



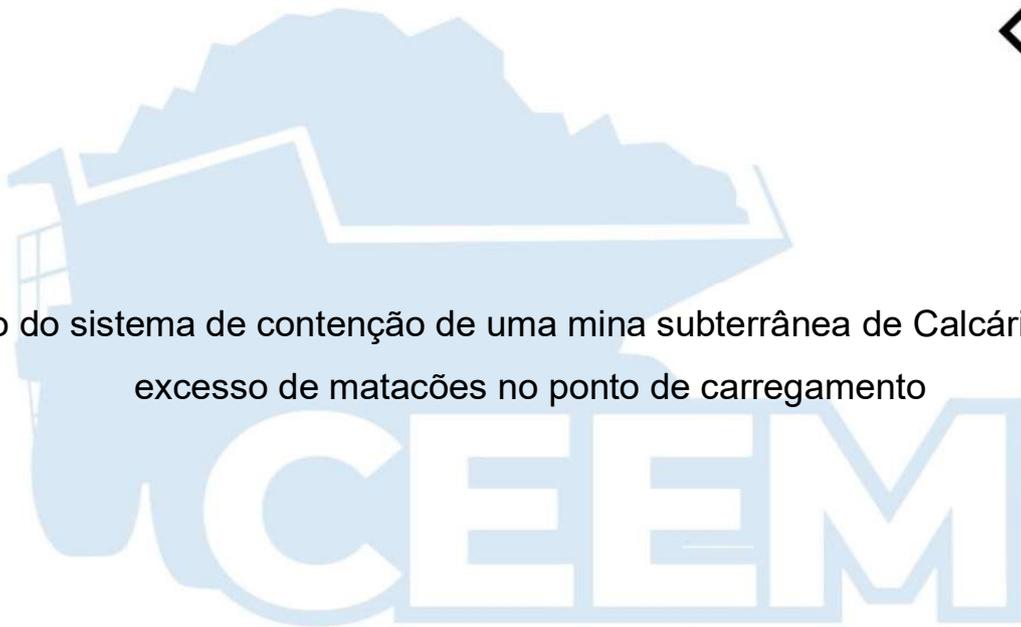
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
Campus Avançado de Poços de Caldas  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



**Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Campus de Poços de Caldas**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Mineral (CEEM)**

João Batista Corrêa Júnior

Estudo do sistema de contenção de uma mina subterrânea de Calcário devido  
excesso de matacões no ponto de carregamento



Poços de Caldas

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
Campus Avançado de Poços de Caldas  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



João Batista Corrêa Júnior

## **Estudo do sistema de contenção de uma mina subterrânea de Calcário devido excesso de matacões nos pontos de carregamento**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia de Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra

Orientador: Prof.(a) Dr.(a) Edmo da Cunha Rodovalho

Poços de Caldas

2023





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
Campus Avançado de Poços de Caldas  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Junior, João Batista Correa.

Estudo do sistema de conteção de uma mina subterranea de calcario devido excesso de matações nos pontos de carregamento / João Batista Correa Junior. - Poços de Caldas, MG, 2023.

46 f. : il. -

Orientador(a): Edmo da Cunha Rodovalho.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2023.

Bibliografia.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
Campus Avançado de Poços de Caldas  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



João Batista Corrêa Júnior

## Estudo do sistema de contenção de uma mina subterrânea de Calcário devido excesso de matacões nos pontos de carregamento

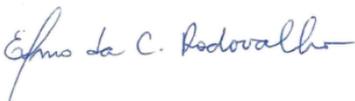
A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) como parte dos requisitos para a integralização do curso de Especialização em Engenharia Mineral (CEEM).

Área de concentração: Lavra

Aprovada em: 20 de setembro de 2023

Orientador: Edmo da Cunha Rodovalho

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura: 

Examinador 1: Osvail André Quaglio Instituição:

Universidade Federal de Alfenas

Assinatura: 

Examinador 2: Matheus Fernando Ancelmi

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Assinatura: 





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
Campus Avançado de Poços de Caldas  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, cuidado e direcionamento para que possamos fazer nossas escolhas de forma assertiva e ética.

A minha esposa e filha por toda compreensão e apoio nos momentos de dificuldade, sempre com paciência e palavras de ânimo para que pudesse prosseguir na caminhada.

Aos professores do curso de Especialização em Engenharia de Minas (CEEM) da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL – MG, pela docência com comprometimento e a qualidade requerida para que pudesse me aperfeiçoar e me capacitar ainda mais para os futuros desafios profissionais que estão por vir.

Por fim, ao Professor Edmo da Cunha Rodvalho por toda orientação no decorrer do trabalho.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
*Campus Avançado de Poços de Caldas*  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio-termo. Ou você faz uma coisa bem-feita ou não faz.”

Ayrton Senna





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Geológica das operações da Votorantim Cimentos.....	12
Figura 2 - Designs de uma mina a céu aberto e subterrânea.....	14
Figura 3 - Esquemático do método Sublevel Stopping.....	16
Figura 4 - Esquemático do método na Votorantim Cimentos.....	16
Figura 5 - Esquemático das operações da Votorantim Cimentos.....	18
Figura 6 - Geometria da mina subterrânea do Baltar (sem escala) .....	19
Figura 7 - Modos de tensão, integridade estrutural e ruptura .....	20
Figura 8 - Cabos em suporte de maciço de escavações de grandes dimensões .....	23
Figura 9 - Plano de cordoalhas para os pilares barreiras nos extremos dos salões.....	24
Figura 10 - Plano de cordoalha para o reforço das faces livres .....	25
Figura 11 - Definição do método DMAIC .....	27
Figura 12 - Histórico da produção de ROM nos últimos cinco anos .....	29
Figura 13 - Quantidade de desmontes de lavra realizados nos últimos cinco anos .....	30
Figura 14 - Evolução de FOG'S nas galerias de transporte nos últimos cinco anos .....	30
Figura 15 - Horas de utilização de rompedor para quebra de matacos entre 2018 e 2022 .....	31
Figura 16 - Total de fogo secundário realizado entre 2018 e 2022 .....	32
Figura 17 - Na parte esquerda da figura é mostrado o resultado do desmonte da face livre com cordoalha e sem cordoalha. Na parte direita é a sugestão de geometria dos leques em função do efeito do resultado do desmonte atual.....	33
Figura 18 - Esquemático de cabeamento para contenção de grandes blocos .....	34
Figura 19 - Detalhamento da galeria a ser desenvolvida com foco na contenção do maciço .....	34
Figura 20 - Geometria de proposição de cordoalhas perpendiculares à face dos leques .....	35
Figura 21 - Projeto de perfuração para produção Mina Baltar .....	36
Figura 22 - Recorte do relatório técnico da fabricante do equipamento de perfuração .....	38
Figura 23 - Equipamento Sandvik mapeado como ideal para nova realidade operacional .....	39
Figura 24 - Equipamento Epiroc mapeado como ideal para nova realidade operacional .....	39
Figura 25 - Comparativo de horas paradas por caminhões antes e após as ações .....	41
Figura 26 - Horas de utilização de rompedor para quebra de matacos entre 2018 e 2023 .....	42



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Etapas da metodologia DMAIC .....	27
Tabela 2 - Histórico de horas paradas por caminhão devido mataco na lavra .....	28
Tabela 3 - Teste em cabos antes da criação do procedimento de “graute” .....	35
Tabela 4 - Teste em cabos após a criação do procedimento de “graute” .....	35
Tabela 5 - Malha e bits utilizados antes do estudo .....	37
Tabela 6 - Malha e bits utilizados após o estudo .....	37
Tabela 7 - Comparativo de horas paradas por caminhões antes e após as ações .....	40



## SUMÁRIO

1.	12	
2.	14	
3.	14	
3.1.	16	
3.2.	27	
3.2.1	Sublevel Stopping	15
3.2.2	Comportamento do maciço rochoso em escavações subterrâneas	19
3.2.3	Sistema de sustentação dos salões (realces) por cabo na mina Baltar	22
3.2.4	Sistema de sustentação de galerias de desenvolvimento na mina Baltar	26
4.	2726	
4.1.	2726	
4.2.	2928	
5.	3332	
5.1.	3332	
5.2.	4239	
6.	4642	
REFERÊNCIAS		45



## RESUMO

A História do grupo Votorantim começa em 1918 no distrito de Votorantim, em Sorocaba com uma fábrica de tecelagem criada pelo português Antônio Ignácio. Em 1924 José Ermínio de Moraes casa-se com Helena Pereira (filha única de Antônio Ignácio) que assume a Empresa após a morte do patriarca. A partir de então José Ermínio decide de forma visionária e pela litologia do local focar na produção de cimento (calcário) coincidindo com o período da revolução industrial e aquecimento da construção civil no estado de São Paulo. A mineração entrou em operação na região com operações a céu aberto e em 1975 iniciou-se os estudos de uma operação subterrânea devido à dificuldade dos controles de teores das minas a céu aberto. Desta forma, em 1981 surgiu a única mina subterrânea de calcário do Brasil, com o método de lavra de sublevel stoping e capacidade anual de 80.000t de calcário/mês. Sabemos que para operar uma mina subterrânea são necessários entendimento da litologia, do maciço e definir os tipos de suportes a serem aplicados para garantir sua sustentação, tanto no quesito diluição quanto no quesito estabilidade das galerias/ túneis de acesso. Desta forma, o objetivo do estudo é analisar o sistema de suporte atual e propor melhorias para garantir a maximização da produção (redução de matacos dos salões de produção) bem como da segurança das operações subterrâneas (evitar queda de choco por suporte ineficiente ou não instalado). Foi utilizado a ferramenta DMAIC para definir as causas e definir os pontos mais importantes para a melhoria dos processos (melhor suporte a ser aplicado na mina subterrânea) e sua padronização/ rotina de aplicação.

**Palavras-chave:** Contenção; Segurança; Votorantim.



## ABSTRACT

The history of the Votorantim group begins in 1918 in the district of Votorantim, in Sorocaba, with a weaving factory created by the Portuguese Antônio Ignácio. In 1924 José Ermínio de Morais married Helena Pereira (the only daughter of Antônio Ignácio) who took over the Company after the patriarch's death. From then on José Ermínio decided in a visionary way and based on the lithology of the site to focus on the production of cement (limestone) coinciding with the period of the industrial revolution and heating up of civil construction in the state of São Paulo. Mining began operating in the region with open pit operations and in 1975 studies of a underground operation began due to the difficulty of controlling grades in open pit mines. Thus, in 1981, the only underground limestone mine in Brazil emerged, with the sublevel stoping mining method and an annual capacity of 80,000t of limestone/month. We know that to operate an underground mine, an understanding of the lithology, the massif and the definition of the types of supports to be applied to guarantee its support are accepted, both in terms of dilution and in terms of the stability of the access galleries/tunnels. In this way, the objective of the study is to analyze the current support system and propose improvements to ensure the maximization of production (reduction of the big blocks in the stopes in production) as well as the safety of underground operations (avoiding fall of the ground due to inefficient or non-installed support ). The DMAIC tool was used to define the causes and define the most important points for improving processes (better support to be applied in the underground mine) and its standardization/application routine.

**Keywords:** Support; Safety; Votorantim.



## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A atividade mineral se destaca como uma das maiores fontes de renda, servindo desse modo em um importante suporte financeiro e econômico para o país. No Brasil, a mineração exerce grande destaque principalmente no crescimento e desenvolvimento socioeconômico de algumas cidades com populações menores, devido ao grande investimento realizado no setor mineral.

Para que esse investimento seja possível, é preciso progredir de forma constante o seu desenvolvimento tecnológico, de modo a obter um melhor aproveitamento de suas reservas minerais. No entanto, devido ao aumento da eficiência alcançada a partir da mecanização, pode-se observar um alto ganho em produtividade e por consequência, há uma exaustão das minas a céu aberto, implicando na substituição por um método de lavra mais vantajoso para suas operações (CURI, 2017).

Na medida em que a lavra a céu aberto atinge grandes profundidades, torna-se inviável economicamente, ou seja, a relação estéril-minério é muito elevada, não sendo mais viável prosseguimento a céu aberto. Com isso, a lavra subterrânea passa a ser mais vantajosa, desde que sejam levados em consideração fatores como a relação estéril-minério, a viabilidade econômica, produtividade, a segurança, a recuperação de lavra, estabilidade da mina e as condições geológicas. A avaliação desses fatores influencia diretamente na aplicação desse método de lavra (MACÊDO et al., 2001).

Existem cerca de dez métodos utilizados na lavra subterrânea. Dentre eles, temos o método de sublevel stoping também chamado de realces em subníveis. Esse método consiste na abertura de um grande realce, o que necessita de um grande estudo de estabilidade para garantir a máxima recuperação com a menor diluição possível (BARROS et al. 2017).

Diante deste contexto, o trabalho tem como objetivo estudar os principais desvios operacionais no que diz respeito a baixa produtividade da frota de carga por geração de “matacões” ocasionados por deslocamento dentro dos realces de lavra, bem como incidência de “fogs” (fall

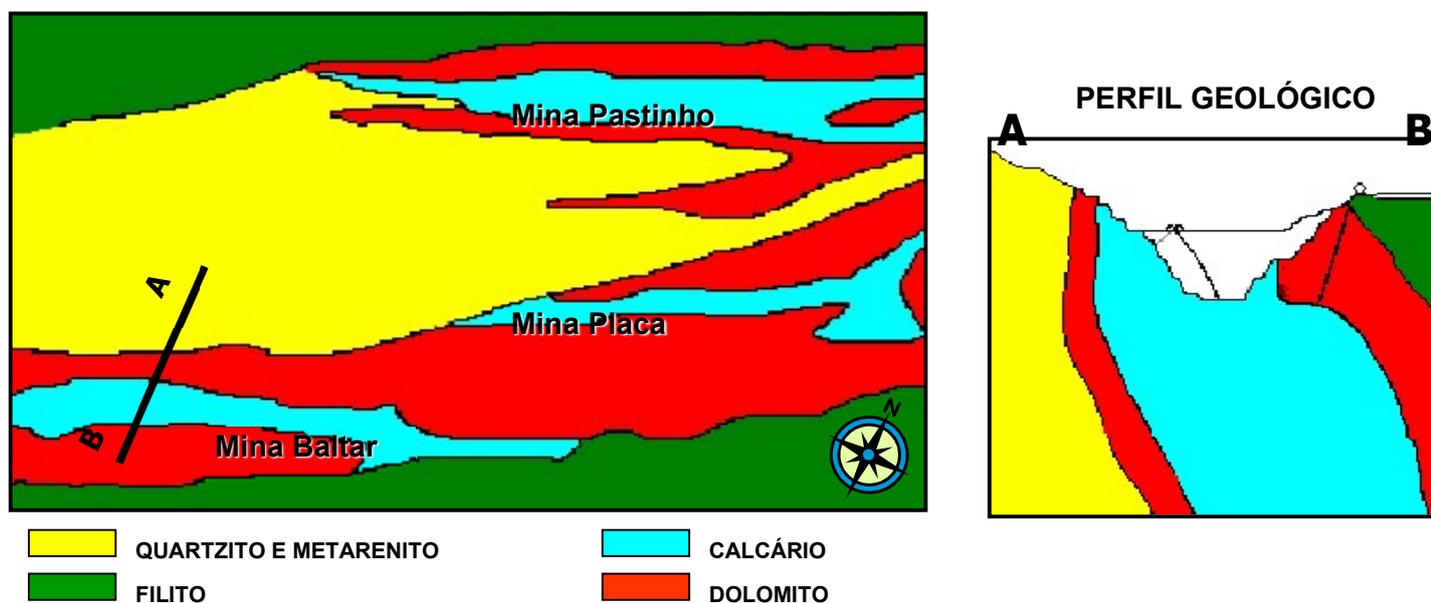


of ground) nas galerias de desenvolvimento, e a partir de então, propor soluções para redução dos eventos indesejados, tornando a operação mais segura e produtiva.

Toda operação de lavra subterrânea para minimizar riscos à segurança dos trabalhadores e eventos indesejados com os ativos, geralmente apresentam algum tipo de suporte artificial, que objetiva manter a estabilidade tanto do maciço das galerias (túneis) de acesso, quanto dos realces de produção (local onde é extraído o minério).

Na mina subterrânea de Baltar, na cidade de Votorantim, o início das atividades tanto de desenvolvimento, quanto de produção da mina subterrânea que se deu na década de 1980 foi realizado sem a necessidade de sistema de suporte de superfície (cabos, cavilhas, etc) devido a boa qualidade (competência) do maciço rochoso, chamado de “auto portante”. Atualmente com o aprofundamento da mina e aumento de taxa de produção/ abertura de realces de forma simultânea, tornou-se necessário a aplicação de suportes de superfície em pontos específicos, tanto para o desenvolvimento da mina quanto para a extração do calcário proveniente dos realces de lavra.

Figura 1: Estrutura Geológica das operações da Votorantim Cimentos



Fonte: Votorantim Cimentos (2023).



## 2. OBJETIVO

O estudo tem como objetivo identificar e mapear as principais regiões de geração de grandes blocos (matacões) oriundos da ineficiência/ inexistência de um sistema de suporte (cabos), a fim de obter maior performance produtiva no que tange a atividade de carga e transporte nos realces em operação (redução do tempo de espera dos caminhões aguardando carregamento).

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 TIPOS DE MÉTODOS DE LAVRA

De acordo com Curi (2017), a lavra de minas consiste em um conjunto de operações e serviços inter-relacionados, com intuito de buscar a melhor filosofia para extração do minério segundo o método de lavra selecionado, podendo ser: a céu aberto; a céu aberto seguindo-se um estágio de transição à lavra subterrânea; subterrânea; e simultaneamente, por combinações de métodos de lavra a céu aberto e subterrânea.

Segundo Macêdo et. Al. (2001), a seleção do método de lavra pode ser dividida em duas fases:

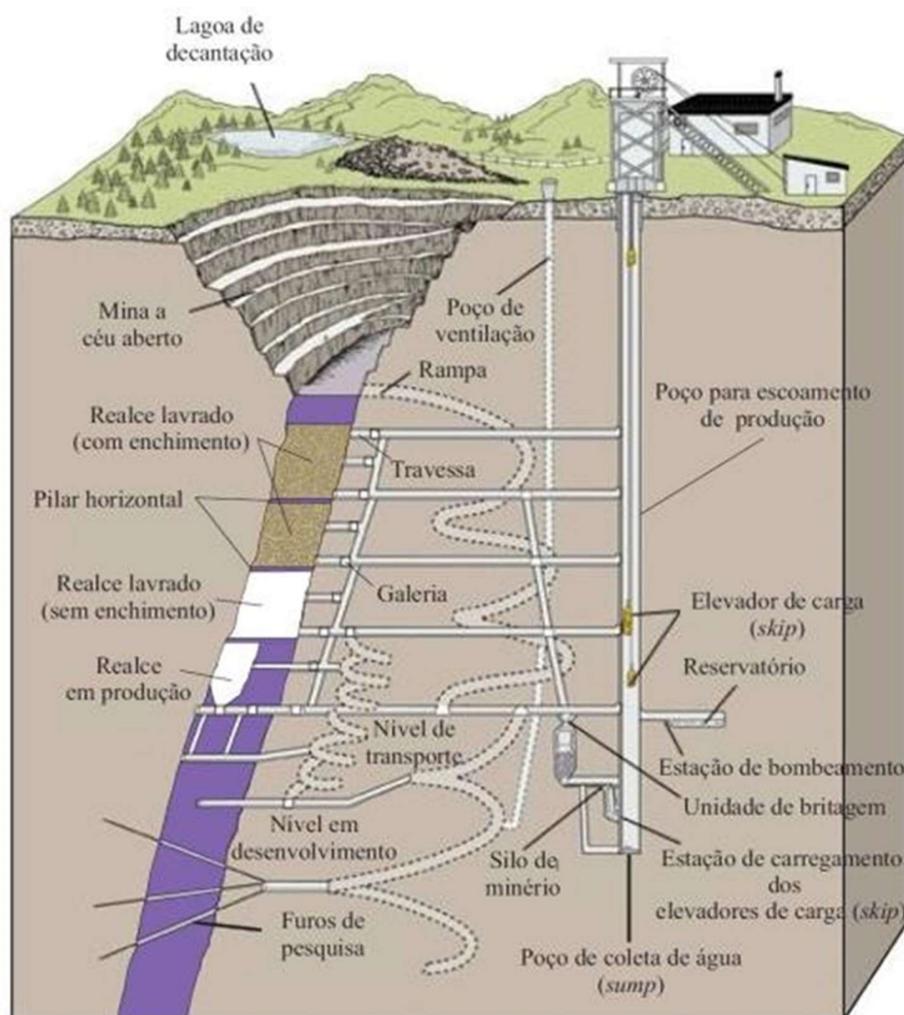
- i. Avaliação das condições geológicas, sociais e ambientais para permitir a eliminação de alguns métodos que não estejam de acordo com os critérios desejados.
- ii. Escolha do método que apresente o menor custo, sujeito às condições técnicas que garantem maior segurança.

A lavra a céu aberto ocorre quando a extração de um depósito mineral é realizada na superfície terrestre. Já quando a extração mineral ocorre abaixo da superfície da terra, teremos uma lavra subterrânea (HUSTRULID, 1982).



A Figura 2 apresenta uma mina com escavações a céu aberto e subterrâneas. As minas subterrâneas apresentam diferentes elementos em sua estrutura, sejam eles de lavra ou infraestrutura. Esses elementos podem ser agrupados em três tipos: realces ou salões de produção; vias de acesso e escavações de serviços temporários; e as vias e escavações de serviços permanentes (CHARBEL, 2015).

Figura 2: Designs de uma mina a céu aberto e subterrânea



Fonte: Charbel (2015) – traduzido de Brady e Bown



## 3.2 CONCEITO DE LAVRA SUBTERRÂNEA

A mineração subterrânea é definida como uma lavra, onde ocorre o processo de extração abaixo da superfície do terreno. Esse tipo de lavra é aplicado quando o depósito mineral se encontra em grandes profundidades, inviabilizando economicamente, a remoção da camada de capeamento por meio de lavra a céu aberto, ou por casos impostos pela Legislação mineira, como corpos juntos a centros urbanos populosos, lâmina d'água e reservas ambientais (LIMA 2014).

### 3.2.1 SUBLEVEL STOPING

O método de lavra por subníveis (sublevel stoping), apresentado na Figura 3, é o método mais popular para minas subterrâneas de rochas duras, sendo este o método mais utilizado nas lavras subterrâneas da América do Sul (CURI, 2017; JARDIM, 2019), e por consequência a metodologia aplicada na operação da mina subsolo da Votorantim Cimentos (esquemático da Figura 4).

Este método é muito usado em depósitos tabulares e de espessura alta (caso da jazida de calcário da mineradora em estudo). A rocha encaixante apresenta alto grau de competência para possibilitar a autossustentação das aberturas executadas sem que seja necessário suporte artificial. O minério no interior do nível de operação é extraído numa configuração de stopes (realce), utilizando um processo de perfuração longa, na forma de leques ou paralelas, juntamente com o desmonte com explosivos (ANDRADE, 2019; CARLI, 2013).

Segundo Andrade (2019), após a detonação, o minério é escoado de um realce, podendo haver subníveis (para perfuração e desmonte) e um nível (para transporte do material). A dimensão do realce dependerá da geometria do corpo, aspectos geomecânicos e restrições dos equipamentos.

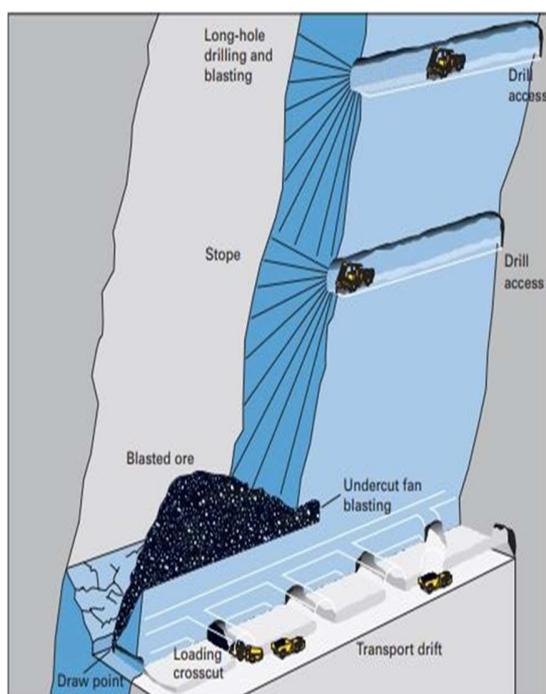
As principais vantagens relacionadas desse método são: moderada a alta produtividade, segurança dos empregados, possibilidade de operação unitárias simultâneas, fácil ventilação



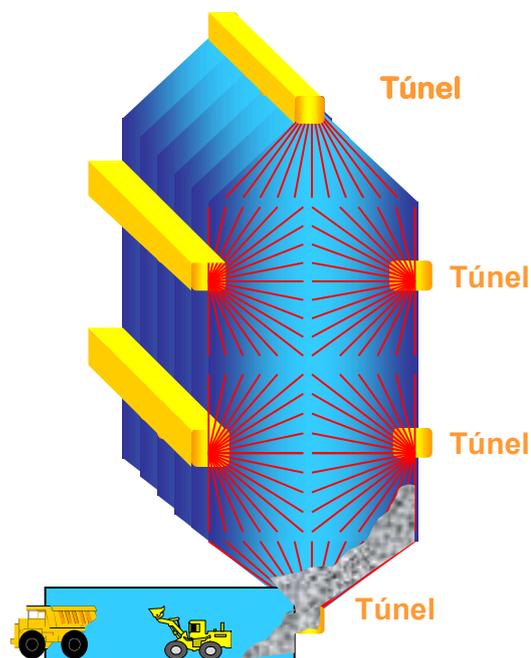
e boa recuperação de lavra. Já como desvantagem, teremos alto custo de desenvolvimento, planejamento de lavra não flexível, cuidadoso alinhamento para furos longos e excessiva vibração por falta de seletividade (HARTMAN & MUTMANSKY, 2002).

Figura 3: Esquemático do método Sublevel Stopping.

Figura 4: Esquemático do método na VC.



Fonte: Atlas Copco (2007).



Fonte: Votorantim Cimentos (2023).



A mina subterrânea de Baltar no estado de São Paulo, ficou parada por questões de custo entre 2002 e 2009, ano ao qual retomou em forma de ramp up sua produção, chegando atualmente no pico produtivo, com capacidade instalada/ licenciada de 1.000.000 de toneladas/ ano. No início dos trabalhos, as atividades eram em sua maior parte realizadas de forma manual, mas com o objetivo de alavancar resultados em segurança e produção, foi necessário a mecanização e investimento em equipamentos de maior porte e confiabilidade, justificando o aumento de produção citado anteriormente.

O sistema de suporte do maciço rochoso acompanhou a nova sistemática, ou seja, ele também passou por alterações que visaram a utilizar o tratamento mais eficaz para as características na nova necessidade (aumento de produção sem deixar de lado a segurança das pessoas inseridas na operação). Após vários anos em operação sem suporte de superfície (cabos, cavilhas, telas, etc), e com o aprofundamento e aumento de produção da mina, foi observado a necessidade de uso e aplicação deste tipo de suporte para garantir a continuidade dos trabalhos bem como zelar pela segurança operacional. A partir de então passou-se a adotar cabos de aço nas atividades de reforço de teto dos salões de produção em alguns locais da mina, tal metodologia se deu em virtude, principalmente, de ocorrências indesejáveis de desarticulação no maciço rochoso e quedas de grandes blocos nos locais de retirada do minério (impactando no ciclo produtivo das operações). Podemos verificar na Figura 5 o layout da área de concessão da Votorantim Cimentos e na Figura 6 os painéis de lavra em operação e a operar na mina subterrânea de calcário da VC.



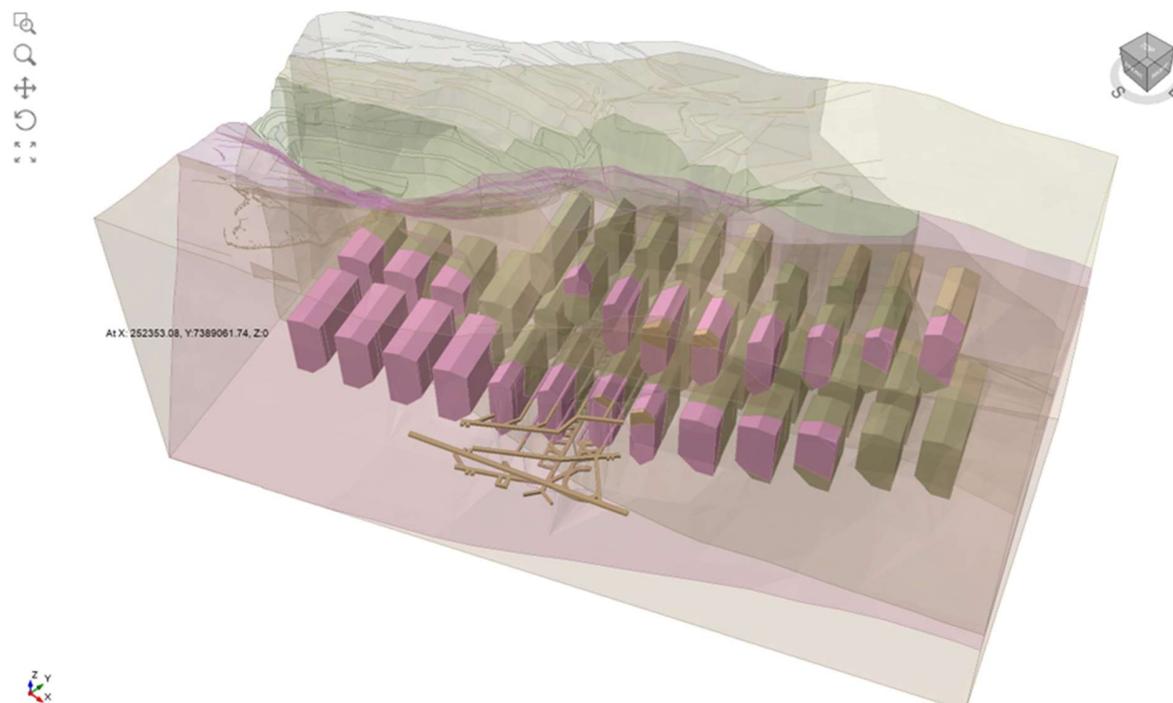
Figura 5: Esquemático das operações da VC.



Fonte: Votorantim Cimentos (2023).



Figura 6: Geometria da mina subterrânea do Baltar (sem escala).



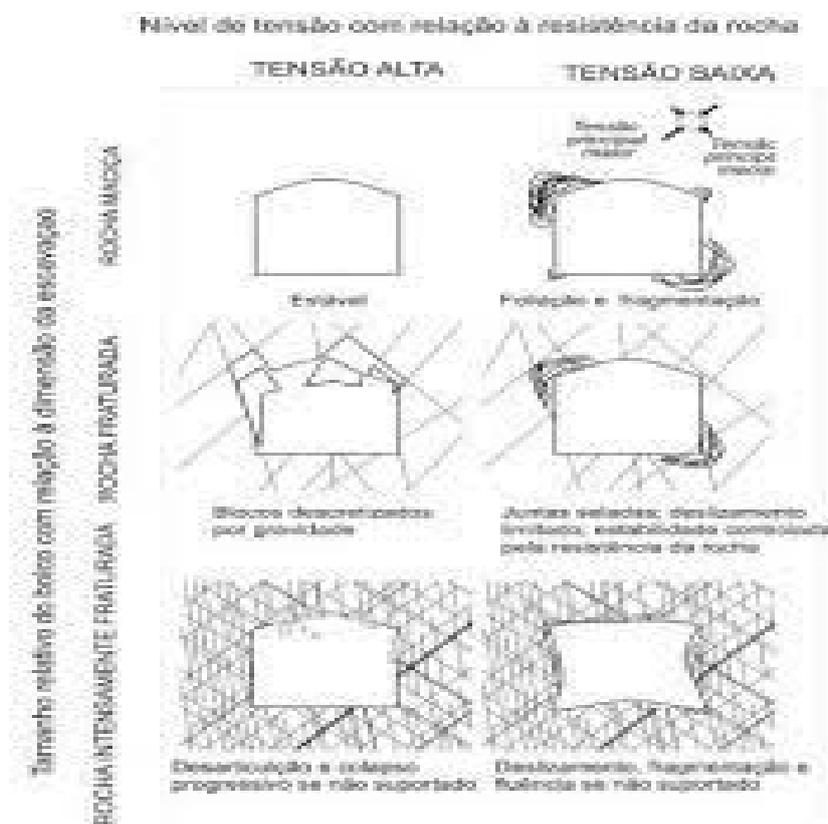
Fonte: Votorantim Cimentos (2023).

### 3.2.2 COMPORTAMENTO DE MACIÇOS ROCHOSOS EM ESCAVAÇÕES SUTERRÂNEAS

Os mecanismos para entendimento de maciços rochosos são amplamente discutidos em trabalhos clássicos como Goodmn (1980), Hoek e Brown (1980a), Hudson (1989), Hoek et al. (1995), Brady e Brown (1985, 2006), dentre outros. Nesses trabalhos, faz-se evidente que, na determinação das características gerais do comportamento do maciço rochoso, são fundamentais tanto a relação da tensão induzida com a resistência da rocha quanto a relação do tamanho dos blocos formados pelas descontinuidades com a dimensão da escavação conforme pode ser observado na figura 7.



Figura 7: Modos de tensão, integridade estrutural e ruptura



Fonte: Hutchinson e Diederichs, 1996.

Para melhor entendimento dessa questão, é necessário explicar alguns conceitos:

O primeiro desses conceitos é o de tensão. Esta, de modo simplificado, é definida como carga sobre uma área. Resulta das cargas da rocha agindo de acordo com a profundidade e com a influência de eventos tectônicos no interior da terra. Os campos de tensões, que é a variação das tensões orientadas em três eixos, é perturbado pela criação das aberturas no subsolo. Essas aberturas produzem mudanças induzidas no campo de tensões que podem diminuir as tensões do maciço rochoso ou aumentar as tensões tangenciais para um limite próximo à resistência da rocha, podendo então ocorrer danos e desintegração no maciço rochoso.



Outro conceito a ser definido é o de resistência, que é a capacidade da rocha de resistir a níveis elevados de tensão sem danos à sua sustentação. O limite de resistência marca o início dos danos, enquanto a resistência final indica o limite máximo de tensão que pode ser suportada antes da ruptura completa do maciço rochoso.

Segundo Herget (1988), as influências dessas características na estabilidade de uma abertura, normalmente, são controladas pelo espaçamento relativo entre a fratura ou pelo tamanho do bloco em relação às dimensões da escavação. O maciço rochoso com espaçamento muito estreito entre as descontinuidades, é propenso a ter problemas de estabilidade e a requerer a adição de suporte artificial. Um outro cenário desenvolve-se quando o maciço rochoso tem uma concentração razoável de descontinuidades muito persistentes (longas) que se interceptam numa abertura. Essas fraturas, ou estruturas de cisalhamento, podem formar grandes blocos intactos, ou cunhas, que podem ser expostas na escavação e necessitar de ancoragem.

Neste trabalho, focaremos nos parâmetros empíricos para classificação dos maciços rochosos. Listaremos a seguir tais parâmetros segundo Hutchinson e Diederichs (1996), mostrando a importância de cada um para uma análise de campo da integridade relativa do maciço rochoso:

- (i) **Resistencia da Rocha Intacta:** As rochas mais duras são mais estáveis em condições normais do que as rochas brandas. A rigidez geralmente está correlacionada diretamente com a resistência.
- (ii) **Tensões do Maciço:** Em profundidade moderada, o maciço rochoso está razoavelmente confinado e as fraturas podem ser mantidas seladas. Próximas à superfície, em áreas de lavra em estágios avançados e que se tornaram relaxadas, as juntas podem abrir-se, reduzindo a rigidez, a resistência e a estabilidade. Em profundidades maiores, as tensões induzidas pela criação da escavação podem exceder à resistência da rocha, o que resulta em instabilidade e fraturamento induzido.



- (iii) **Persistência:** As juntas ou fraturas que são muito persistentes (longas) combinam-se com outras estruturas para formar grandes blocos de rochas soltos. Estes podem necessitar de suporte para garantir a estabilidade da escavação.
- (iv) **Espaçamento:** As juntas com espaçamento muito estreito entre si resulta em blocos com tamanho menor, o que aumenta o potencial para mudanças internas na estrutura da rocha, favorecendo movimentos que reduzem sua resistência.
- (v) **Condições da fratura e da sua superfície:** Fraturas planares deslizam melhor do que aquelas com superfícies onduladas ou recortadas. Similarmente, superfícies lisas ou polidas tem a resistência ao deslizamento friccional mais baixa do que superfícies ásperas ou recortadas.
- (vi) **Presença de água:** A presença de água pode desestabilizar uma escavação por erosão ou enfraquecimento das superfícies da junta. Além disso, a pressão de água reduz a resistência ao atrito para o deslizamento nos planos de fratura e desestabiliza ainda mais o maciço rochoso.
- (vii) **Orientação:** As fraturas podem cruzar com uma escavação em orientações desfavoráveis, criando a possibilidade de deslocamentos, deslizamento de blocos, deslizamento induzido por tensão ou separação na parede da escavação.

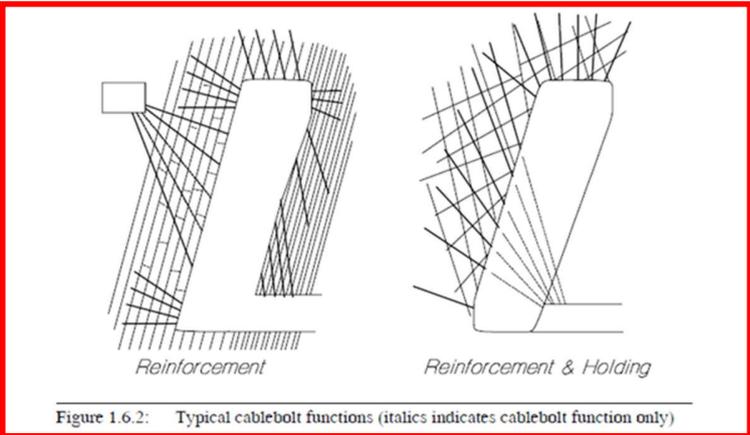
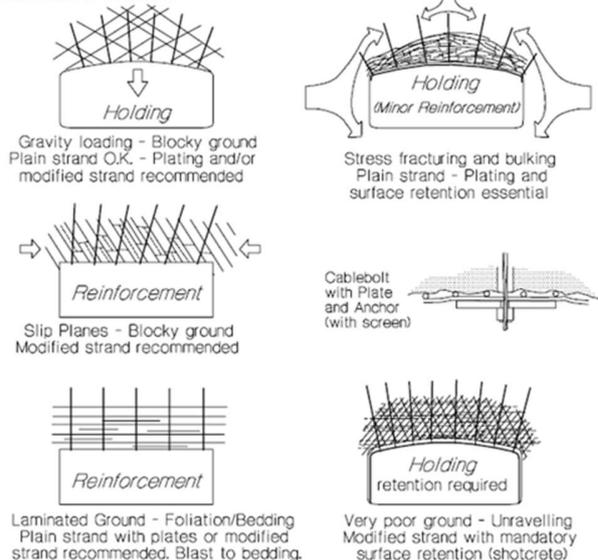
### 3.2.3 SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DOS SALÕES (REALCES) POR CABOS NA MINA BALTAR

O cabo tem a função de segurar ou evitar o movimento do maciço no sentido cuja face tem movimento. Portanto, o cabo deve ser instalado com ângulo mais próximo possível no sentido do movimento. A figura 7, mostra algumas aplicações de cabos, sendo que a que se aproxima as aplicações na mina do Baltar são os dois últimos exemplos.



Figura 8: Aplicações de cabos em suporte de maciço de escavações de grandes dimensões.

**Cablebolt Function**



Fonte: (Villaescusa, 2014).

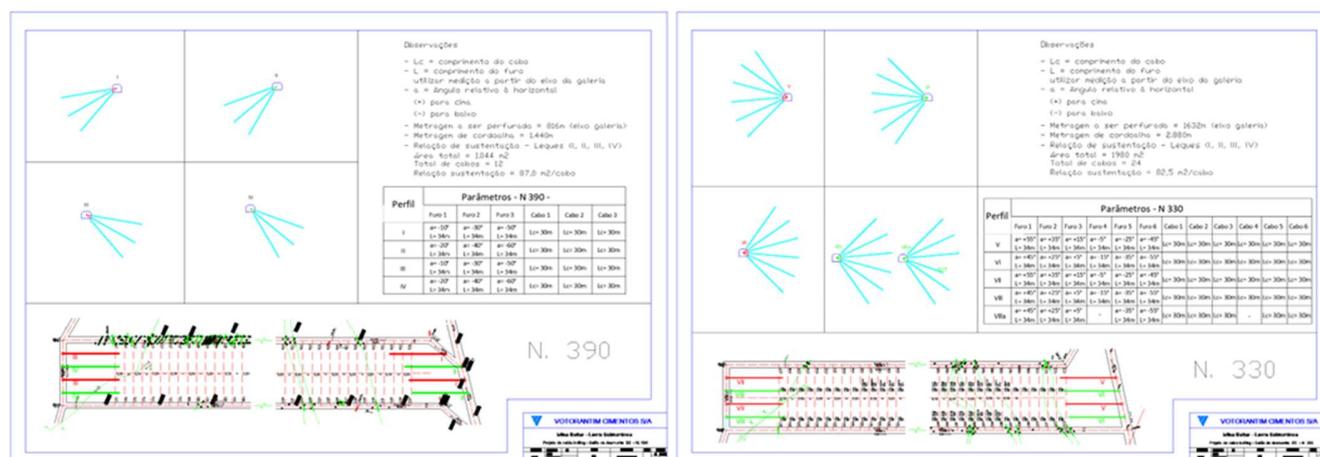


Na mina subterrânea da VC, tem-se os seguintes níveis operacionais (cotas): N530, N460, N420, N 390, N330 e o N 280 sendo o nível atual mais profundo da mina. De acordo com as análises, temos os níveis superiores sem nenhum tipo de suporte (N530, N460 e N420). As cordoalhas (cabos) são instaladas em dois locais e com objetivo de sustentações:

- (i) Pilares barreiras de capa e lapa no N390 e N330;
- (ii) Suporte interno dos leques de lavra no N390 e N330;

Na sequência, tem-se o esquemático dos leques de cabos executados anteriormente ao trabalho de conclusão de curso bem como os pilares barreiras dos interníveis N390 e N330.

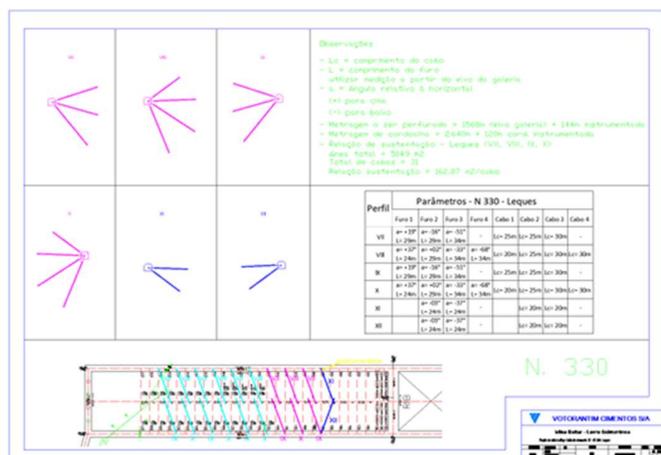
Figura 9: Plano de cordoalhas para os pilares barreiras nos extremos dos salões.



Fonte: Votorantim Cimentos (2023).



Figura 10: Plano de cordoalha para o reforço das faces livres.



Fonte: Votorantim Cimentos (2023).

Para o caso (i) a cordoalha tem a função de reforçar o pilar barreira da face do salão. Os cabos estão ancorados na galeria e quase perpendicular a foliação da rocha e no mesmo sentido do movimento da face livre do salão (último corte e face definitiva da parede do realce). Esse suporte é importante para garantir a estabilidade da face final do salão e o longo prazo do pilar barreira.

Para o caso (ii) suporte dos leques, o objetivo da cordoalha é reduzir a sobre quebra na face livre durante a lavra. Os cabos atuais, estão instalados em 20 ° em relação a face livre e cerca de 60° em relação a foliação. Essa geometria será objeto de estudo com a proposta de redimensionar/ redesenhar os mesmos com o propósito de reduzir a geração de grandes blocos nas galerias de transporte.



### **3.2.4 SISTEMA DE SUSTENTAÇÃO DE GALERIAS DE DESENVOLVIMENTO NA MINA BALTAR**

Conforme comentado, toda a lavra da mina Baltar se dá em uma rocha muito competente de litologia predominante Calcário e o Dolomito, diante disso, tanto pela profundidade das operações, quanto pela competência da rocha, a maior parte dos túneis de acesso aos salões de lavra (aproximadamente 85%) são desenvolvidos sem a necessidade de suporte de superfície (cavilhas, tirantes, telas etc). O suporte de superfície começou a ser utilizado no nível mais profundo em operação cota N280 e em pontos específicos, ou seja, onde a equipe avaliava (de forma corretiva) a necessidade de aplicação por motivo de queda de blocos (chocos) de forma involuntária. Temos em operação na unidade as seguintes nomenclaturas/ denominações:

- (i) Rampas principais com seção: 7 metros de altura por 6 metros de largura;
- (ii) Galerias de transporte com seção: 6 metros de altura por 6 metros de largura;
- (iii) Galerias de perfuração com seção: 5 metros de altura por 4.5 metros de largura;

Iremos analisar todas os tipos de galerias para entender onde tem-se a maior incidência desse tipo de evento (choco) e a partir de então procurar entender o porquê dos eventos e propor sugestões para redução de tais anomalias.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 METODOLOGIA DMAIC**

A metodologia Lean Six Sigma (LSS) é resultante da integração entre o programa Six Sigma e Lean Manufacturing. Nessa metodologia os processos são focados em passos quantitativos, estruturados, disciplinados focados na melhoria dos processos já existentes com aumento da lucratividade e diminuindo os custos (BRASIL, 2020).



Dentre as ferramentas da metodologia LSS, temos o DMAIC que se baseia na medição focada na melhoria de processos e redução de variação através de aplicação de algumas etapas. Essas etapas são compostas por: Define (Definir), Measure (Medir), Analyse (Analisar), Improve (Melhorar) e Control (Controlar). Na figura 11 está representado a definição do DMAIC.

Figura 11: Definição do método DMAIC.



Fonte: Voitto (2016).

Na tabela 1 são apresentadas as etapas e características relacionadas a metodologia DMAIC.

Tabela 1: Etapas da metodologia DMAIC.

ETAPA	CARACTERÍSTICAS
Etapa D: <i>Define</i>	Na primeira etapa do DMAIC, é definido o escopo do projeto com precisão, identificando o processo gerador do problema, definindo uma meta global e elaboração do contrato do projeto.
Etapa M: <i>Measure</i>	Na segunda etapa do DMAIC, é mensurado quantitativamente os dados coletados, avaliando as causas potenciais no processo mapeado e definindo os focos do projeto.
Etapa A: <i>Analyze</i>	Na terceira etapa do DMAIC, é identificado as causas raiz do problema com fatos e dados comprovando-os.



Etapa I: <i>Improve</i>	Na quarta etapa do DMAIC, é avaliado o risco de implementação, elaborando e executando o plano de ação definido.
Etapa C: <i>Control</i>	Na última etapa do DMAIC, é medido os resultados e definidos os mecanismos que garantam a sustentabilidade das melhorias executadas e alcançadas.

Fonte: Adaptado de Brasil (2020).

## 4.2 Contextualização do Problema

Conforme foi mencionado, este trabalho irá utilizar a metodologia Lean Six Sigma que utiliza o DMAIC para a melhoria de processos, diante disso, a definição do problema foi baseado em levantamento de dados de tempo improdutivo da frota de carga e transporte devido a geração de grandes blocos (matações) nos pontos de carregamento. Foi evidenciado que no ano base 2022 em comparação a 2021, ocorreu um expressivo aumento de horas paradas dos caminhões aguardando carregamento, justamente pela necessidade das máquinas de carga ficarem tentando desobstruir as faces livres com grandes blocos impossibilitados de serem transportados. Tais dados podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2: Histórico de horas paradas por caminhão devido mataco na lavra.

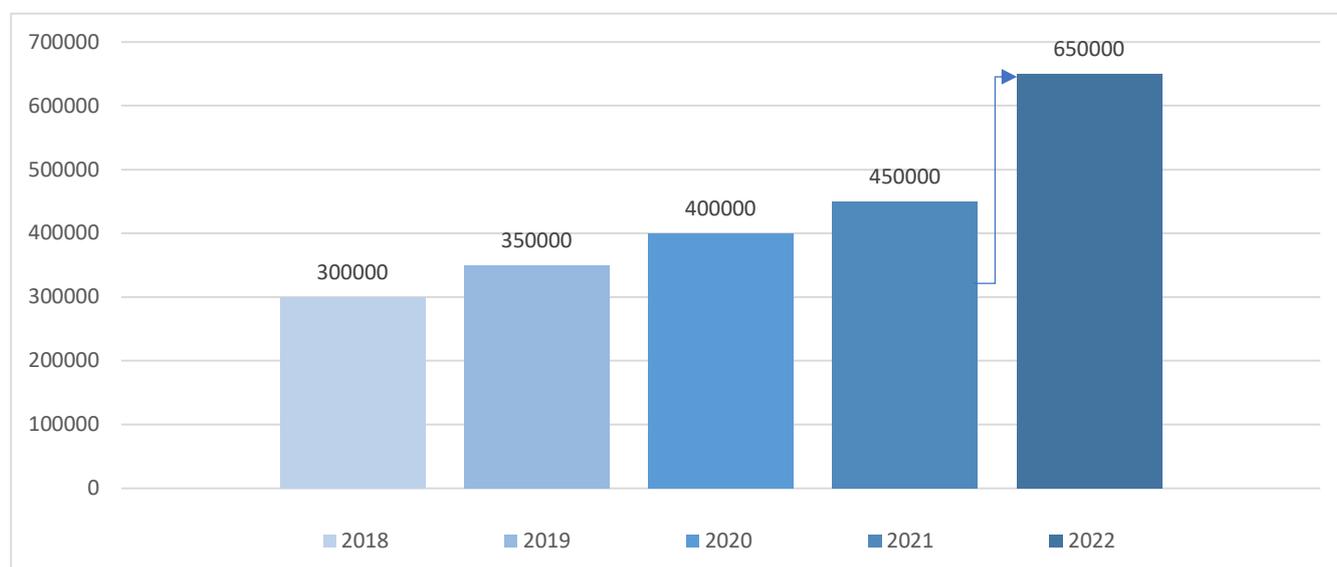
Caminhao	Ano				
	2018	2019	2020	2021	2022
FMX003	96	92	38	79	97
FMX004	78	84	98	40	103
FMX005	56	70	89	92	140
FMX008	90	45	104	109	173
FMX009	66	78	110	125	50
FMX014	72	89	104	130	195
FMX015	45	102	125	145	230
<b>Total de Horas Aguardando Carregamento Devido Presença de mataco Obstruindo a Lavra ( Por ano)</b>	<b>503</b>	<b>560</b>	<b>668</b>	<b>720</b>	<b>988</b>



Ao fazer uma segunda análise, comparando 2021 e 2022 foi observado cinco pontos importantes:

- (i) A necessidade do aumento de produção da unidade na ordem de 30% para atendimento à fábrica de cimento, devido demanda de mercado.

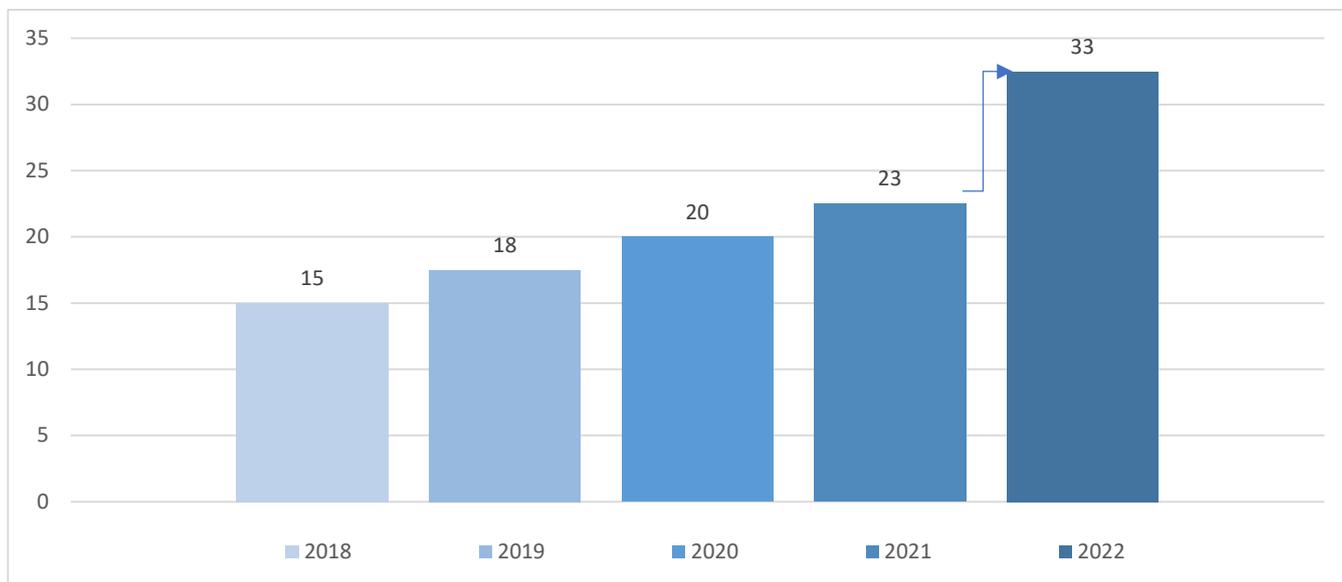
Figura 12: Histórico da produção de ROM nos últimos cinco anos.



- (ii) Aumento de desmontes/ detonações nos realces de lavra em operação, visto que os “realces” de produção subsequentes ainda estão em fase de desenvolvimento.

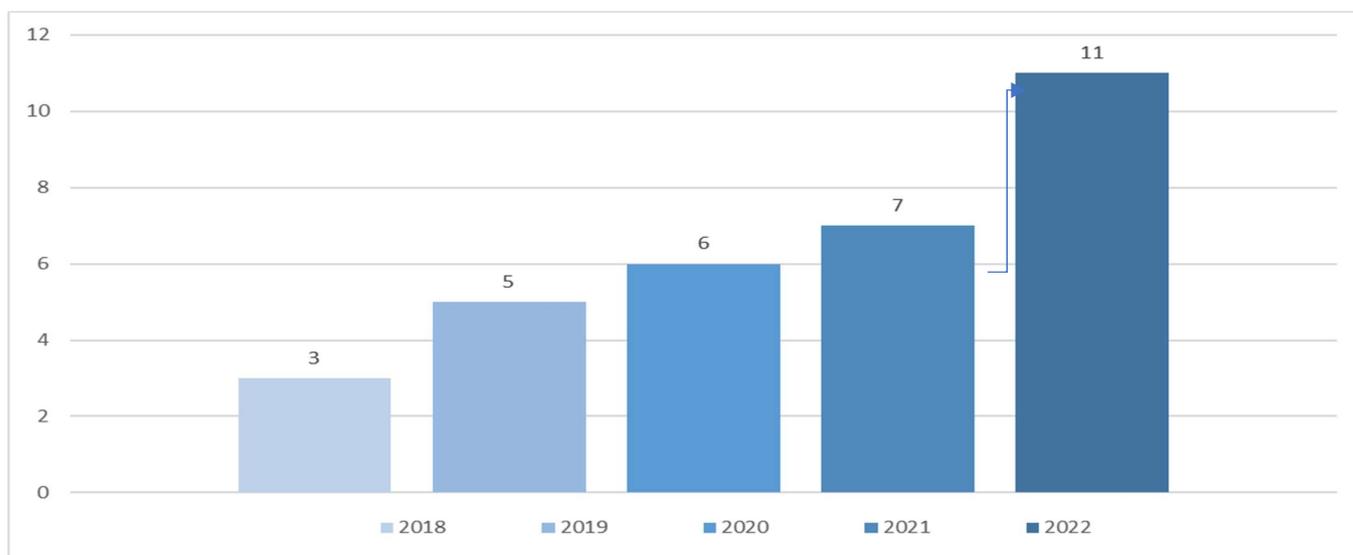


Figura 13: Quantidade de desmontes de lavra realizados nos últimos cinco anos.



- (iii) Presença recorrente de pequenos blocos de rocha desprendidos do teto após as detonações nos pontos de carregamento.

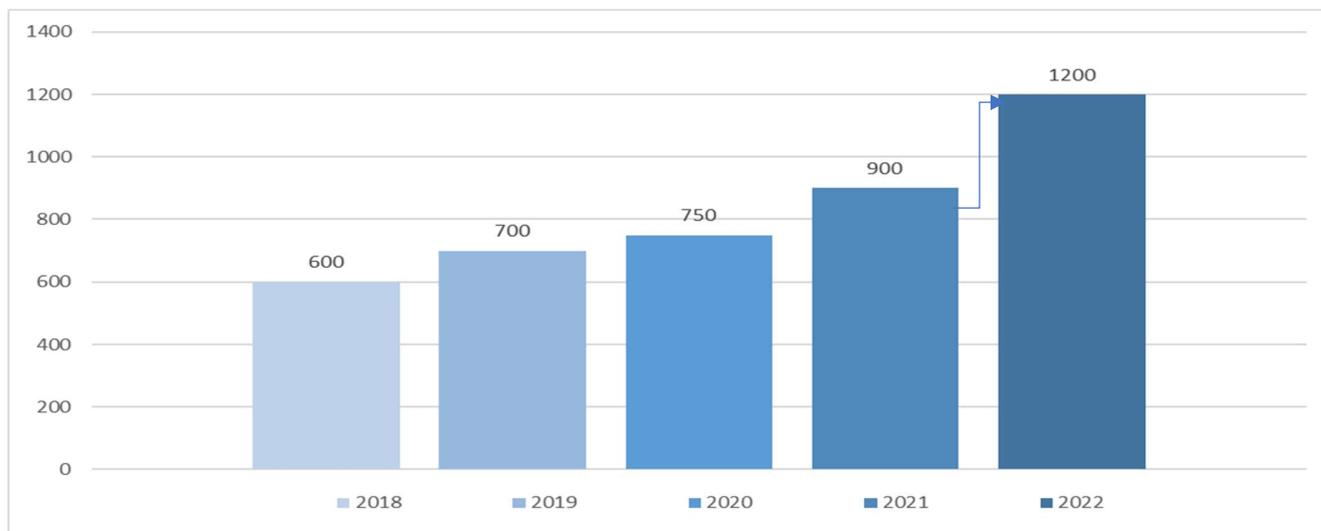
Figura 14: Evolução de FOG'S nas galerias de transporte nos últimos cinco anos.





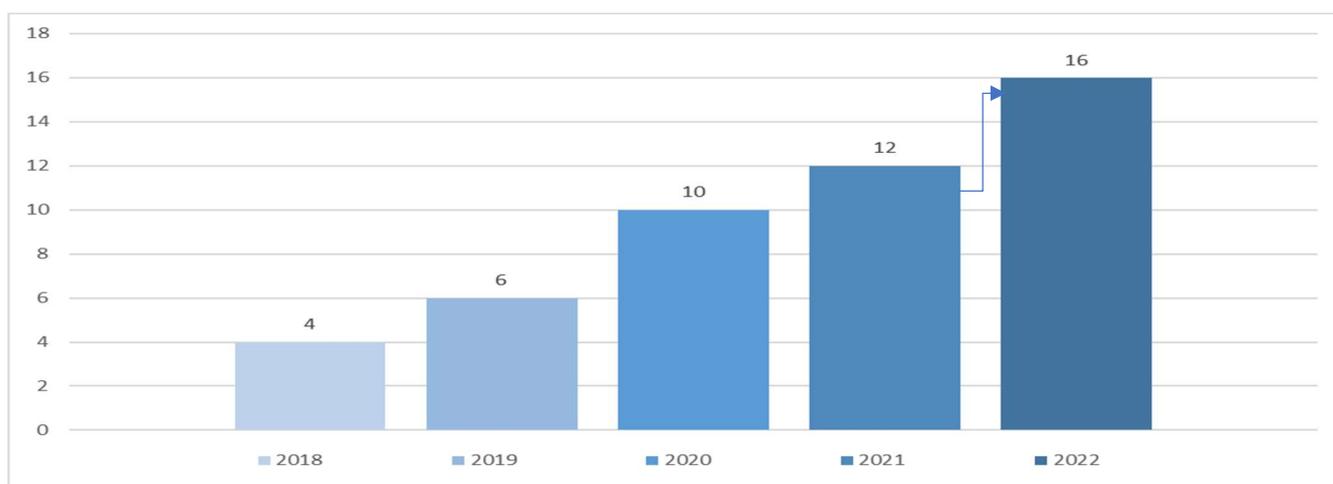
- (iv) Incremento de custo de rompedor para quebra de matacões nas áreas de lavra (a depender do tamanho e posição dos blocos dentro da lavra).

Figura 15: Horas totais de utilização de rompedor para quebra de matacões entre 2018 e 2022.



- (v) Necessidade de fogos secundários para desobstrução das áreas de produção quando as máquinas de carga e rompedor não conseguem realizar a liberação.

Figura 16: Total de fogo secundário realizado entre 2018 e 2022.





A partir dos tópicos analisados acima, foram realizadas reuniões de brainstorming com uma equipe multidisciplinar (operação de mina, planejamento e mecânica de rochas) para identificar as possíveis causas da geração de matacos nas áreas de lavra. Com tais informações, focou-se em duas terminologias: mão de obra e método.

Diante disso, foi priorizado as causas através da matriz GUT (gravidade, urgência e tendencia), para logo após, através da análise dos “5 Porquês” chegar as causas raízes associadas. A seguir pode-se observar as principais causas raízes:

- (i) Lay out inadequado do cabeamento para suportar a grande massa do stope.
- (ii) Inexistência de controle/ padrão de “traço” de cimento para o cabeamento.
- (iii) Projeto de perfuração inadequado favorecendo deslocamentos.
- (iv) Malha de perfuração inadequada, favorecendo geração de grandes blocos.
- (v) Falha na qualidade da perfuração.
- (vi) Operadores recém habilitados na operação de simba ( equipamento utilizado para perfuração dos furos de produção em mina subterrânea).
- (vii) Tipo de bit utilizado inadequado para o tipo de rocha.
- (viii) Equipamento inadequado para o tipo de perfuração/ metragem planejada.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 AÇÕES PROPOSTAS

Após definirmos as causas raízes, foram planejadas ações no padrão 5W2H (abreviação de “5 Who 2 How” que é a elaboração de um plano de ação que determina quem irá fazer cada tarefa e como irá realizá-las), com foco no primeiro momento em ações de baixo esforço e alto impacto, mas também deixando planejado ações de alto esforço e alto impacto para fechamento do projeto como um todo.



A primeira ação foi a validação junto o time de planejamento e operação de mina de dois layouts com foco em reduzir a geração de blocos (queda de forma involuntária após as detonações), sendo que uma das ações poderia ser implementada de forma imediata, e a outra seria incluída no sequenciamento do desenvolvimento dos novos blocos de lavra a serem abertos (escavados).

Conforme visto por levantamentos topográficos, logo após cada desmonte era possível observar uma geometria concava causada pela sobre quebra da face (quebra indesejada e geradora de grandes blocos na galeria de transporte), diante deste fator, foi definido e decidido que iria ser desenhado os leques de produção com esta geometria, com o objetivo de perfurar essa região “em balanço” melhorando a fragmentação dos possíveis blocos a serem gerados, a ideia é que o maciço entrasse em “equilíbrio” com a forma concava planejada da face livre conforme pode ser observado na figura 17.

Figura 17: Na parte esquerda da figura é mostrado o resultado do desmonte da face livre com cordoalha e sem cordoalha. Na parte direita é a sugestão de geometria dos leques em função do efeito do resultado do desmonte atual.



A sugestão a médio prazo é desenvolver uma galeria no meio do stope planejado de lavra com objetivo específico de sustentação, desta forma, conseguiria-se “travar” de forma perpendicular uma grande porção de rocha, reduzindo expressivamente os eventos que ocorrem nos dias de hoje. Para tal, foi acertado junto ao time de planejamento de mina que iria-se aplicar tal metodologia em um bloco de lavra específico, monitorar os ganhos e após as análises, avaliar



a viabilidade de aplicar para toda a mina nos realces subsequentes. Tal design, pode ser observado nas figuras 18, 19 e 20.

Figura 18: Esquemático de cabeamento para contenção de grandes blocos.

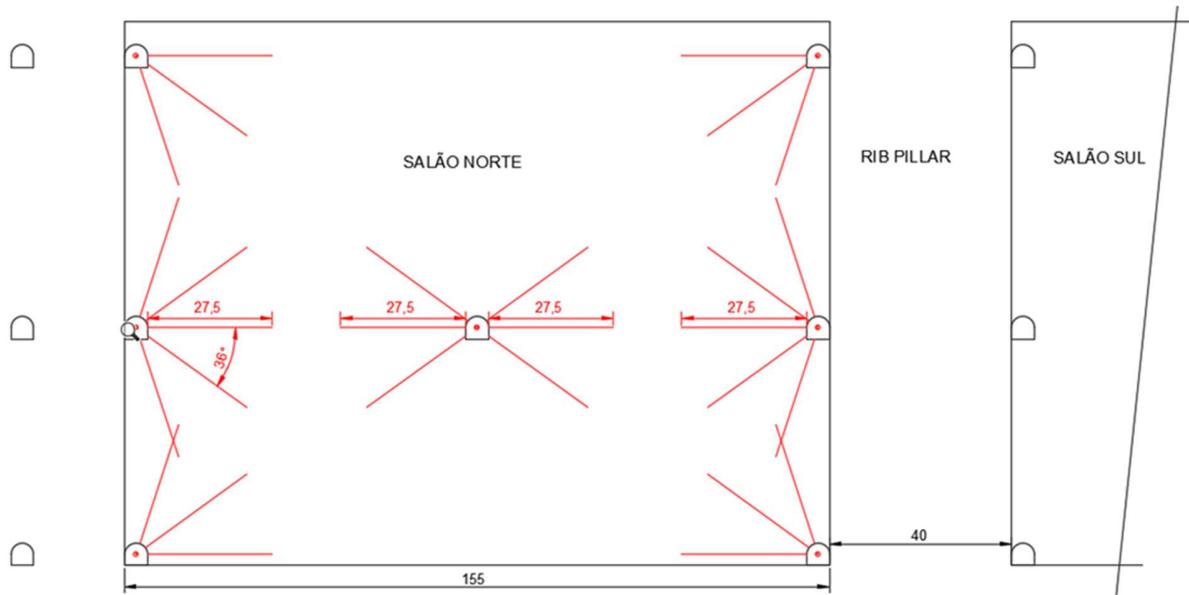


Figura 19: Detalhamento da galeria a ser desenvolvida com foco na contenção do maciço.

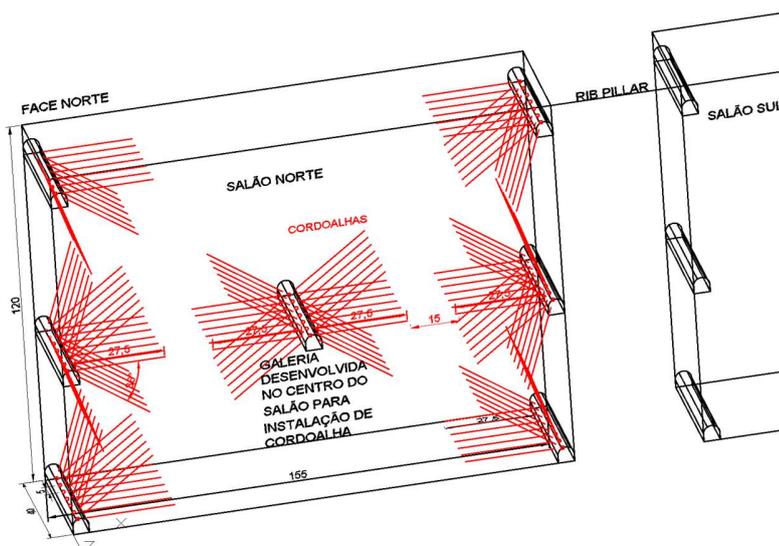
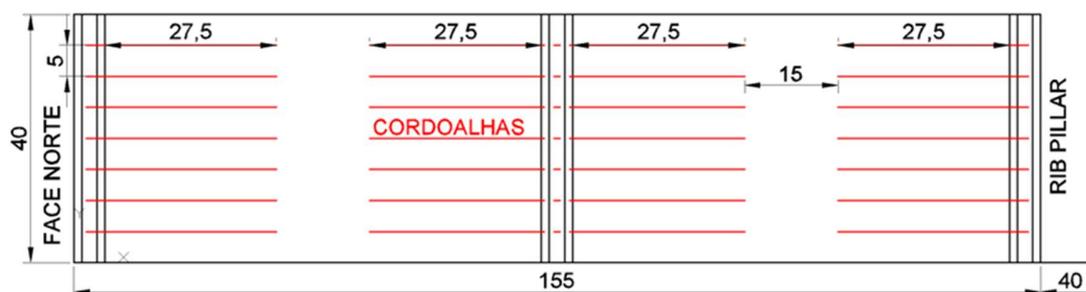




Figura 20: Geometria de proposição de cordoalhas perpendiculares à face dos leques.



No segundo tópico abordado, foi criado um padrão operacional para a equipe de instalação e injeção de cabos, pois observou-se em acompanhamento de campo, que esta tarefa não tinha procedimento claro e definido para as equipes que realizam tais trabalhos, e sem essas definições, cada equipe realiza a medida da “massa” de uma forma, não garantindo a qualidade e consistência do “traço” do cimento a ser injetado no furo de contenção. Como reforço de evidência nos testes de tração (para verificar a eficiência do cabo instalado), cerca de oitenta por cento apresentaram falha (escorregou) antes do que era recomentado pela equipe de geotecnia.

Após a criação do padrão e nivelamento de toda a equipe, este tipo de ocorrência caiu para quinze por cento.

Tabela 3 e 4: Teste em cabos antes e após a criação do procedimento de “graute”.

Cabos testados Antes da Criação do Procedimento		Total de Cabos Testados
Cabos com carga Ok	Cabos com carga Não Ok ( escorregaram)	
20	80	100

Cabos testados Após da Criação do Procedimento		Total de Cabos Testados
Cabos com carga Ok	Cabos com carga Não Ok ( escorregaram)	
85	15	100



A terceira ação realizada aborda as causas raízes (iv, v, vi e vii). Iniciamos os trabalhos neste tópico com a mudança da malha de perfuração de leques de produção, pois identificou-se uma malha muito grande para o tipo de equipamento e rocha presente na unidade. Tal malha, (afastamento e espaçamento) também era um fator de grande contribuição para a geração de grandes blocos na área de transporte. Juntamente com a mudança da malha, foi realizado a troca do Bit de perfuração, pois o bit esférico utilizado favorecia o desvio na perfuração (e segundo o fabricante, é inadequado para perfurações longas como as que ocorrem em Santa Helena), bem como dificulta a limpeza dos furos de produção. Decidiu-se então, realizar testes com bit do tipo retrac com drop center, com objetivo de reduzir o índice de desvios, por consequência melhorar a limpeza dos furos e reduzir o torqueamento das hastes/ geração de blocos de deslocamento. (Bit é a broca de que vai na ponta da coluna de perfuração que serve para cortar a rocha, deixando após a perfuração o furo pronto para ser carregado com explosivos. O Bit retrac com drop center é um tipo específico de bit, usado para perfurações longas onde se faz necessário manter o furo com o mínimo de desvio possível, pois tem furos adicionais para saída de água com objetivo de aumentar o fluxo de limpeza do furo e com isso auxilia no seu direcionamento).



Figura 21: Projeto de perfuração para produção Mina Baltar.

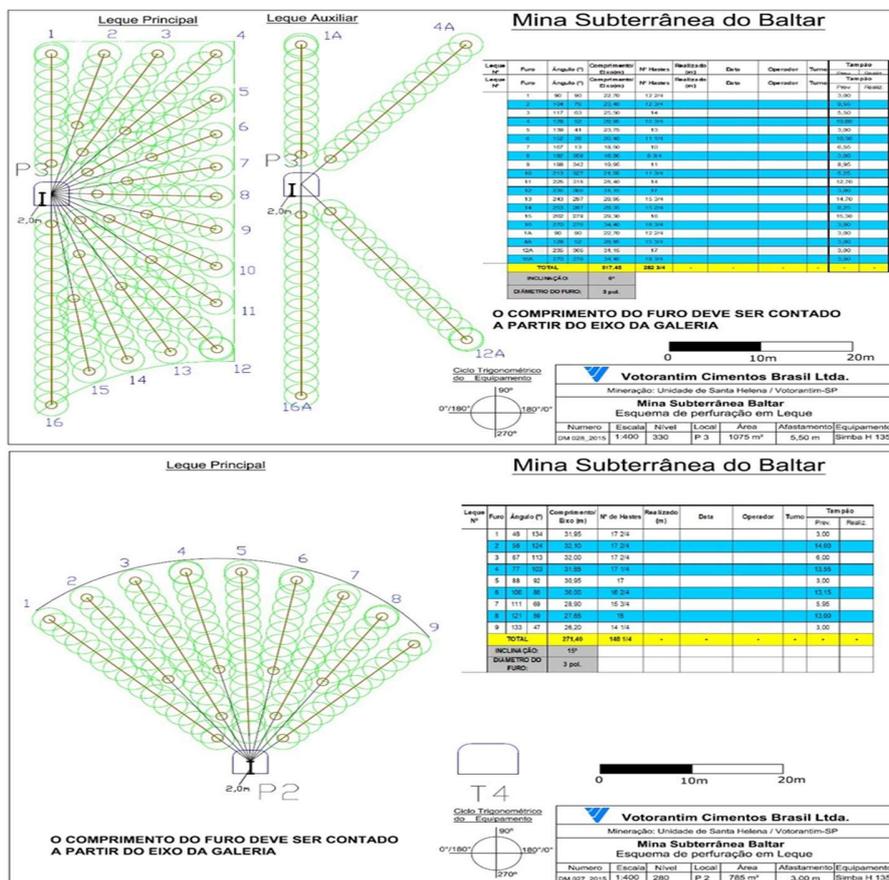


Tabela 5: Malha e bits utilizados antes do estudo.

Tipo de Bit	Tipo de Stope	Sentido de Perfuração	Malha
3" Esférico	Conectado	Asc/Desc	6,4x5,4
3" Esférico	Cego	Asc	4,6x4,6





Tabela 6: Malha e bits utilizados após o estudo.

Tipo de Bit	Tipo de Stope	Sentido de Perfuração	Malha
3" Retraco com Drop Center	Conectado	Asc/Desc	4x3
3" Retraco com Drop Center	Cego	Asc	3x3

Na sequência dos trabalhos, após validação da nova malha e bit a serem utilizados, foi solicitado uma visita técnica do fabricante do equipamento de perfuração, para realizar uma análise criteriosa, dos parâmetros operacionais do equipamento (ajustes que poderiam estar descalibrados favorecendo desvios e baixa produtividade), bem como acompanhar em campo todos os operadores e após a avaliação (caso necessário), realizar treinamento de reciclagem com toda a equipe com objetivo de nivelar informação e padronizar a melhor metodologia operacional para o tipo de equipamento e rocha a ser perfurada.



Figura 22: Recorte do relatório técnico da fabricante do equipamento de perfuração.



Ciente: Votorantim Cimento  
Local: Mina Santa Helena  
Resp.: Velimir Morales e Vinicius Gilio

Contato: João Batista      Função: Consultor Técnico  
Data: 06 a 17 de abril 2023  
Assunto: Simba 1354, apresentando desvios na perfuração

#### Informações preliminares

As informações passadas pela equipe da Votorantim Cimento, é que os resultados obtidos na perfuração longa, tem apresentado desvios, onde tem provocado alguns deslocamentos durante o desmonte da perfuração de Fandril. (02 Simbas 1354)

Informação passadas pela equipe sênior da mineração.

Visita ao site: (06 a 17 de abril de 2023)

#### Observações iniciais

Durante a visita ficou evidente que a produtividade dos equipamentos de perfuração longa, encontram-se com seus parâmetros operacionais alterados. Isso traz como consequência possíveis desvios durante o emboque do furo, baixa taxa de penetração, qualidade e performance prejudicada, além de provocar desgaste prematuro do material de extensão. (Possíveis danos que possam ser gerados especialmente na perfuratriz)

Após a nossa avaliação inicial pode-se observar que além de apresentar desvios, também se tem problemas com uso de bit standard em perfurações extremamente longa, onde se utiliza bit com botões de 9 mm de diâmetro.

Durante o acompanhamento, podemos constatar que a equipe de operadores, precisam de um treinamento de reciclagem operacional.

Como última iniciativa do projeto, foi realizado um mapeamento e sugestão do equipamento ideal para a atual realidade da mineração subterrânea de Santa Helena (mina Baltar), visto que a máquina de perfuração atualmente utilizada, tem data de fabricação de 2008 e já não atende de forma plena os requisitos de segurança, performance e produtividade que a unidade necessita.



Desta forma, em análise de mercado e em estudos de viabilidade com as principais fornecedoras de equipamentos de perfuração subterrânea, chegou-se a duas opções para substituição do Simba 1354 da Epiroc atualmente na mina do Baltar, são elas:

Figura 23: Equipamento Sandvik.



Fonte: Catálogo Sandvik (2023).

Figura 24: Equipamento Epiroc.



Fonte: Catálogo Epiroc (2023).

A Previsão inicial de substituição do equipamento de perfuração atual é para 2025, mas com o estudo realizado e as novas exigências da unidade tanto no quesito segurança quanto em performance, a estratégia é realizar a troca do mesmo em 2024, levando como premissa inicial as análises realizadas através deste trabalho.



## 5.2 RESULTADOS OBTIDOS

Pode-se destacar que as etapas do projeto, bem como a priorização das atividades teve como foco as causas raízes mais impactantes, tal sistemática utilizada através da metodologia da ferramenta DMAIC. A premissa principal do projeto era reduzir o total de horas paradas dos equipamentos de transporte aguardando a liberação/desobstrução das lavras por matacões. Foi

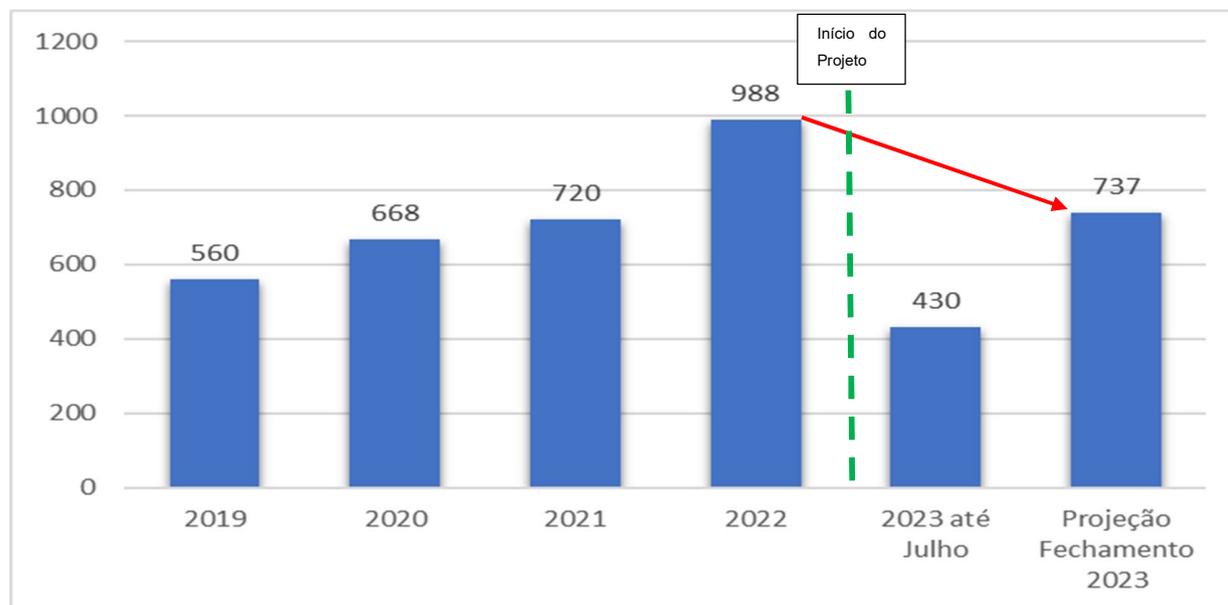
obtido uma redução significativa destas horas com as medidas imediatas segundo demonstrado na tabela 7, e acredita-se que ocorrerá ganhos maiores ainda com as ações de médio prazo.

Tabela 7: Comparativo de horas paradas por caminhões antes e após as ações.

Caminhão	Ano					
	2019	2020	2021	2022	2023 até Julho	Projeção Fechamento 2023
FMX003	92	38	79	97	35	60
FMX004	84	98	40	103	45	77
FMX005	70	89	92	140	53	91
FMX008	45	104	109	173	65	111
FMX009	78	110	125	50	30	51
FMX014	89	104	130	195	92	158
FMX015	102	125	145	230	110	189
<b>Total de Horas Aguardando Carregamento Devido Presença de mataco Obstruindo a Lavra ( Por ano)</b>	<b>560</b>	<b>668</b>	<b>720</b>	<b>988</b>	<b>430</b>	<b>737</b>



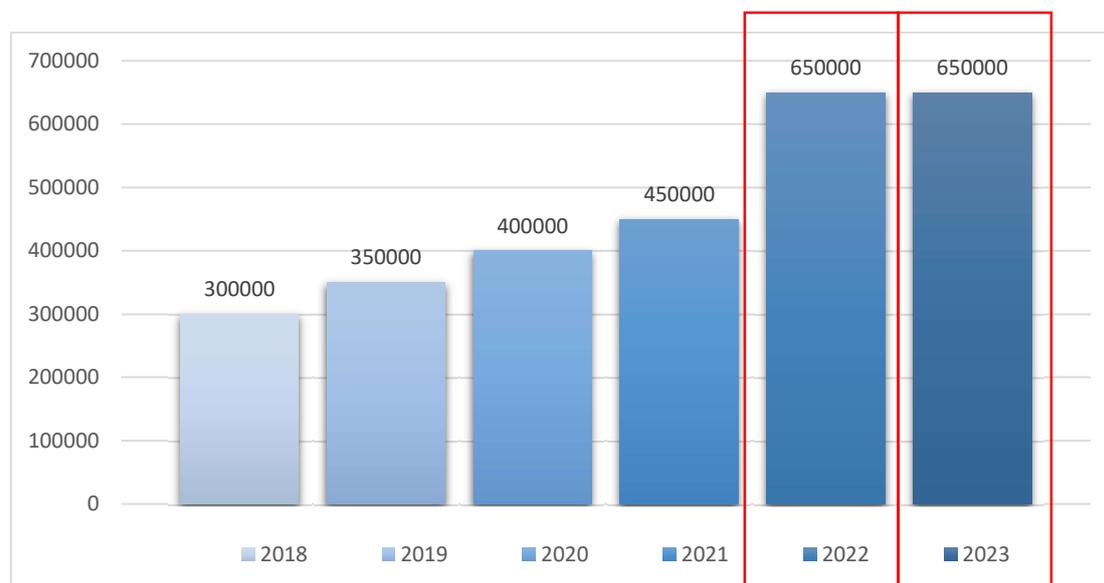
Figura 25: Comparativo de horas paradas por caminhões antes e após as ações.



Pode-se observar nos dados acima, que as horas da frota de caminhão aguardando liberação/ desobstrução da lavra por presença de matacões reduziu de forma expressiva, tendo como dados medidos até final de julho de 2023, 430 horas totais da frota de transporte ociosa aguardando liberação dos pontos de produção, fazendo uma projeção simples, como caráter de mensuração, chegaríamos em dezembro mantendo os mesmos valores praticados até o mês de julho, com 737 horas da frota aguardando carregamento por presença de matacões, um redução de aproximadamente 25% ( lembrando que o plano de produção/proposto pela empresa é manter o patamar de 650.000 tons de minério/ano, ou seja, mesmo valor praticado em 2022), conforme pode ser visto na figura 26.



Figura 26: Plano de produção proposto para 2023.



Um outro paralelo que pode ser feito para elucidar a melhoria no processo de carga e transporte, é a redução das horas totais de utilização de rompedor para liberação dos realces, bem como a menor quantidade de desmontes secundários devido a presença de matações. A seguir, tem-se os gráficos que demonstram tais melhoras de performance.



Figura 27: Horas totais de utilização de rompedor para quebra de matacos entre 2018 e 2023.

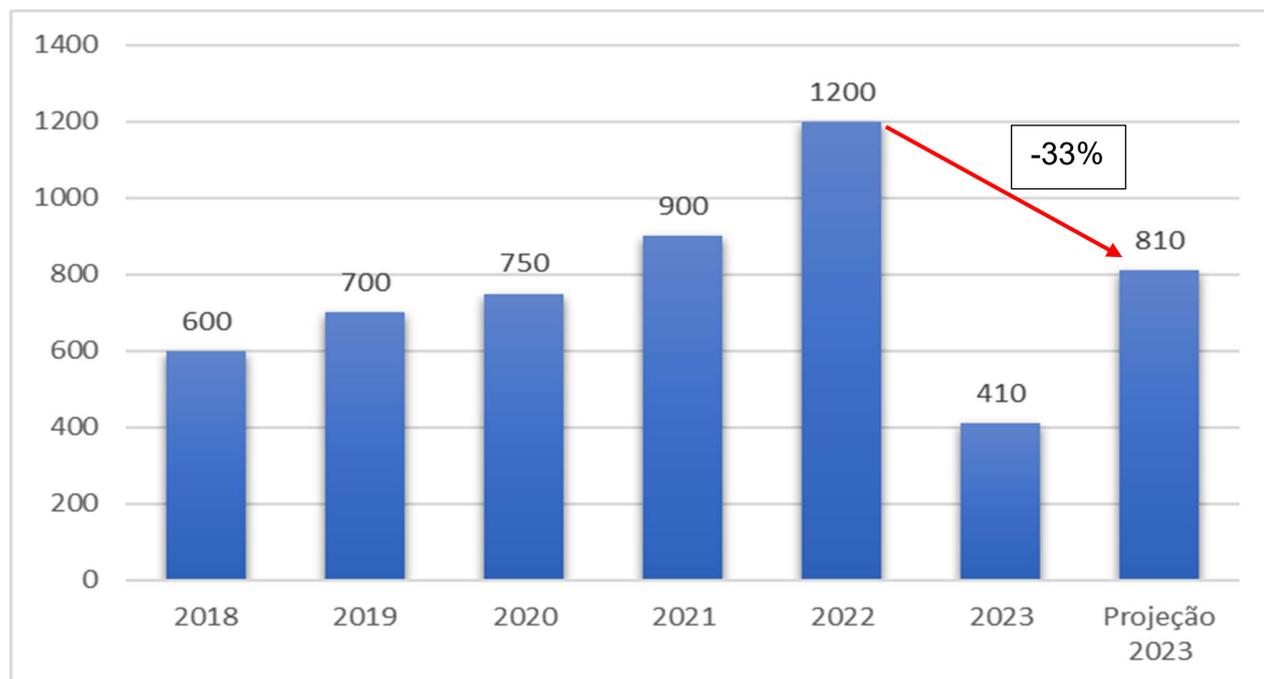
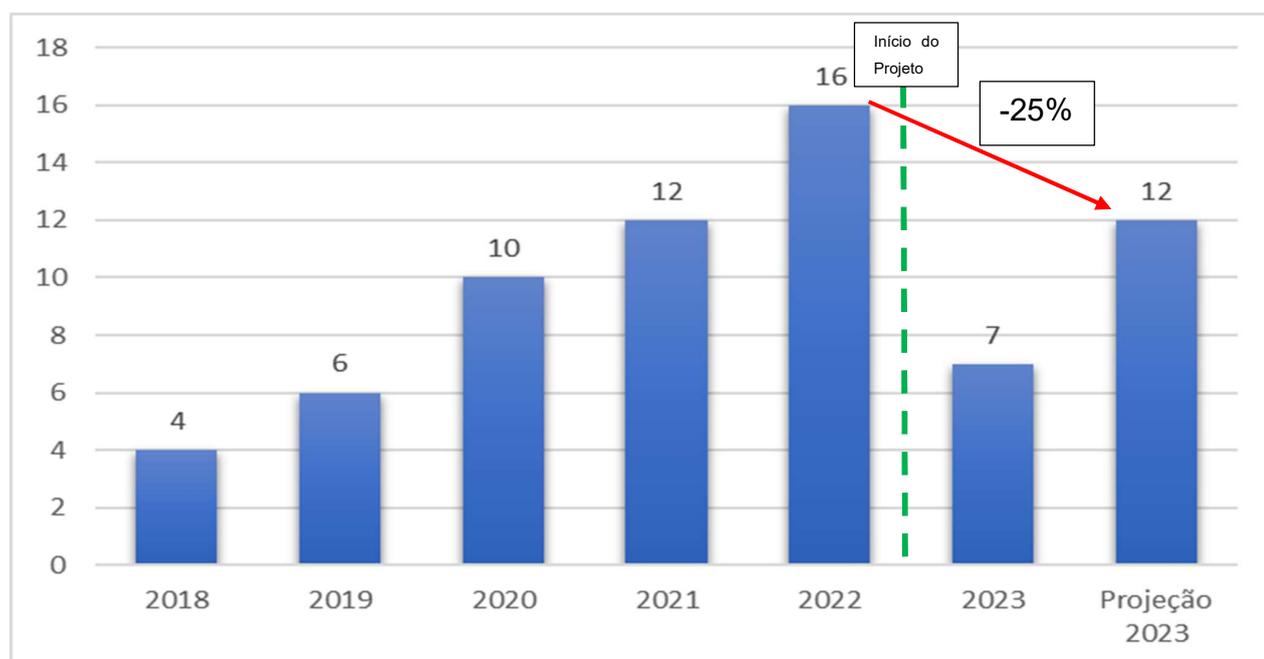


Figura 28: Total de fogo secundário realizado entre 2018 e 2022.





## 6 CONCLUSÕES

A lavra subterrânea é uma metodologia bastante complexa e necessita de análise de diversos fatores bem como equipes multidisciplinares para que seja viabilizada de forma produtiva e segura. Neste trabalho, foi dado ênfase no sistema de suporte para garantia da produção de forma a não ter eventos indesejados nos realces em operação (redução de matacos), pois a mina Baltar tem a particularidade de ser a única mina subterrânea de calcário das américas e trabalha com produção de corpos muito potentes, gerando grande abalo no maciço rochoso após cada detonação.

Desta forma, nas análises, foi observado que a retirada do ROM (calcário) para a produção de cimento, não estava apresentando o resultado esperado em relação ao tempo de carregamento da frota de caminhões ( fazia-se uma programação de produção em relação a massa planejada desmontada versus a distancia média de transporte) e ao final do dia ou semana, tal produção não era entregue devido obstrução dos pontos de carregamento por matacos, gerando expectativas negativas e comprometendo todo o programa de produção da fábrica. Diante disso, o projeto foi criado e desenvolvido com objetivo de identificar e mapear os principais desvios/ falhas que estavam contribuindo para a geração dos grandes blocos que obstruíam os pontos de carregamento. Para isso, foi utilizado a metodologia DMAIC para entender as causas dos problemas.

Dentre as causas raízes, podemos dividir o problema em três pontos principais: Planejamento, pessoas e equipamento, onde os dois primeiros foram o foco principal do projeto, visto que tínhamos iniciativas e elementos para atuar de forma rápida, e o último foi estudado também e proposto um equipamento com dimensionamento adequado para a nova realidade operacional da mina subterrânea do Baltar.

No tópico planejamento, foi identificado a possibilidade de mudança do layout operacional, tanto para realizar a perfuração no sentido da folheação da rocha (sentido de quebra do maciço) e também a criação/ projeto de galerias intermediárias para que o cabeamento fosse realmente



efetivo e conseguisse atuar de forma plena a conter a grande porção de rocha em “balanço” (atuação perpendicular).

No tema pessoas, foi identificado questões administrativas, tais como tipo de bit inadequado para a perfuração de rocha da unidade, e malha de perfuração incompatível com o tamanho do stope de lavra ( favorecendo desvios e geração de grandes blocos), equipe sem o devido treinamento no equipamento de perfuração( tanto operacional quanto de manutenção) outro fator causador de baixa qualidade operacional/ performance da máquina, o que direcionava para uma perfuração imprecisa e geração de maticos e por fim a equipe de cabeamento também trabalhava sem padrão e direcionamento correto para a instalação das cordoalhas ( influenciando na qualidade da argamassa que segura o cabo no furo).

Desta forma, podemos compreender a importância de estudar e conhecer as etapas unitárias de um processo e analisar qual é o real gargalo do ciclo produtivo, lembrando que gargalo é algo móvel, ou seja, hoje está no carregamento, amanhã pode estar na perfuração.

Após tal definição, fez-se necessário aprofundar juntamente com um time multidisciplinar para entender o porquê do processo não estar “fluindo” conforme o planejado e traçar estratégias para corrigir a rota e mudar o “gargalo” de posição, pois a melhoria de processos é algo extremamente móvel/ contínuo e dinâmico e requer aprimoramento constante para a empresa se manter produtiva, segura e competitiva no mercado em que está inserida. Tal objetivo está sendo cumprido e possivelmente o gargalo será transferido da equipe de carregamento e transporte, para a área de perfuração de produção.



## REFERÊNCIAS

BRASIL. A. C. S. **Aplicação da metodologia DMAIC à gestão de processo de ventilação de mina**. Dissertação (Mestrado Profissional) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

CARLI, C. de. **Análise de projetos limite: lavra a céu aberto vs lavra subterrânea**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

CURI, A. **Lavra de minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. John Wiley & Sons, 2002.

HUSTRULID, W. A. **Underground Mining Methods Handbook**. Society of Mining Engineers, 1754 p., 1982

MACÊDO, A. J. B. de.; BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. **REM – Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, p. 221-225, jul. 2001.

MONTEIRO, L. **Dimensionamento de malha: perfuração de 3”**. ORICA. São José dos Campos, 2021.

SCOBLE, M.J.; MOSS, A. Dilution in underground bulk mining: implications for production management. Mineral Resource Evaluation II: Methods and Case Histories. **Geological Society Special Publication**, Nº 79, 95-108, 1994.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
*Campus Avançado de Poços de Caldas*  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



SILVA, V. C. **Apostila Curso de MIN 210 – Operações Mineiras**. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.