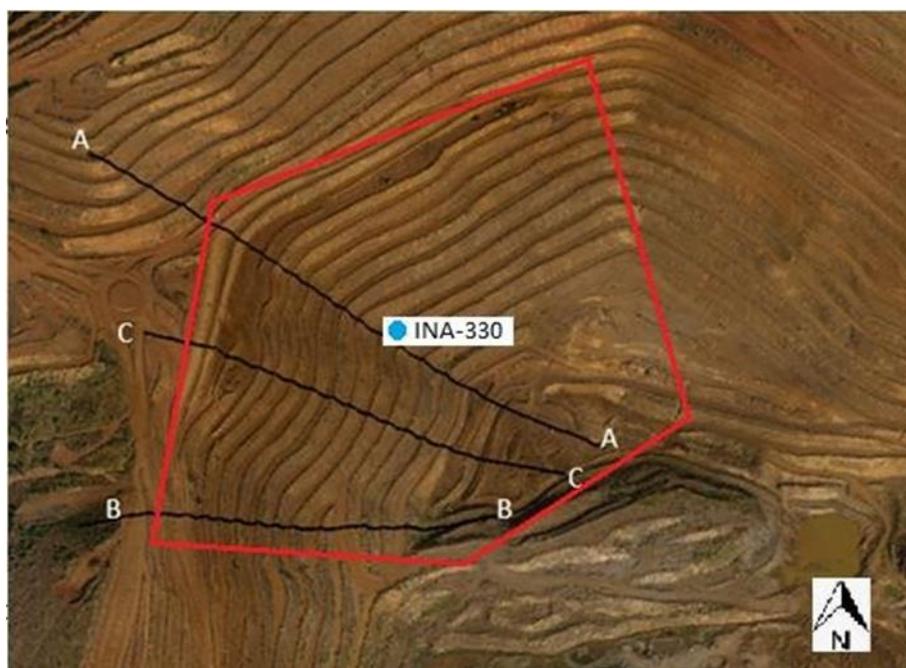


Figura 2 - Desenho da área em estudo

Fonte: Planejamento Lavra 2020

Após a elaboração da cava planejada, todo trabalho foi apresentado para a

equipe de geotecnia para avaliar se os ângulos de talude e larguras de bermas propostos garantiriam o fator de segurança praticado na empresa próximo a 1,3. Diante desses dados a equipe de geotecnia realizou várias simulações de ruptura de talude com o uso do software Slide nas seções apresentadas na figura 2.

A partir das simulações realizadas no programa Side, foi possível determinar a topografia da cava, larguras das bermas e ângulos de faces, que atendem ao fator de segurança praticado na mina e, com isso, chegar a uma cava que fosse viável operacionalmente e economicamente.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 – Lavra a céu aberto**

A lavra a céu aberto, conforme Wetherelt e Wielsen (2011), pode ser determinada como o método de escavação de qualquer depósito de minério próximo da superfície, por meio de um corte ou escavação, utilizando uma ou mais bancadas para retirar o minério e o estéril fora do limite de cava final.

Conforme Reis (2016), a engenharia geotécnica desempenha um importante papel em crescente escala, com grande relevância em empreendimentos de mineração e de obras civis, especialmente em termos de projetos de taludes. O autor acrescenta que atualmente a crescente importância que a estabilidade de taludes exerce em solos, rochas alteradas e rochas frescas deve-se às dimensões bem significativas impostas pelas escavações mineiras em uma lavra a céu aberto.

Segundo Damasceno (2018), uma iniciativa de mineração a céu aberto, funciona, frente as mais diversificadas obras de engenharia geotécnica. Nesta situação, não há inserção de um elemento permanente no maciço, como ocorre na construção de uma barragem, e sim, o desmonte contínuo deste. Porém, em ambas as obras, o monitoramento do desempenho dos elementos envolvidos, através de instrumentação, é constante.

O tempo de maturação de um empreendimento de mineração é mais lento, podendo existir grande distância temporal entre a descoberta de uma área com ocorrência considerável de minério e o início das operações efetivas de lavra. Porém, depois de iniciadas, as atividades se desenvolvem de maneira relativamente simples, podendo levar dezenas de anos até o esgotamento da reserva de minério da região. Entretanto, nem sempre uma mina é desativada pelo esgotamento do recurso mineral, mas sim devido ou as limitações técnicas que tornam a lavra técnica e economicamente inviável (DAMASCENO, 2018).

Segundo Girodo (2015), no caso das mineralizações se apresentarem em domínios profundos, o processo de extração do minério a céu aberto torna-se antieconômico, pois para poder ter acesso ao corpo mineralizado seria necessária a remoção de uma grande camada de estéril e cobertura vegetal. Neste caso, tendo se

tornado inviável o processo de exploração por um método a céu aberto, só resta a alternativa de se lavar o depósito mineral subterraneamente.

Nesta situação, Girodo (2015) define que a lavra a céu aberto nada mais é do que uma escavação ampla da superfície do terreno com o propósito de extrair minerais metálicos e não metálicos, em qualquer tipo de rocha. As lavras a céu aberto podem ser desde pequenas raspagens manuais na superfície do terreno até gigantescas escavações que alcançam centenas de metros em profundidade, podendo ocupar dezenas ou eventualmente até centenas de quilômetros quadrados em superfície.

De acordo com Redaelli e Cerello (1998) escavações a céu aberto podem envolver pequenos serviços executados por homens munidos de pás e picaretas até grandes serviços executados por equipamentos de grande porte. Adicionalmente, a capacidade e o poder de escavação dos equipamentos vêm crescendo com os anos, reduzindo assim a necessidade de desmonte do minério a partir do uso de explosivos, embora essa prática de desmonte seja ainda amplamente utilizada.

Conforme Girodo (2015), a lavra a céu aberto possibilita ampla flexibilidade na produção, a qual inclui a habilidade de se extrair 100% do minério existente dentro do corte; tal extração é feita até o ponto onde a relação estéril/minério sobe consideravelmente, tornando-a economicamente inviável. Uma das finalidades de um empreendimento mineral é o lucro, portanto é lógico chegar à conclusão que uma mina a céu aberto deve ir a uma profundidade onde o custo de energia despendida se aproxima, mas jamais excede o valor do mineral extraído.

Já Silva (2018) afirma que um empreendimento mineral a céu aberto pode ter grandes problemas com a falta de planejamento ou, em muitos casos, um planejamento inadequado, o que reflete na má escolha em relação aos equipamentos utilizados nas operações em geral dentro da mina, gerando desta forma desperdícios, diminuição de produtividade, e conseqüentemente, custos elevados.

O planejamento da lavra a céu aberto deve proceder concomitantemente com o seu estudo de viabilidade técnico-econômica. Quando se estabelece a escala de produção para o projeto mineiro definitivo, os estudos de lavra devem ser feitos de forma bastante detalhada para evitar possíveis erros futuros (GIRODO, 2015).

Ainda segundo Girodo (2015), o projeto de uma mina é um exercício especializado de engenharia econômica e, ao lado das soluções técnicas, o projetista deve também planejar as operações no decorrer dos anos, bem como, avaliar os produtos comercializáveis e os custos de capital e de operações envolvidos.

Os teores e outras características dos minérios são variáveis no espaço e, por consequência, também são os custos. Em alguns tipos de mineração (ex. ouro) costuma-se privilegiar o minério mais rico para assim maximizar o valor presente do fluxo de caixa. Na maioria das *commodities* minerais, contudo, esta alternativa não é válida, pois ao privilegiar o minério de melhor qualidade desequilibra-se a jazida e deixa-se de aproveitar o minério de pior qualidade. Em todos os casos, todavia, os fatores de controle são muito importantes, sendo determinados com a devida antecedência e assim procedendo, prevê-se temporalmente a quantidade e qualidade dos produtos comercializados e os custos envolvidos. Após uma cuidadosa análise de todas as condicionantes que poderão ocorrer, estabelece-se o método de exploração e os detalhes da operação que melhor atendam o projeto (CURI, 2014).

Para Girodo (2015), não existe um método de lavra que caracterize um empreendimento mineral, ou seja, cada método se aplica melhor a uma dada situação. Desta forma, conclui-se que a lavra a céu aberto se aplica melhor a certos tipos de situações e em outros casos não é viável a sua utilização.

Os métodos de lavra a céu aberto mais usados são representados basicamente por: Lavra por bancadas ("*Open Pit Mining*"), Lavra por Tiras ("*Strip Mining*"), Lavra Aluvionar ("*Placer Mining*") e Pedreiras ("*Quarry Mining*"). De acordo com Hartman (2012), a mineração em superfície (a céu aberto) inclui os métodos de escavação mecânica (a lavra por bancadas, lavra em tiras e pedreiras) e os métodos de escavação hidráulicos (lavras aluvionares).

## **4.2 - Geotecnia**

A geotecnia estuda o comportamento do solo e das rochas em decorrência das ações do ambiente e do homem. O conhecimento da formação geológica do local, o estudo das rochas, solos e minerais, bem como a verificação da presença e posicionamento do lençol freático, são fatores fundamentais antes de qualquer realização de construção e escavação, seja ela civil ou na mineração. (ABRÃO e OLIVEIRA, 2018)

Segundo Silva (2018), um projeto geotécnico de mineração consiste em levantamentos preliminares de dados pré-existentes, mapeamento geológico de superfície, execução de prospecção de subsolo, descrição geológico-geotécnica dos testemunhos de sondagem, realização dos ensaios geotécnicos, determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, determinação da hidrologia e hidrogeologia local, classificação geomecânica dos maciços rochosos e/ou setorização da cava por comportamentos geotécnicos distintos de materiais friáveis, elaboração de mapas e seções representativas, análises de estabilidade de taludes e definição das geometrias parciais e finais de escavação.

## **4.3 – Taludes**

De acordo com Caputo (2018), talude pode ser qualquer superfície em posição inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos. Além disso, podem ser naturais, vertentes ou casos de encostas, naturais ou artificiais, aterros ou taludes de cortes. A Figura 3 define claramente a terminologia adotada atualmente.

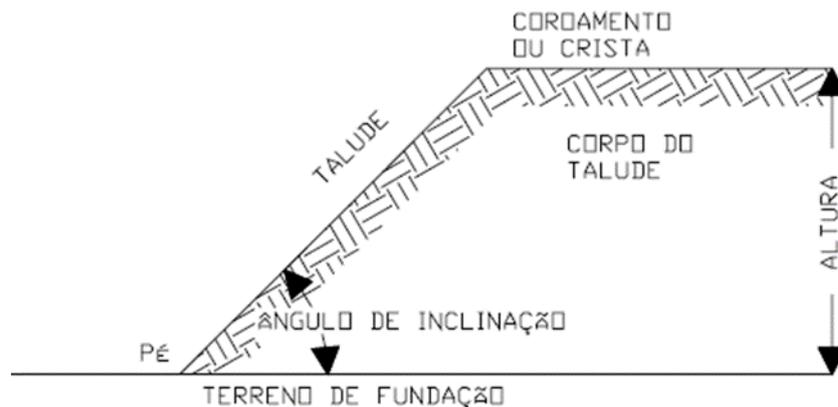


Figura 3 – Terminologia usada

Fonte: Caputo (2018)

O ângulo de um talude natural é o maior ângulo de inclinação para um determinado tipo de solo, ou rocha, exposto ao tempo, obtido sem ruptura do equilíbrio do maciço. Conforme Cardoso (2012), nos solos não coesivos (areias) esse ângulo praticamente coincide com o ângulo de atrito interno, e nos solos coesivos (argilas), que são bastante impermeáveis, teoricamente equivale a  $90^\circ$ . No entanto, a presença de fissuras devidas à retração por molhagem e secagem acaba permitindo a entrada de água no corpo do talude, que leva à sua instabilização. Como consequência, o ângulo de talude natural de solos coesivos situa-se em torno dos  $40^\circ$ . Em rochas o ângulo de talude depende das famílias de descontinuidades e de suas orientações.

Compreende-se da sua definição que na estabilidade dos taludes interferem condicionantes relativos à natureza dos materiais constituintes e dos agentes perturbadores, quer sejam de natureza geológica, antrópica ou geotécnica. (ABRÃO e OLIVEIRA, 2018)

De acordo com Fiori e Carmignani (2011), estas condicionantes tornam seu estudo bastante complexo, abrindo horizontes aos especialistas em geologia aplicada, mecânica dos solos e mecânica das rochas. O autor salienta a importância do estudo, devido aos inúmeros acidentes ocorridos em todas as épocas e em todas as partes do mundo, inclusive com perdas de vidas humanas e grandes prejuízos materiais.

#### 4.3.1– Taludes e seus movimentos

Conforme Caputo (2018), às formas de instabilidade de maciços terrosos, nem sempre se apresentam bem caracterizadas e definidas, podendo se classificar em três grandes grupos, sendo eles, escorregamento, rastejo e desprendimento de rocha ou terra.

- a) Escorregamento: deslocamento rápido de uma massa de solo ou de rocha que, rompendo-se do maciço, desliza para baixo e para o lado, ao longo de uma superfície (plano) de deslizamento, conforme Figura 4.



Figura 4 - Escorregamento

Fonte: Caputo (2018)

- b) Rastejo: Deslocamento contínuo e lento de camadas superficiais sobre camadas mais profundas, com ou sem limite definido entre a massa de terreno que se desloca e a que permanece estacionária. Curvatura de troncos de árvores, inclinação de postes e fendas no solo são indícios de rastejo.



Figura 5 - Rastejo

Fonte: Caputo (2018)

c) Desprendimento de terra ou rocha: é uma porção de um maciço terroso ou de fragmentos de rocha que se destaca do resto de maciço, caindo livre e rapidamente, acumulando-se onde estaciona.



Figura 6 – Desprendimento de terra ou rocha

Fonte: Caputo (2018)

#### 4.3.2 – Movimentos dos taludes e suas causas

De acordo com Associação Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental (ABGE, 2018 apud ABRÃO; OLIVEIRA, 2018), as fundamentais condicionantes dos escorregamentos e processos correlatos na dinâmica ambiental brasileira são:

- regime das águas de superfície e subsuperfície;
- características e distribuição dos materiais que compõem o substrato das encostas/taludes, abrangendo solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas;
- características climáticas, com destaque para o regime pluviométrico;
- características geomorfológicas, com destaque para inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas;
- características do uso e ocupação, incluindo cobertura vegetal e as diferentes formas de intervenção antrópica das encostas, como cortes, aterros, concentração de água pluvial e servida, etc.

Conforme Caputo (2018), geralmente constituem causas de um escorregamento o “aumento” de peso do talude (incluindo as cargas aplicadas) e a “diminuição” da resistência ao cisalhamento do material. Assim, a concomitância desses fatores nas estações chuvosas, ou pouco depois, explica a ocorrência da maioria dos escorregamentos nesses períodos de grande precipitação pluviométrica.

#### 4.3.3 – Estabilização dos taludes

Segundo Caputo (2018), especificamente sobre as obras de estabilização de taludes e encostas, é fundamental o conhecimento dos seus principais tipos, da sua forma de atuação e das solicitações que impõem ao terreno. Com base nesses dados são definidas as melhores soluções técnicas e econômicas para o problema de instabilização analisado. O autor informa que há vários métodos utilizados para a estabilização de taludes, dentre eles os mais utilizados são abordados nos tópicos 4.3.3.1 a 4.3.3.5.

#### 4.3.3.1 – Diminuição da inclinação do talude

Conforme Guidicini e Nieble (1993), mudar a inclinação do talude geralmente significa reduzir a altura do talude, ou reduzir seu ângulo de inclinação, sendo o meio mais barato de melhorar a estabilidade do talude. No entanto, nem sempre é a medida mais efetiva, pois a redução da altura ou ângulo, não só reduz as forças solicitantes que tendem a induzir a ruptura, mas também reduz a tensão normal e, portanto, a força de atrito resistente, que depende basicamente da tensão normal atuante na superfície considerada.

De uma maneira geral o método mais simples de reduzir o peso é a suavização do seu ângulo de inclinação conforme Figura 7a ou, então através da execução de um ou mais patamares conforme Figura 7b.

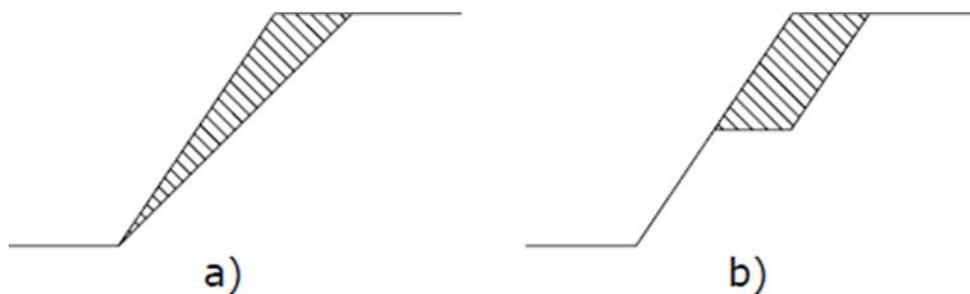


Figura 7 - Métodos para diminuição da inclinação de taludes

Fonte: Guidicini e Nieble (1993)

#### 4.3.3.2 – Revestimento da face inclinada do talude

Trata-se da plantação do talude com espécies vegetais ou qualquer tipo de grama, conforme Figura 8, adequadas ao clima local. Tem sido usado muito a “hidrossemeadura”, assim chamada porque a semeadura se dá por via líquida. A hidrossemeadura é um processo indicado para proteção contra o efeito dos agentes erosivos, como processos de mobilização e carreamento de partículas em áreas recém-terraplenadas, taludes de corte e aterro de baixa declividade, áreas com recobrimento da vegetação deficiente e quaisquer superfícies de solo desprotegidas.



Figura 8 – Revestimento do talude com grama esmeralda

Fonte: Autor (2021)

#### 4.3.3.3 – *Emprego de materiais estabilizantes*

Este processo visa melhorar as características de resistência dos solos, misturando-os com alguns produtos químicos. As injeções de cimento são particularmente recomendadas em casos de maciços rochosos fissurados.

Conforme Caputo (2018), tal processo também é utilizado para atender situações de proteção provisória, e até mesmo permanente, sendo empregada uma técnica baseada na pulverização de calda fluida de cal com aglutinantes fixadores sobre as superfícies de solo a serem protegidas. Para atender situações de proteção provisória, quando se pretende no futuro substituir a pintura de cal por algum tipo de revestimento vegetal de caráter paisagístico, bastaria apenas “arranhar” com um rastelo ou raspar a película de revestimento da pintura de cal e proceder de imediato o revestimento vegetal desejado, obviamente com os cuidados agrônômicos de praxe. Segue ilustração na Figura 9.



Figura 9 - Aplicação de calda fluída de cal com aglutinantes fixadores

Fonte: Caputo (2018)

#### 4.3.3.4 – Muros de arrimo e ancoragens

A execução de muros de arrimos convencionais ou a introdução de tirantes de aço no interior do maciço, ancorando-os fora da zona do escorregamento, constituem soluções para muitos casos que ocorrem na prática. Segundo Caputo (2018), a técnica de ancoragem no Brasil foi introduzida a partir de 1957, com os trabalhos pioneiros do Prof. Costa Nunes. Sua primeira aplicação em obras rodoviárias foi a ancoragem de blocos de rocha e de muros na Estrada Rio – Teresópolis.

#### 4.3.3.5 – Utilização de bermas

Consiste em colocar no pé do talude, bermas conforme mostrado na Figura 9, isto é, banquetas de terra, em geral do mesmo material que o do próprio talude, com a finalidade de aumentar a sua estabilidade. Segundo Caputo (2018), este aumento é devido ao seu próprio peso e à redistribuição das tensões de cisalhamento que se produzirá no terreno de fundação, onde abaixo do pé do talude as tensões são elevadas.

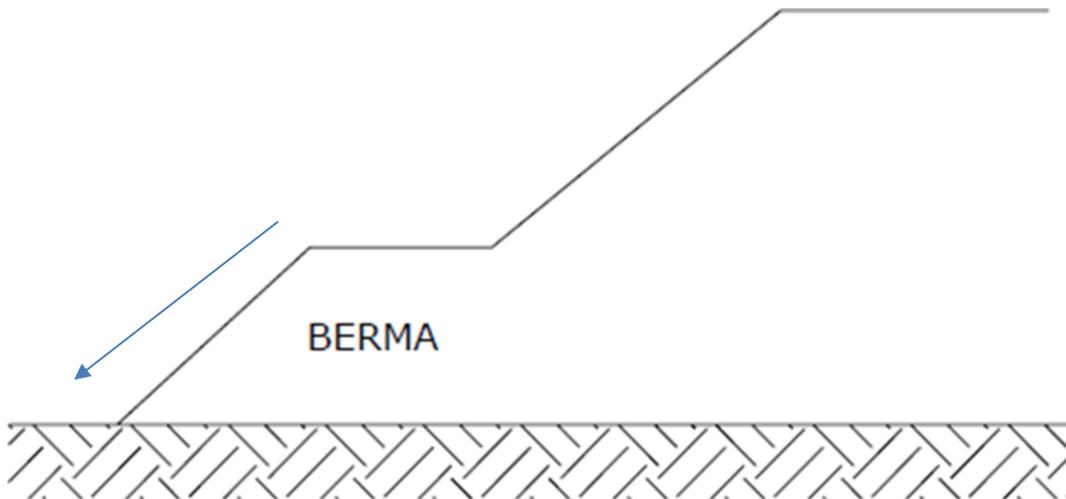


Figura 10 - Utilização de Bermas

Fonte: Horst (2017)

#### 4.4 – Hidrogeologia

A palavra hidrogeologia foi criada pelo francês Jean-Baptiste de Lamarck, usada para descrever o papel da água na morfologia da superfície terrestre como ramo da geologia que estuda a água subterrânea. Esse termo permaneceu ignorado por muitos estudiosos da água subterrânea com formação em engenharia, que sempre preferiram tratá-lo como um ramo da hidrologia (PAULA; VELÁSQUE 2019).

Durante a primeira metade do século XIX, o interesse pelas águas subterrâneas ocorreu na França, graças a resultados muito favoráveis obtidos com a perfuração de poços tubulares para o abastecimento d'água nas comunidades. O engenheiro Henry Darcy (1803-1858), depois de realizar inúmeros experimentos sobre o movimento da água através de colunas de areia, estabeleceu uma fórmula, conhecida como Lei de Darcy, que permite expressar a descarga de água, através da areia, por unidade de superfície, em função da condutividade hidráulica do material arenoso e do gradiente hidráulico. Essa lei, constitui a base de muitos métodos de avaliação quantitativa de recursos hídricos subterrâneos (Coelho *et al.*, 2015).

#### 4.4.1 – Ciclo Hidrológico

É o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado principalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre de acordo com Fonseca *et al.* (2019). Na atmosfera, formam-se as nuvens que, quando carregadas, provocam precipitações, na forma de chuva, granizo, orvalho e neve.

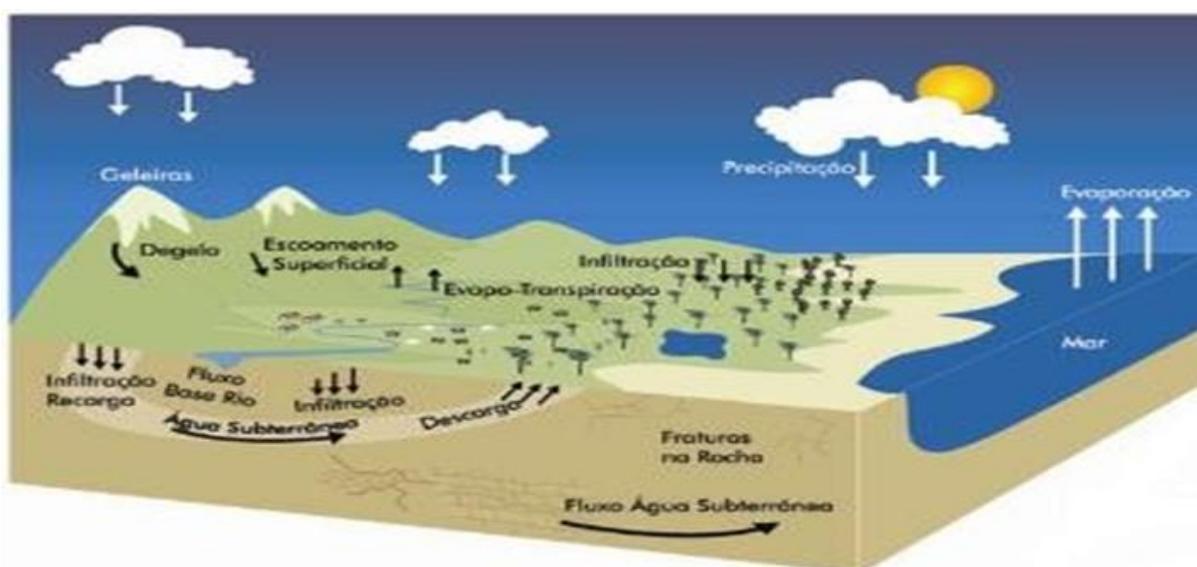


Figura 11 - Componentes do Ciclo Hidrológico

Fonte: Fonseca *et al.* (2019)

O ciclo hidrológico demonstrado na Figura 11 está ligado a mudança da água nos seus diferentes estados físicos, entre os oceanos, as calotas polares de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. Esta mudança de ciclo permanente se deve ao sol, que fornece a energia para transformar a água da superfície terrestre para a atmosfera (evaporação e degelo), e com a variação de pressão faz com que a água condensada venha cair em forma de gotas de água (precipitação) e que, estando na superfície, formar os rios e lagos até desaguar nos oceanos (escoamento superficial) ou se infiltrar nos solos e nas rochas, através dos seus poros, fissuras e fraturas (infiltração). Nem toda a água precipitada alcança a

superfície terrestre, já que uma parte, na sua queda, pode ser interceptada pela vegetação e posteriormente volta a evaporar (COELHO *et al.*, 2015).

A água que continua a infiltrar, entra na circulação subterrânea e contribui para um aumento da água armazenada (infiltração-recarga). Nas fraturas rochosas formam a água subterrânea que ressurgem na superfície em forma de nascentes. A quantidade de água e a velocidade com que ela circula nas diferentes fases do ciclo hidrológico são influenciadas por diversos fatores como, por exemplo, a cobertura vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia (Fonseca *et al.*, 2019).

#### 4.4.2 – Drenagem (profunda e superficial)

É sabido que as águas superficiais ou de infiltrações influem na estabilidade dos taludes. Daí a importância dos diferentes tipos de drenagem, tanto superficial, por meio de através de canaletas ou furos horizontais (Figura 12).

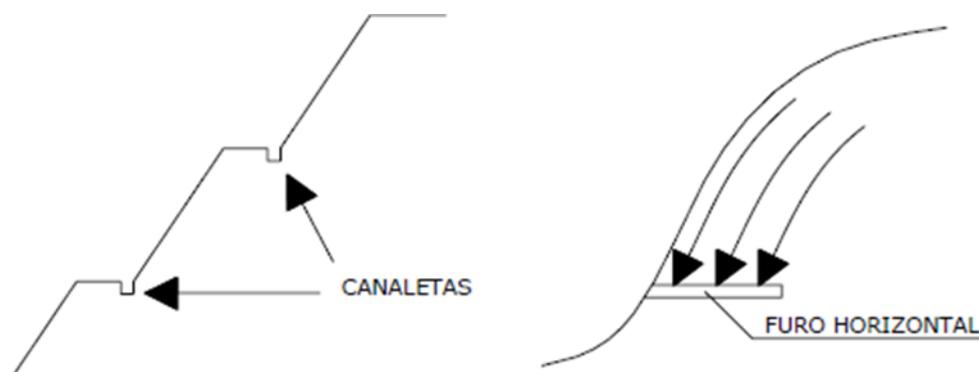


Figura 12 - Métodos de drenagem superficial e profunda

Fonte: Guidicini e Nieble (1993)

#### 4.4.3 – Métodos para rebaixamento do nível freático

Conforme Grandis (2018), o rebaixamento do lençol freático é utilizado em obras na qual a presença de água impede ou dificulta o projeto e execução da obra. Apesar do refino de certas técnicas mais recentes, como o sistema de ponteiras filtrantes, aperfeiçoado nos últimos 75 anos, o rebaixamento por meio de valas e

poços é bastante antigo. O rebaixamento, ou pré-drenagem, é muitas vezes utilizado em conjunto com técnicas de isolamento da escavação, chamadas *cutoff*, que melhoram as condições de execução, mas não necessariamente as características do maciço.

Essa preocupação com a água advém dos efeitos gerados por ela em obras geotécnicas, especialmente as subterrâneas, sendo de relevante consideração para o projetista e para a executora, pelas significativas alterações das propriedades geomecânicas do maciço. O alívio das tensões efetivas, o aumento da carga lateral em estruturas de escoramento, a agressividade da água a muitos minerais, erosões internas que provocam colapso e escorregamento do terreno, chamado de efeito *piping*, entre outras consequências da presença da água, tendem a aumentar a instabilidade do maciço, fazendo necessária uma rigorosa consideração desta pelos envolvidos na obra (GRANDIS, 2018).

Nesta seção, em que são descritos os métodos para rebaixamento de lençol freático, há o interesse em observar os mais utilizados e em qual situação há uma melhor compatibilidade do procedimento usado. Pela Tabela 1, pode-se observar as adequações necessárias de cada sistema a ser abordado, mas também a percepção de que a previsão do alcance de um sistema de rebaixamento é bastante variada.

Condições	Ponteiras Filtrantes	Poços de Sucção	Poços Profundos	Poços Injetores	Drenos Horizontais
<b>Maciço</b>					
<b>Areias siltosas e argilosas</b>	Bom	Ruim	Ruim a razoável	Bom	Bom <sup>3</sup>
<b>Areias grossas e pedregulhos</b>	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom
<b>Solos estratificados</b>	Bom	Ruim	Ruim a razoável	Bom <sup>3</sup>	Bom
<b>Hidrologia</b>					
<b>Alta Condutividade</b>	Bom	Bom	Bom	Ruim	Bom
<b>Baixa Condutividade</b>	Bom	Ruim	Ruim a razoável	Bom	Bom

Tabela 1: *Check list* para a seleção dos métodos de rebaixamento (Maciço)

3 - Tubos injetores duplos com geotêxtil filtrante em toda a extensão

Fonte: Adaptado de Powers et al. (2017)

Conforme Powers *et al.* (2017), apesar de haver fórmulas de cálculo bem difundidas, as condições do solo *in situ* ditam, no mercado atual, as especificações de cada sistema de rebaixamento, como espaçamento e profundidade. Logo, pela diferença entre a realidade e as situações assumidas em projeto, muitas vezes este serve apenas como referência inicial para quem irá executar o projeto.

Segundo Powers *et al.* (2017), apesar das melhorias inerentes ao processo de rebaixamento, há de ressaltar possíveis efeitos colaterais que a prática causa, especialmente os recalques de estruturas vizinhas, sendo que, isso ocorre das diversas formas seguintes.

- Quando poços, ponteiras ou outros dispositivos de rebaixamento são construídos de forma inadequada há a possibilidade do carreamento de finos do solo. A contínua remoção de finos conduz a um afrouxamento do solo por perda de coesão e, possivelmente, origina o fenômeno de *piping* e a formação de canais de retroerosão subsuperficiais. A subsequente

compactação do solo solto ou o colapso de tais canais de erosão do solo pode causar movimentação do solo e recalque das estruturas circundantes.

- Quando nas escavações se utiliza o bombeamento direto em casos que o método não é passível de aplicação, resultam os fenômenos de areia movediça e *piping* na parte inferior da escavação e na perda de solo advindo de taludes ou de face de túneis. Quando o fenômeno da areia movediça ocorre na parte inferior de uma escavação, a resistência do solo subjacente pode ser prejudicada e um futuro recalque da estrutura é provável.
- Por meio da consolidação de siltes e argilas compressíveis, ou areias soltas, devido a um aumento na tensão efetiva, a consequente mudança do estado de tensões expulsa a água dos poros do solo e causa o rearranjo dos grãos em uma configuração mais densa, gerando um decréscimo em volume e recalque do solo. Estruturas localizadas acima de tais depósitos consequentemente terão recalques.

Cabe ao projetista da obra analisar tais interferências, de forma a evitar tais problemas. Caso seja necessário, é recomendável a colocação de pinos e marcos de recalque nas estruturas vizinhas, selamento de fissuras e trincas existentes e eventuais medidas jurídicas cabíveis (GRANDIS, 2018).

#### 4.4.4 – Drenos horizontais profundos (DHP)

O dreno horizontal profundo, ou DHP, é utilizado para drenagem localizada de camadas ou feições do maciço geológico. A perfuração do DHP é feita com inclinação aproximada de 5° de forma a propiciar a saída de água por gravidade (Dobereiner e Vaz, 2018). É perfurado com diâmetro de 4 polegadas, na face dos taludes, com profundidades de 30 a 100 metros, em alguns casos chega a 200 metros. São revestidos com tubos e filtros de PVC geomecânicos de 2 polegadas.

De acordo com Azevedo e Castro (2019), o método de drenos horizontais profundos é especialmente usado em túneis e taludes de barragem e em minas, para aumento de forma econômica e rápida do fator de segurança de encostas. É

acompanhado por piezômetros ou indicadores de nível d'água para um acompanhamento mais eficaz do comportamento do maciço tratado. Também tem várias outras vantagens sobre drenos verticais, principalmente em sua habilidade de ter acesso a áreas obstruídas e para drenar zonas finas de aquíferos.

A pequena inclinação do furo tem como razão auxiliar a percolação da água até o dreno, como ilustrado na Figura 13. Posteriormente, instalam-se tubos filtrantes e se preenche a perfuração com pré-filtro de areia, de forma análoga à execução de poços verticais para ponteiros filtrantes, de forma a propiciar um caminho preferencial de percolação.



Figura 13 - Exemplo de dreno horizontal profundo

Fonte: Solotrat (2015)

Segundo Powers *et al.* (2017), apesar das melhorias inerentes ao processo de rebaixamento, há de ressaltar possíveis efeitos colaterais que a prática causa, especialmente os recalques de estruturas vizinhas, sendo que, isso ocorre das diversas formas seguintes.

- Quando poços, ponteiros ou outros dispositivos de rebaixamento são construídos de forma inadequada há a possibilidade do carreamento de finos do solo. A contínua remoção de finos conduz a um afrouxamento do solo por perda de coesão e, possivelmente, origina o fenômeno de *piping* e a

formação de canais de retroerosão subsuperficiais. A subsequente compactação do solo solto ou o colapso de tais canais de erosão do solo pode causar movimentação do solo e recalque das estruturas circundantes.

- Quando nas escavações se utiliza o bombeamento direto em casos que o método não é passível de aplicação, resultam os fenômenos de areia movediça e *piping* na parte inferior da escavação e na perda de solo advindo de taludes ou de face de túneis. Quando o fenômeno da areia movediça ocorre na parte inferior de uma escavação, a resistência do solo subjacente pode ser prejudicada e um futuro recalque da estrutura é provável.
- Por meio da consolidação de siltes e argilas compressíveis, ou areias soltas, devido a um aumento na tensão efetiva, a consequente mudança do estado de tensões expulsa a água dos poros do solo e causa o rearranjo dos grãos em uma configuração mais densa, gerando um decréscimo em volume e recalque do solo. Estruturas localizadas acima de tais depósitos consequentemente terão recalques.

Cabe ao projetista da obra analisar tais interferências, de forma a evitar tais problemas. Caso seja necessário, é recomendável a colocação de pinos e marcos de recalque nas estruturas vizinhas, selamento de fissuras e trincas existentes e eventuais medidas jurídicas cabíveis (GRANDIS, 2018).

#### 4.4.5 – Impacto do nível da água na lavra a céu aberto

Segundo ABGE apud Abrão e Oiiiveira (2018), a execução de cortes nos maciços pode condicionar movimentos de massa ou, mais especificamente, escorregamento de taludes, desde que as tensões cisalhantes ultrapassem a resistência ao cisalhamento dos materiais, ao longo de determinadas superfícies de ruptura, principalmente frente ao impacto do nível da água.

Outro fator importante e que deve se levar em consideração é que o perfil do nível do lençol freático é um fator influente na estabilidade de taludes. O lençol freático em encostas geralmente é baixo e flutua com o tempo, ou eventos chuvosos.

A Figura 14 demonstra os dois tipos gerais de perfis de lençol freático que são comuns em taludes. Segundo Curi (2014), o lençol freático alto aumenta o risco de ruptura, pois a resistência ao cisalhamento no plano potencial de ruptura decresce devido ao aumento da pressão de água entre as partículas do solo. Além disso, o lençol freático no talude age com força atuante adicional.

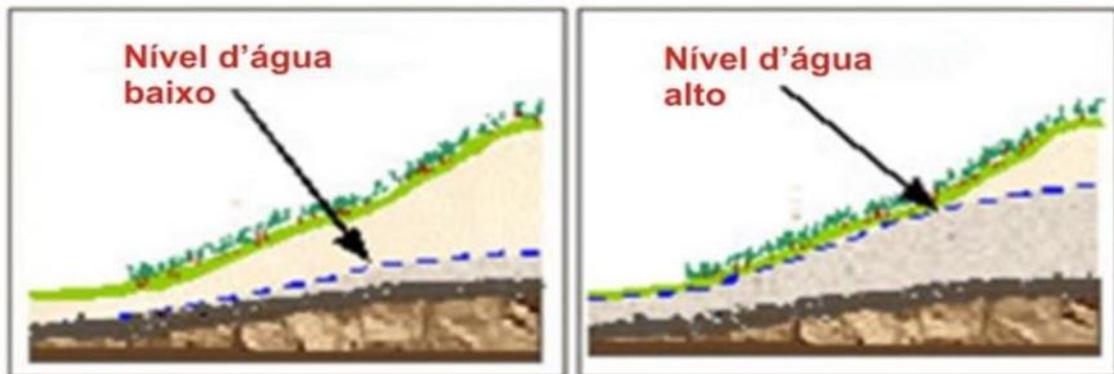


Figura 14 - Perfis do lençol freático (baixo e alto)

Fonte: Curi (2014)

Há também o contato solo-rocha que constitui, em geral, uma zona de transição entre esses materiais. Quando ocorre um contraste de resistência acentuado entre eles, com inclinação forte e, principalmente, na presença de água, a zona de contato pode condicionar a instabilidade do talude. As discontinuidades geológicas, presentes nos maciços rochosos e em solos de alteração, constituem também planos ao longo dos quais pode haver escorregamento conforme Figura 15. (Curi, 2014)

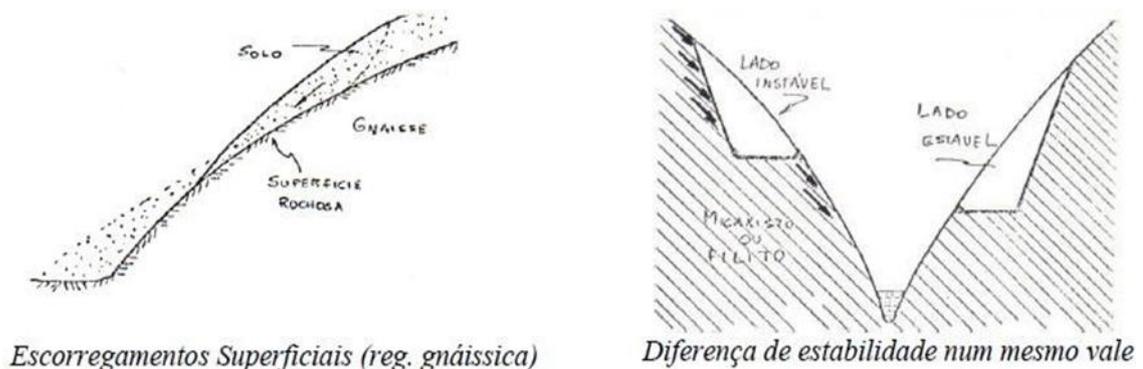


Figura 15 - Condicionantes geológicas desfavoráveis à estabilidade de um talude

Fonte: Curi (2014)

E por fim, os escorregamentos devidos à percolação d'água são ocorrências que se registram durante períodos de chuva quando há elevação do nível do lençol freático ou, apenas, por saturação das camadas superficiais de solo. Quando os taludes interceptam o lençol freático, a manifestação eventual da erosão interna pode contribuir para a sua instabilização. (Curi, 2014)

#### **4.5 – Programa Slide**

O *Slide* é um programa de análise de estabilidade de taludes em encostas de solo ou rocha. O programa fornece um conjunto abrangente de recursos de análise, incluindo projetos de suporte, análise integrada de elementos finitos de águas subterrâneas (infiltração) e análises probabilísticas (Rocscience, 2016).

Duó *et al.* (2016) relatam que o programa opera em ambiente *Windows*, com interface simples e facilidades para construção de modelos geomecânicos, com possibilidade de importação de desenhos para vários programas. A análise determinística, seja drenada ou não drenada, é feita por pesquisas em superfície circular ou não circular. O software qual analisa a estabilidade de taludes pelo método de Bishop, em 2D através do cálculo do fator de segurança para as superfícies de ruptura circulares ou não-circulares em taludes de solo ou rocha (Rocscience, 2016). A pesquisa do círculo crítico (Figura 16) é feita plotando-se diversos círculos, em quantidade definidas por uma malha formada por diversos pontos que representam os centros dos círculos.

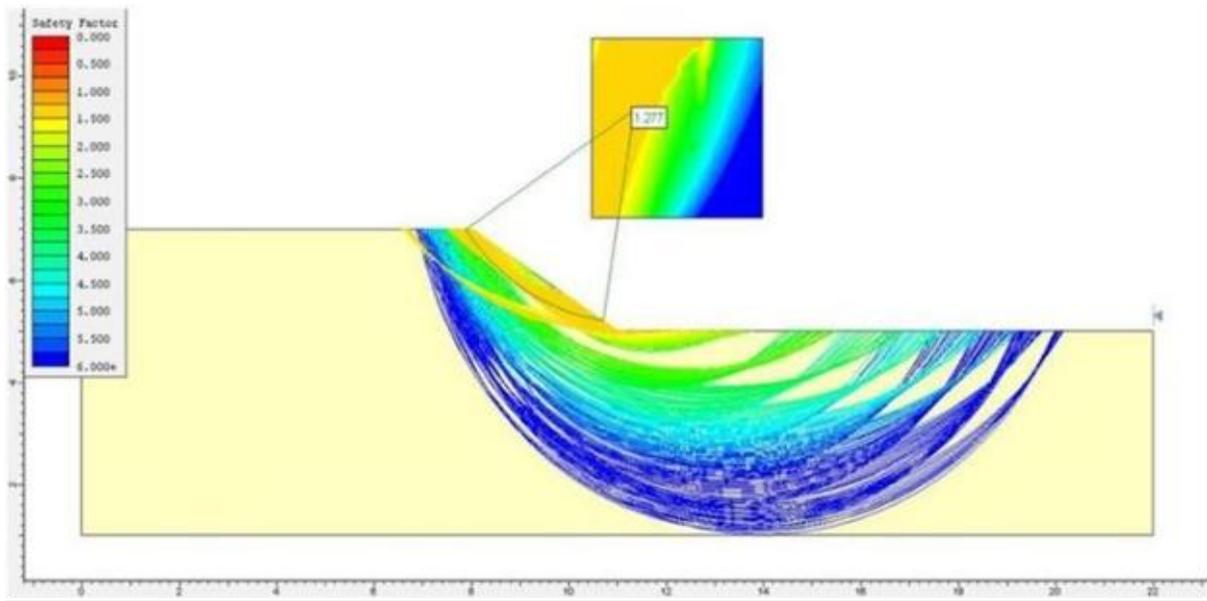


Figura 16 - Resultados de análise pela pesquisa do círculo crítico

Fonte: Duó et al. (2016)

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 – Indicadores de variação do nível de água no maciço estudado

Após frequentes avaliações da variação do INA (Indicador de Nível de Água) pelo INA-330, verificou-se que o mesmo rebaixou 10,67 m do nível d'água em dois anos, passando da cota 1.051,08 m para 1.040,41 m, sendo que o mesmo estava a uma distância horizontal aproximada de 151 m dos DHP's.

Independente da variação do INA, o mais importante para a lavra é o resultado na redução da umidade e estabilidade dos taludes, uma vez que a região era muito saturada, com surgências e problemas de umidade no maciço. Em Julho de 2017, ao iniciar o processo de monitoramento dos DHP's, a vazão total na saída dos drenos era de 22,54 m<sup>3</sup>/h, sendo da frente 1 de 5,21m<sup>3</sup>/h. Já em Julho de 2020, a vazão total caiu para 13,76 m<sup>3</sup>/h, sendo a vazão da frente 1 (figura 1) de 2,72 m<sup>3</sup>/h. A redução ao longo do tempo já era esperada visto que os DHP's retiram água também de um aquífero semi-confinado que possui alta capacidade de armazenamento, porém com baixa recarga proveniente das chuvas.

A Figura 17 mostra a remoção de estéril sendo realizada em outubro de 2020 nos bancos 1060 m e 1050 m, com baixa incidência de umidade, ao contrário do que acontecia no ano anterior, onde a umidade era alta no local.



Figura 17: Operação de remoção de estéril nos bancos 1060 m e 1050 m

Fonte: Autor (2021)

## 5.2 – Análises de estabilidade da região estudada

As análises de estabilidade da cava atual mostraram que a geometria proposta nos estudos de estabilidade é seguida pela operação de mina e a condição de segurança da cava atual é satisfatória. Na Tabela 2 são apresentados os fatores de segurança obtidos nas análises para condição depois do uso de DHP's. As seções estão separadas por aproximadamente 50 m uma da outra.

Seção	Situação	FS Global	FS Local
Seção A	Cava Atual	1,648	1,448
Seção B	Cava Atual	1,507	1,507
Seção C	Cava Atual	1,884	1,524

Tabela 2: Fatores de segurança global e local, obtidos considerando a cava atual

Fonte: Equipe de Geotecnia de mina (2020)

Por outro lado, as análises de estabilidade da cava planejada pela equipe de operação e planejamento de mina demonstraram que, exceto pela Seção C, a geometria solicitada apresentou fator de segurança (FS) abaixo do mínimo adotado atualmente pela empresa, que é de 1,3. A Tabela 3 apresenta os fatores de segurança da cava planejada.

Seção	Situação	Largura de Berma	Ângulo Individual	FS Global	FS Local
Seção A	Plano de Lavra	12	50°	1,248	1,009
Seção B	Plano de Lavra	12	50°	0,997	0,735
Seção C	Plano de Lavra	12	50°	1,502	1,502

Tabela 3: Fatores de segurança global e local, obtidos considerando a cava solicitada pela equipe de planejamento de lavra

Fonte: Equipe de Geotecnia de mina (2020)

Desta forma, realizaram-se as análises das seções A e B com o objetivo de definir uma geometria que atenda ao fator de segurança e que viabilize a lavra da área estudada. Como a geometria proposta para a seção C obteve um fator de segurança muito superior ao aceitável pela empresa, decidiu-se simular o estreitamento das bermas a fim de aumentar a recuperação do minério na seção.

A Figura 18 mostra o perfil no maciço da seção C com a topografia atual da cava, a topografia planejada pela equipe de produção e a topografia autorizada pela equipe de geotecnia após a conclusão das simulações no programa *Slide*.

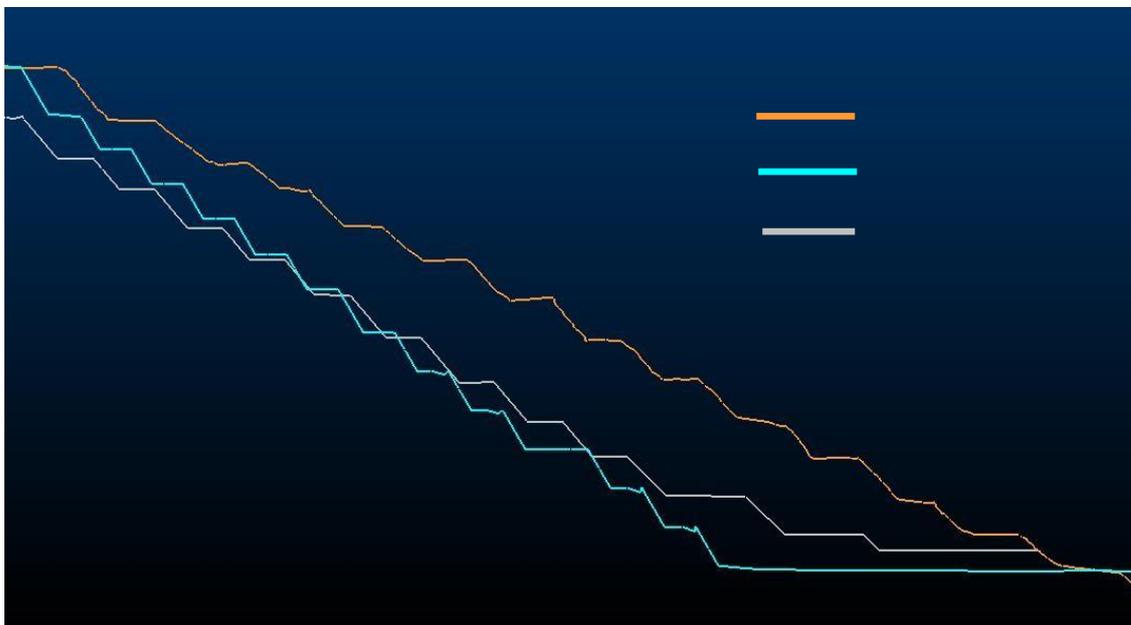


Figura 18: Desenho do perfil no maciço da seção C com a topografia atual da cava

Fonte: Equipe de Geotecnia de mina (2020)

### 5.2.1 – Rebaixamento do lençol Freático após instalação dos DHP's

### 5.2.2 Análise de Estabilidade da Seção A

Foram realizadas simulações de estabilidade até que se alcançasse o fator de segurança próximo a 1,3. No total, foram realizadas 13 simulações em que a seção escolhida para estudo apresentou o melhor fator de segurança global, 1,352 e o fator de segurança individual de 1,989 no banco cotado em 1.030 m. Esse banco apresentava constante surgência de água e está cotado abaixo da instalação dos DHP's. A cava autorizada apresenta nos dois últimos bancos 20 metros de largura de

berma e 45° de ângulo de face para talude individual e, os demais bancos com 12 metros de largura de berma e 50° graus de ângulo de face individual.

A Figura 19 apresenta a análise de estabilidade da seção A gerada no *Slide*. Nela, é possível comparar a cava planejada pela equipe de produção com a cava autorizada após a simulação de estabilidade. As cores mostradas na figura indicam a variação litológica do local em análise e a linha em azul apontada com a letra W mostra o nível do lençol freático nesse local.

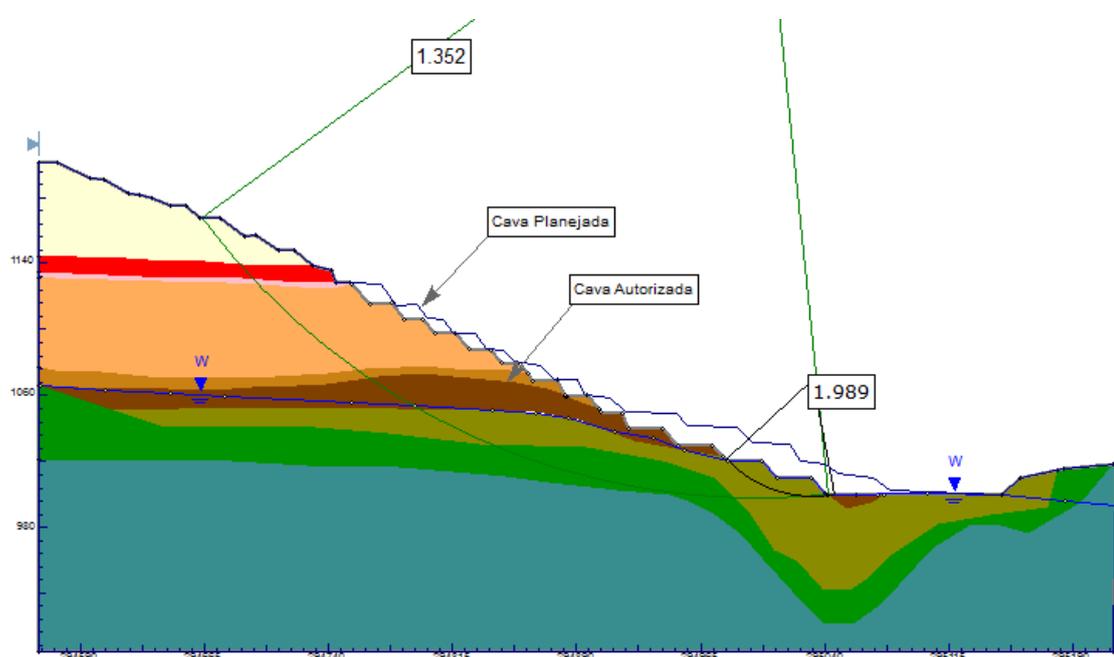


Figura 19: Análise de estabilidade da seção A, cuja geometria apresentou FS > 1.3

Fonte: Equipe de Geotecnia de mina (2020)

#### 4.2.3 Análise de Estabilidade da Seção B

Para a seção B foram realizadas 16 simulações geométricas, em que a seção mais próxima do fator de segurança foi de 1,263. O fator de segurança individual do banco de 1.020 m foi 2,011 e no banco de 1.030 m da cava autorizada tem berma com 9 metros de largura, 10 metros de altura e ângulo de face para talude individual de 50°. Já nos bancos 1.010m e 1.020m, as bermas ficaram com 20 metros de largura, altura de 10 metros e ângulo de face para talude individual de 45°.

A Figura 20 apresenta a análise de estabilidade da Seção B gerada no *Slide*, mostrando a cava proposta e a cava autorizada pela equipe de Geotecnia.

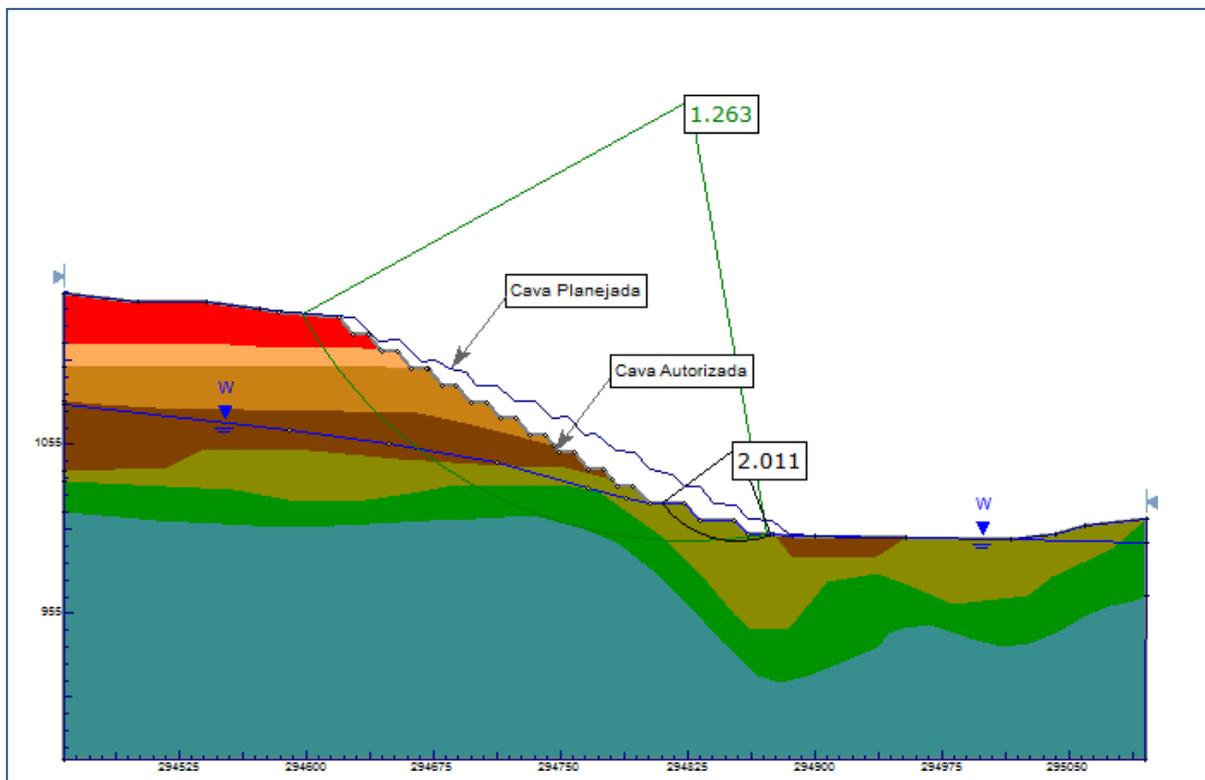


Figura 21: Análise de estabilidade da seção B, cuja geometria apresentou FS > 1.3

Fonte: Equipe de Geotecnia de mina (2020)

#### 4.2.3 Análise de Estabilidade da Seção C

Para a Seção C foram realizadas 10 simulações geométricas, até que o fator de segurança ficasse próximo do praticado na mina, em que a seção escolhida para estudo apresentou o melhor fator de segurança global de 1,365 e fator de segurança individual de 1,898. Para os bancos abaixo da cota 1.115m até o banco 1.030, as bermas ficaram com 10 metros de largura, altura de 10 metros e ângulo de face para talude individual de 50°. Nos dois últimos bancos do pé da seção (bancos 1.010m e 1.020m), as bermas ficaram com 20 metros de largura, altura de banco de 10 metros e ângulo de face para talude individual de 45° para garantir maior sustentação do maciço.

A Figura 21 apresenta a análise de estabilidade da Seção C considerando a geometria proposta pela equipe de Geotecnia.

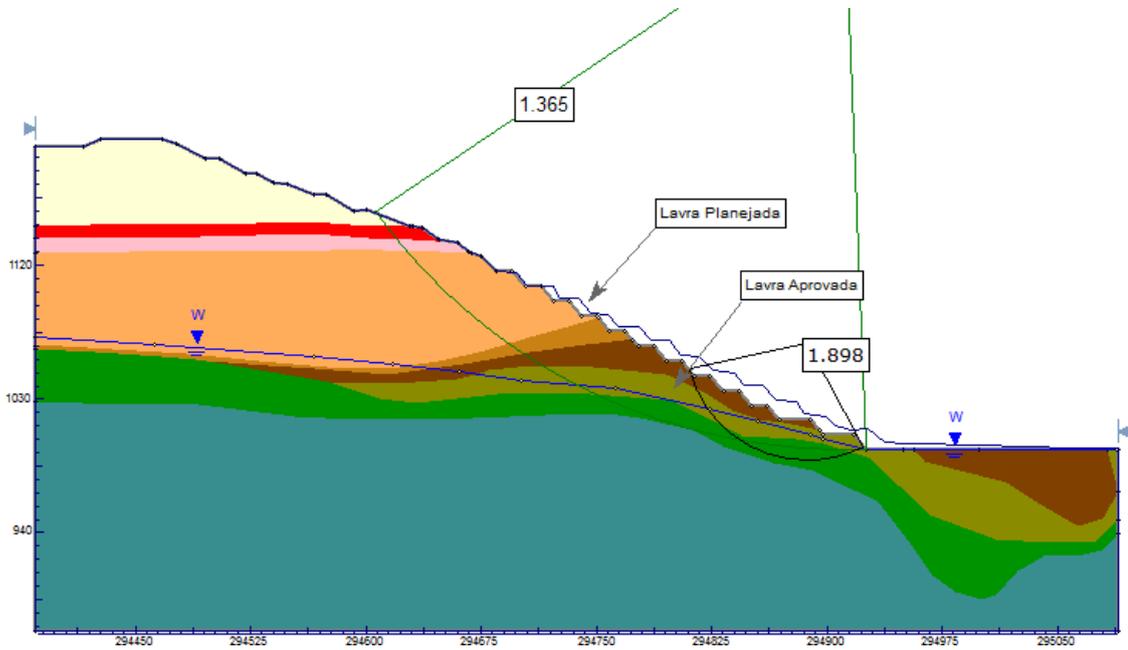


Figura 21: Análise de estabilidade da seção C, cuja geometria apresentou FS > 1.3

Fonte: Equipe de Geotecnia de mina (2020)

#### 4.2.4 Geometria aprovada pela equipe de Geotecnia

Após a avaliação das três seções (A, B e C), a geometria aprovada pela área de geotecnia para as três seções estão apresentadas na Tabela 4.

Seção	Geometria			
	Larg. Berma (m)	Ang. Face (°)	Larg. Berma (m)	Ang. Face (°)
<b>Cotas</b>	1.120 até 1.030		1.020 e 1.010	
<b>Seção A</b>	12	50°	20	45°
<b>Seção B</b>	10	50°	20	45°
<b>Seção C</b>	10	50°	20	45°

Tabela 4: Geometria proposta pela área de Geotecnia para a lavra da região estudada

Fonte: Autor (2021)

A Figura 22 mostra essa mesma área, porém com a inclusão de algumas estruturas de infra-estrutura de mina, como rampas para acessar o minério liberado e o direcionamento da água superficial e de surgências para um *sump* no fundo da cava. A implantação foi executada de forma efetiva pela operação, o que garantiu o correto direcionamento da água, sem acúmulo de água superficial nas bermas, uma vez que conforme apresentado na revisão bibliográfica, este é um dos principais causadores de rupturas em épocas de chuva, e ao mesmo tempo garante uma operação segura dos equipamentos na mina.

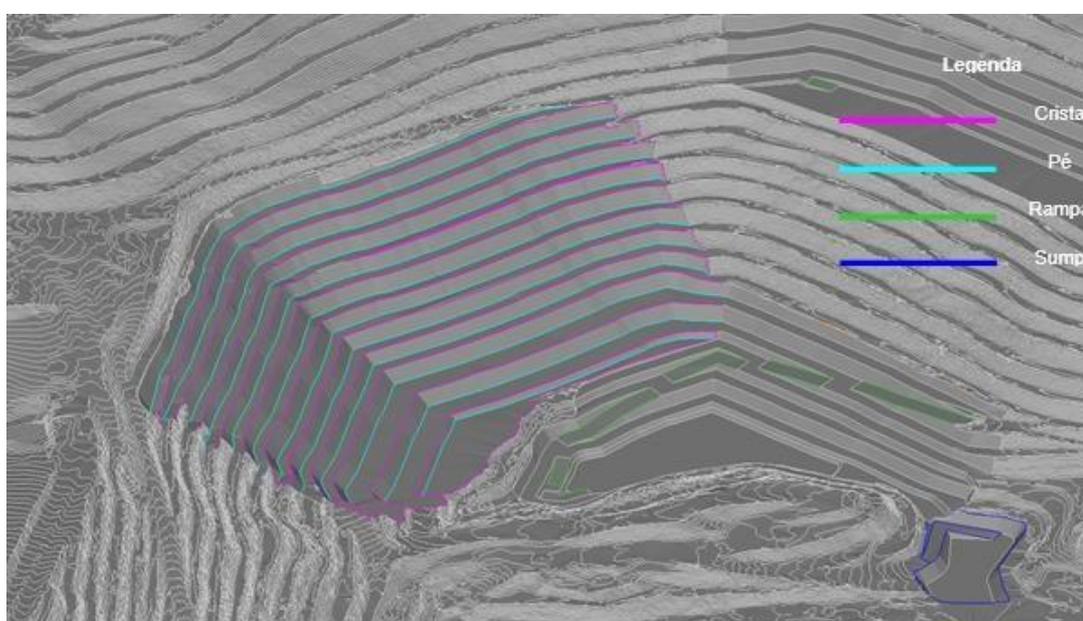


Figura 22: Área planejada com infraestrutura para lavra do local estudado

Fonte: Autor (2021)

### 5.3 – Volumes de estéril e minério a serem movimentados na área estudada

Com o aumento dos ângulos de talude e variação da largura das bermas, foi possível fazer a cubagem do material (estéril e minério) a ser movimentado na área estudada, conforme apresentada na Tabela 5.

TIPO	DENSIDADE	VOLUME	MASSA (t)	TEOR MÉDIOP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
<b>Minério</b>	<b>2,00</b>	<b>594.321</b>	<b>1.188.642</b>	<b>11,67</b>
<b>Estéril</b>	2,06	822.219	1.693.771	----
<b>Micáceo</b>	1,99	149.760	298.022	14,19
<b>Sic</b>	1,99	10.902	21.695	6,45
<b>Total (Est+Mic+Sic)</b>	<b>2,04</b>	<b>982.882</b>	<b>2.005.079</b>	----
<b>REM = Estéril/Minério</b>		<b>1,69</b>		

Tabela 5: Volumes de estéril e minério após alteração do ângulo de talude

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 5, pode-se verificar que será necessária a movimentação de 2.005.079 toneladas de estéril, as quais as litologias Micáceo e SIC serão lavrados como estéril, pois atualmente não se tem rota de processo para beneficiamento na usina. Realizando essa movimentação de estéril, será possível liberar um volume de 1.186.985 toneladas de minério, fazendo com que a relação estéril/minério seja 1,69, sendo essa inferior à relação anterior de 1,98. O teor médio do minério a ser liberado é de 11,67% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Esse teor é suficiente para ser alimentado nas usinas dessa mineradora, já que o teor médio planejado para 2019 foi de 2020 é de 11,50%.

Toda região estudada já era mapeada geologicamente pela equipe de Planejamento de Mina da empresa, sendo possível gerar o modelo de blocos onde são mostradas as prováveis regiões de minério e estéril, conforme mostra a Figura 23.

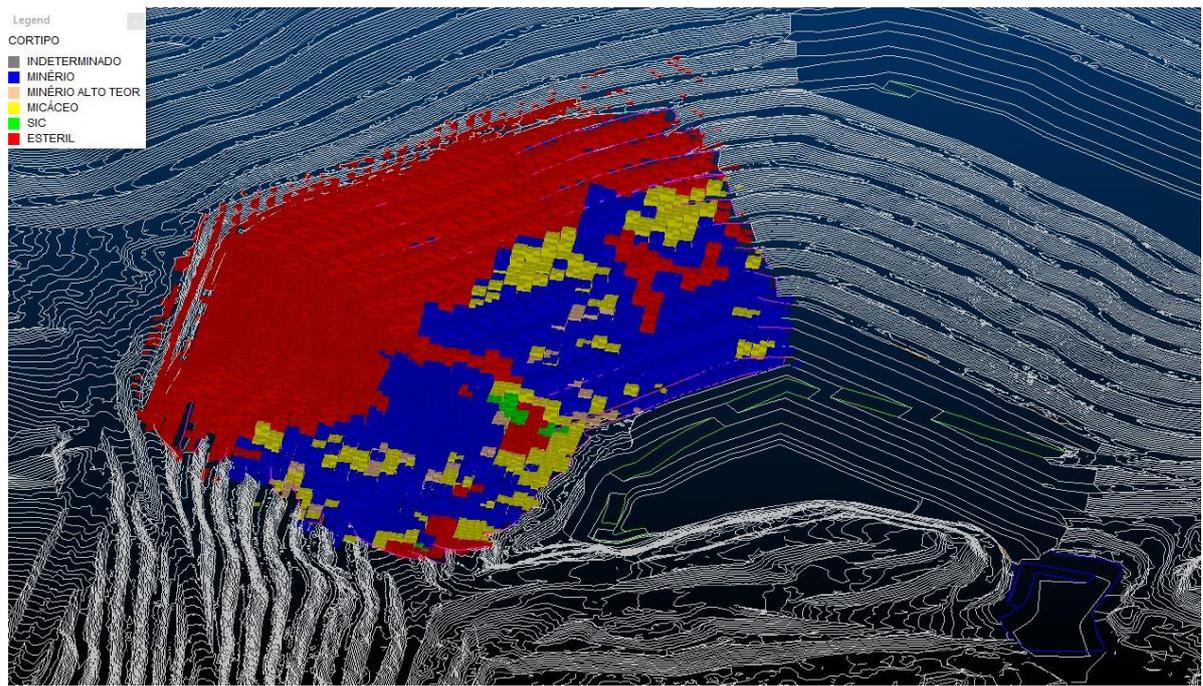


Figura 23: Diagrama de blocos

Fonte: Autor (2021)

## 7 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho atingiu os objetivos propostos que eram verificar a quantidade de minério que seria liberada para ser lavrado com o rebaixamento do nível de água dos taludes com o uso dos Drenos Horizontais Profundos.

Sem dúvidas a engenharia geotécnica e a hidrogeologia assumem cada vez mais a importante interface com o planejamento e produção da lavra na mina, principalmente no que se refere aos estudos de estabilidade de taludes em minas a céu aberto. A interação desses setores trouxe ganhos para a lavra da mina em estudo, visto que pequenas alterações nos ângulos de talude ou largura de bermas liberaram grande volume de minério que anteriormente não era possível ser lavrado devido a fatores geotécnicos.

Dessa forma, foi possível otimizar a cava para recuperar 1.188.642 t de minério com teor médio de 11,67% de  $P_2O_5$  obtendo-se uma REM de 1,69. Com a lavra desse minério tornando-se viável, garantiu-se um período maior de operação das frentes de lavra 1 e 2 e beneficiamento de minério fosfatado.

Visto que os Drenos Horizontais Profundos deram resultado positivo para liberação do minério, já está programado orçamento para instalação de novos DHP's nas cotas abaixo dos DHP's já instalados que possuem surgências de água para que possibilite avanço de lavra e melhorias nas geometrias da cava dos próximos anos. Para trabalhos futuros sugere-se executar um comparativo financeiro de investimento em DHPs, visando melhores índices de mineração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, P. C; OLIVEIRA, S. L. Geologia de Engenharia: Mineração. São Paulo: **ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia**, 2018.

AZEVEDO, Úrsula Ruchkys de; CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; MIRANDA, Marcos Paulo Souza. **Mineração em geossistemas ferruginosos e questões de geoética**: o caso do rompimento da Barragem de Córrego do Feijão, Minas Gerais–Brasil. 2019.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Volume 1, 2018.

CARDOSO, F. F. **Sistemas de Contenção**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

COELHO, Gilberto et al. Relação entre o escoamento de base e os diferentes sistemas hidrogeológicos do Estado de Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 257-267, 2015.

CURI, Adilson. **Minas a céu aberto: planejamento de lavra**. Oficina de Textos, 2014.

DAMASCENO, C. S. R. **Modelagem Geológica e Geomecânica 3D e Análises de Estabilidade 2D dos Taludes da Mina de Morro da Mina**. Conselheiro Lafaiete, MG, Brasil. Rio de Janeiro, 2018.

DUÓ, Danielli; COVALESKY, Mariana; TAPAHUASCO, Wilber Chambi. Análise de ruptura de um talude pelos métodos de Fellenius e Bishop simplificado. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 8, n. 2, 2016.

FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas, Aplicações na Estabilidade de Taludes**. Editora UFPr, 2011.

FONSECA, H. P. et al. Influência do uso e ocupação da terra no ciclo hidrológico no Município de Viçosa-MG. In: **Embrapa Café - Artigo em Anais de congresso (ALICE)**. In: Congresso Nacional do Meio Ambiente Justiça social e sustentabilidade medianizado pela economia verde, 16., 2019, Anais... Poços de Caldas-MG., 2019.

GIRODO, A. C. **Mineração: Projeto Apa Sul RMBH – Estudos do Meio Físico. v. 2.** Belo Horizonte, 2015.

GRANDIS, I. **Rebaixamento de lençol d'água.** Fundações – Teoria e Prática, Vários editores, Pini, São Paulo, SP, pp 581-595, 2018.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** São Paulo: Editora Edgar Blücher, 1983.

HARTMAN, H. L., MUTMANSKY, J. M. **Introductory Mining Engineering.** Canada: Ins. Wiley – Interscience publication, 2012.

PAULA, Rodrigo Sergio; VELÁSQUEZ, Leila Nunes Menegasse. Balanço hídrico em sistema hidrogeológico cárstico, região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 2, p. 119-133, 2019.

POWERS J. P., CORWIN A. B., C. SCHMALL P. C., KAECK W. E. **Construction Dewatering and Groundwater Control\_ New Methods and Applications.** John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2017.

REDAELLI, L. L; CERELLO, L. **Geologia de Engenharia: Escavações.** 1. ed. São Paulo: ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

REIS, R. C. **Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira – MG.** Dissertação de mestrado. Departamento de engenharia civil, Núcleo de geotecnia, Universidade federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, M.G., 95 p. 2016.

ROCSCIENCE, C. A. Evaluation of two coproscopic techniques for the diagnosis of schistosomiasis in a low-transmission area in the state of Minas Gerais, Brazil. **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 106, p. 844-850, 2016.

SILVA, A. M. P. **Sustentabilidade Operacional no contexto da indústria Mineral: Caso da Lavra de Caulim no Município de Cabo do Santo Agostinho.** Recife, 2018.

SOLOTRAT. **Manual de Serviços Geotécnicos.** Solotrat, São Paulo, SP, 2015.

WETHERELT A.; WIELEN, K. P. V. D. Introduction to Open-Pit Mining. In: **Darling P. *SME Mining Engineering Handbook***. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, p.857-876, 2011.