



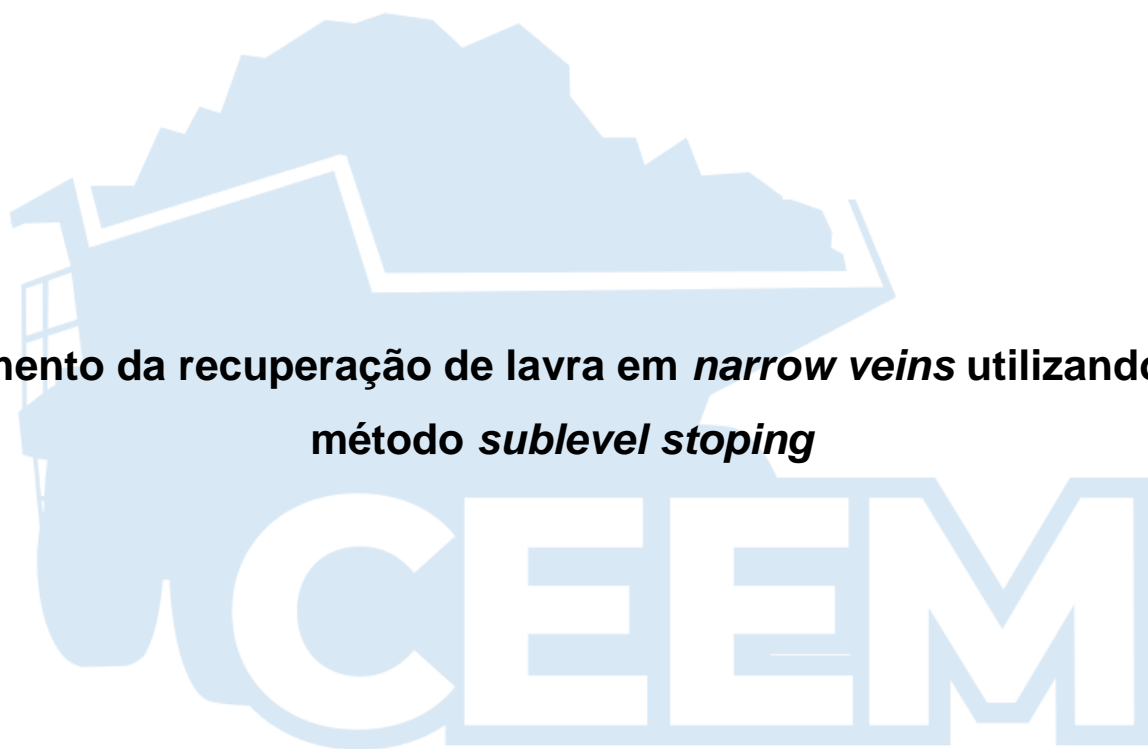
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG  
Campus Avançado de Poços de Caldas  
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 - Cidade Universitária  
CEP: 37715-400 - Poços de Caldas/MG



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

Alysson Oliveira Almeida

**Aumento da recuperação de lavra em *narrow veins* utilizando o  
método *sublevel stoping***



Poços de Caldas

2022



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



---

Alysson Oliveira Almeida

## **Aumento da recuperação de lavra em *narrow veins* utilizando o método *sublevel stoping***

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 Minas (CEEM).

Área de concentração: Lavra Subterrânea

Orientador: Prof. Dr. Edmo da Cunha Rodovalho

Poços de Caldas

2022



---

Alysson Oliveira Almeida

## **Aumento da recuperação de lavra em *narrow veins* utilizando o método *sublevel stoping***

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 de Minas (CEEM).

Área de concentração: Lavra Subterrânea

Aprovada em: [dia] de [mês] de [ano]

Orientador:

Instituição:

Assinatura:

Examinador 1:

Instituição:

Assinatura:

Examinador 2:

Instituição:

Assinatura:



---

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao criador, nosso Deus, pois sua proteção e seu direcionamento é fundamental para termos uma vida digna e honrosa.

A minha esposa Maria Rosiclei que por vários momentos me apoiou nas dificuldades do desta longa caminhada e com muita paciência soube levar e contornar os problemas ocorridos.

Aos meus colegas de curso que sempre mantiveram unidos e focados no mesmo objetivo em terminar esta pós-graduação.

A Anglo Gold Ashanti que sempre apoia seus profissionais na busca de novos conhecimentos agregando valor ao seu negócio.

Aos professores, tutores e orientadores do Curso de Especialização em Engenharia de Minas (CEEM) da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG que sem dedicaram em repassar os conhecimentos necessários para a conclusão desta pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Edmo da Cunha Rodovalho, pelo apoio na condução do trabalho.

Por fim, mas não menos importante, deixo uma palavra de gratidão a todas as pessoas que de alguma forma foram importantes nesse processo árduo e longo o qual chego ao fim.



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



*“Você não pode impor a produtividade, você  
deve fornecer as ferramentas para permitir  
que as pessoas se transformem no seu  
melhor”*

Steve Jobs



---

## RESUMO

A Mineração Serra Grande (MSG) é uma produtora de ouro, pertencente a AngloGold Ashanti. A região onde encontra-se a MSG apresentam características geológicas que influenciam na sua operação. Dentre elas, podemos destacar a lavra por *narrow veins*, que representam um grande desafio frente a viabilização e operacionalização de seus corpos geológicos. Diversos parâmetros, geológicos e operacionais, podem influenciar nos fatores como recuperação e diluição da lavra, mas o parâmetro principal a ser considerado é a qualidade da perfuração de *slot raise* e leques para os desmontes. Assim, o objetivo do estudo é identificar e mapear as possíveis falhas no processo de perfuração, a fim de obter um aumento na recuperação da lavra. Para isso, utilizou-se da ferramenta DMAIC para priorização das causas e definição dos pontos mais importantes para a melhoria dos processos. No primeiro semestre de 2021, a média para a recuperação de lavra era de 80,9%, já no segundo semestre de 2021 a média foi de 86,4%, representando uma variação de 5,5% e um ganho de 1933 onças, durante o período de seis meses do projeto. Com isso, têm-se que a priorização das causas e as tomadas de decisão, padronizaram a maneira de trabalhar, aumentando a recuperação com uma menor diluição da lavra e redução do desvio padrão do projeto.

**Palavras-chave:** Mineração Serra Grande; narrow veins; recuperação de lavra.



---

## ABSTRACT

Mineração Serra Grande (MSG) is a gold producer, belonging to AngloGold Ashanti. The region where the MSG is located has geological characteristics that influence its operation. Among them, we can highlight the mining by narrow veins, which represent a great challenge facing the viability and operationalization of their geological bodies. Several parameters, geological and operational, can influence factors such as mine recovery and dilution, but the main parameter to be considered is the quality of slot raise drilling and fans for blasting. Thus, the objective of the study is to identify and map possible failures in the drilling process, in order to obtain an increase in mine recovery. For this, the DMAIC tool was used to prioritize the causes and define the most important points for the improvement of processes. In the first half of 2021, the average for mining recovery was 80.9%, in the second half of 2021 the average was 86.4%, representing a variation of 5.5% and a gain of 1933 ounces, during the six-month period of the project. As a result, the prioritization of causes and decision-making have standardized the way of working, increasing recovery with less mining dilution and reducing the standard deviation of the project.

**Keywords:** Mineração Serra Grande; narrow veins; mining recove



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Escavações comuns de uma mina subterrânea. ....	15
Figura 2: Métodos de lavra subterrânea. ....	17
Figura 3: Realces em subníveis (sublevel stoping).....	18
Figura 4: Narrow veins (a) e seção vertical (b) em vista N-S.....	19
Figura 5: Ilustração esquemática de bloco de minério.....	21
Figura 6: Ilustração esquemática para diluição planejada e operacional de minério. ....	22
Figura 7: Modelo esquemático de diluição planejada e diluição operacional.....	23
Figura 8: (a) Haste magnética acoplada na mangueira e (b) computador de mão (RECON).....	24
Figura 9: Definição do método DMAIC. ....	25
Figura 10: Localização do município de Crixás e da MSG. ....	26
Figura 11: Representação esquemática da MSG. ....	27
Figura 12: (a) Mapa geológico do Greenstone Belt de Crixás e (b) coluna estratigráfica do Grupo de Crixás.....	28
Figura 13: Recuperação de lavra ao longo dos períodos. ....	29
Figura 14: Resultado para o teste de normalidade. ....	30
Figura 15: Análise de correlação em relação a inclinação do stope. ....	30
Figura 16: Resultado obtido na análise de perfilagem.....	32
Figura 17: Correlação de ganho de onças ao aumento de recuperação. ....	34
Figura 18: Correlação entre a massa, teor, recuperação e onça extra. ....	35
Figura 19: Resultado da recuperação antes e depois do projeto.....	35
Figura 20: Correlação entre diluição total e recuperação. ....	36
Figura 21: Escaneamento topográfico da lavra do stope SL_849_N_BL1. ....	36
Figura 22: Desvios médios em relação as litologias. ....	37
Figura 23: Curvas de recuperação de lavra antes e depois do projeto.....	38
Figura 24: Carta de controle com resultados da recuperação de lavra. ....	39





---

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Vantagens e desvantagens do método de lavra subterrânea. ....	16
Quadro 2: Etapas da metodologia DMAIC.....	25
Quadro 3: Dimensionamento de malhas de perfuração. ....	33



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.1. SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA .....</b>	<b>14</b>
<b>3.2. LAVRA SUBTERRÂNEA .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3. MÉTODOS DE LAVRA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3.1. SUBLEVEL STOPING .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3.2. NARROW VEINS .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4. PERFURAÇÃO E DESMONTE DE ROCHAS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.5. DILUIÇÃO E RECUPERAÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>3.6. PERFILAGEM DOS FUROS .....</b>	<b>23</b>
<b>3.7. DMAIC .....</b>	<b>24</b>
<b>4. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1. INFORMAÇÕES MINERAÇÃO SERRA GRANDE .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2. GEOLOGIA REGIONAL .....</b>	<b>27</b>
<b>5. METODOLOGIA.....</b>	<b>29</b>
<b>5.1. PROBLEMATIZAÇÃO .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2. AÇÕES DESENVOLVIDAS .....</b>	<b>31</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>34</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A atividade mineral se destaca como uma das maiores fontes de renda, servindo desse modo em um importante suporte financeiro e econômico no 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 pelo 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 alcançado 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 sua operação (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 assim 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 da 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 realce em subníveis. Esse método consiste na abertura de um grande realce, a face livre criada para abertura deste realce é uma escavação denominada *slot raise*, sendo este um ponto crítico para o sucesso da recuperação do minério e redução dos custos da mina. Para a sequência de produção do realce, teremos a perfuração dos leques, que são um conjunto de furos verticais realizados em subníveis desenvolvidos no corpo de minério ou em seus contatos (BARROS *et al.*, 2017).

O método de *sublevel stoping* é usualmente utilizado em corpos verticalizados, devido a ser altamente produtivo e que resulta numa boa recuperação. A lavra por veios estreitos (*narrow veins*) pode ser aplicada neste tipo de método, apresentando uma largura (potência) menor que três metros para o corpo de minério, com um mergulho superior entre 50 a 55° (sendo este um ângulo no qual o minério desmontado pode descer na base do contato), uma alta complexidade geológica, com geometria e distribuição de teores diversos (ANDRADE, 2019; BREWIS, 1995).



Os *narrow veins* representam um grande desafio frente a viabilização e operacionalização de seus corpos geológicos. Existem vários parâmetros, geológicos e operacionais, que influenciam fatores como a recuperação e diluição, mas um parâmetro muito importante não considerado nesse cálculo, é a qualidade da perfuração de leques no desmonte de rochas, já que estes influenciam diretamente nos resultados (JARDIM, 2019).

Segundo Quaglio (2003), a retilinidade de uma perfuração depende das características da rocha, do diâmetro e da profundidade do furo, do método e das condições do equipamento e da experiência do operador. Dessa forma, a identificação e mapeamento das possíveis causas para falhas na perfuração é de extrema importância para a busca por melhorias no desempenho.

A melhoria nos processos está relacionada a recorrência pela utilização de ferramentas e metodologias. Dentre as metodologias, temos a *Lean Six Sigma* (LSS) que apresenta resultados expressivos na maximização da qualidade dos processos, produtos e serviços. Para isso, a implementação da ferramenta DMAIC é extremamente importante, visto que se baseia na medição focada na melhoria de processos e redução de variação através da aplicação dos submétodos (PIRES, 2017).



## 2. OBJETIVO

### 2.1. OBJETIVO GERAL

O estudo tem como objetivo identificar e mapear as possíveis falhas na qualidade da perfuração do *slot raise* e dos leques para desmonte, a fim de obter um aumento na recuperação da lavra, utilizando a ferramenta DMAIC para a melhoria dos processos de perfuração e desmonte.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Avaliar ocorrência de desvio na perfuração, de acordo com as características do maciço;
- ii. Avaliar equipamentos de perfuração (*fandril*) e operadores quanto a qualidade da perfuração;
- iii. Realizar levantamento dos furos planejados/executados utilizando o instrumento EZ-AQ (REFLEX);
- iv. Realizar análise e propor melhorias da malha de perfuração em *narrow veins*.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA

De acordo com Curi (2017), a lavra de minas consiste em um conjunto de operações e serviços inter-relacionados, com o 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 simultânea, 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:

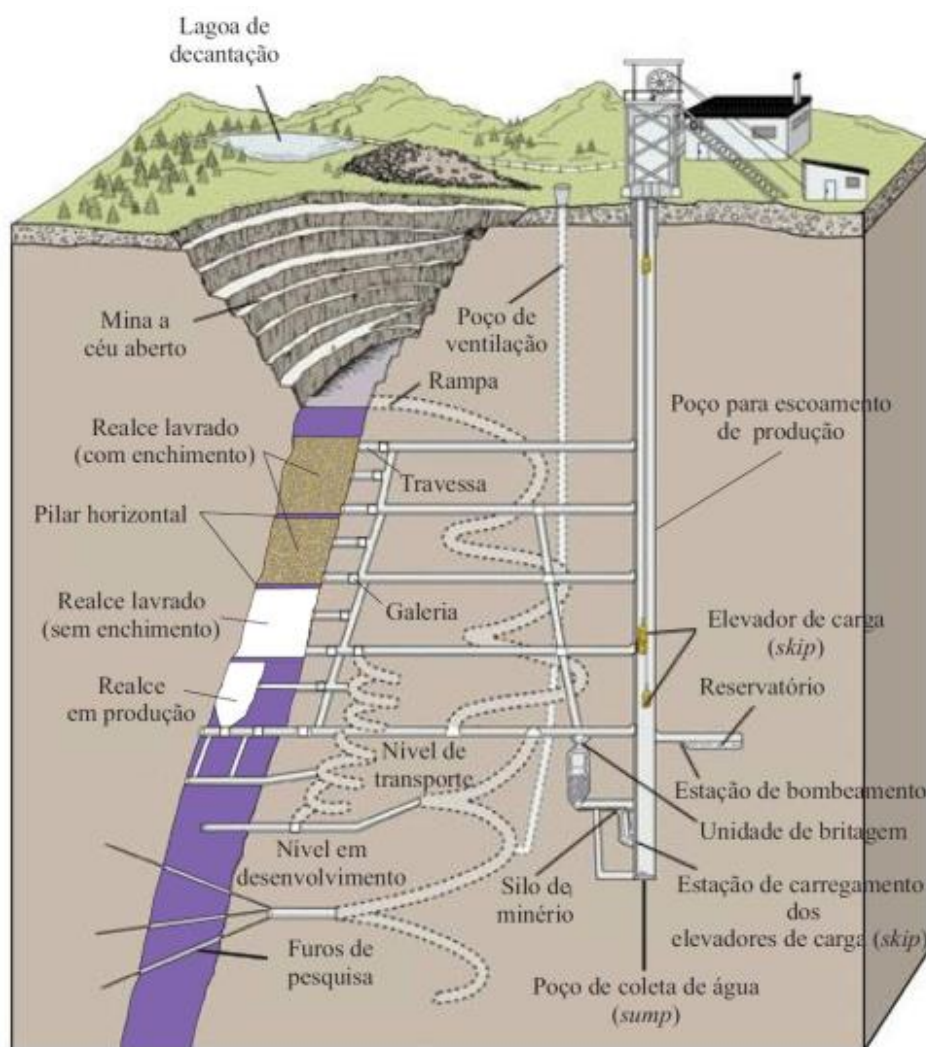
- i. Avaliação das condições geológicas, sociais e ambientais para permitir a eliminação de alguns métodos que não estejam de acordo com os critérios desejados.
- ii. Escolha do método que apresente o menor custo, sujeito às condições técnicas que garantam uma maior segurança.

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).

Existe um critério básico para decisão entre o tipo de lavra (céu aberto ou subterrâneo) a ser adotado em um empreendimento minério, sendo este, a relação estéril-minério limite. Para isso, é levado em consideração os aspectos geológicos (altura do capeamento), geomecânicos (resistência do minério e do estéril) e econômicos (custos de extração e remoção de estéril) (LIMA, 2014).

A Figura 1 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 alargamentos; vias de acesso e escavações de serviços temporárias; e vias de acesso e escavações de serviços permanentes (CHARBEL, 2015).

Figura 1: Escavações comuns de uma mina subterrânea.



Fonte: Charbel (2015) – traduzido de Brady & Brown.

### 3.2. 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, laminais d'água e reservas ambientais (LIMA, 2014).



Abaixo são apresentados as principais vantagens e desvantagens da lavra subterrânea (Quadro 1):

Quadro 1: Vantagens e desvantagens do método de lavra subterrânea.

<b>Lavra Subterrânea</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Menor gasto com a recuperação ambiental na superfície do terreno;	Maior probabilidade de ocorrência de acidentes;
Evita a paralisação da produção em função do mal tempo;	Maiores investimentos do que na lavra a céu aberto (consumo maior de energia elétrica);
Não necessita de grandes movimentações de rochas estéreis;	Grandes dificuldades operacionais em função da limitação pelo tamanho/dimensões das galerias;
Não expõem os trabalhadores às inclemências do tempo.	Necessita de mão de obra especializada para operação das máquinas.

Fonte: Lima (2014).

### **3.3. MÉTODOS DE LAVRA**

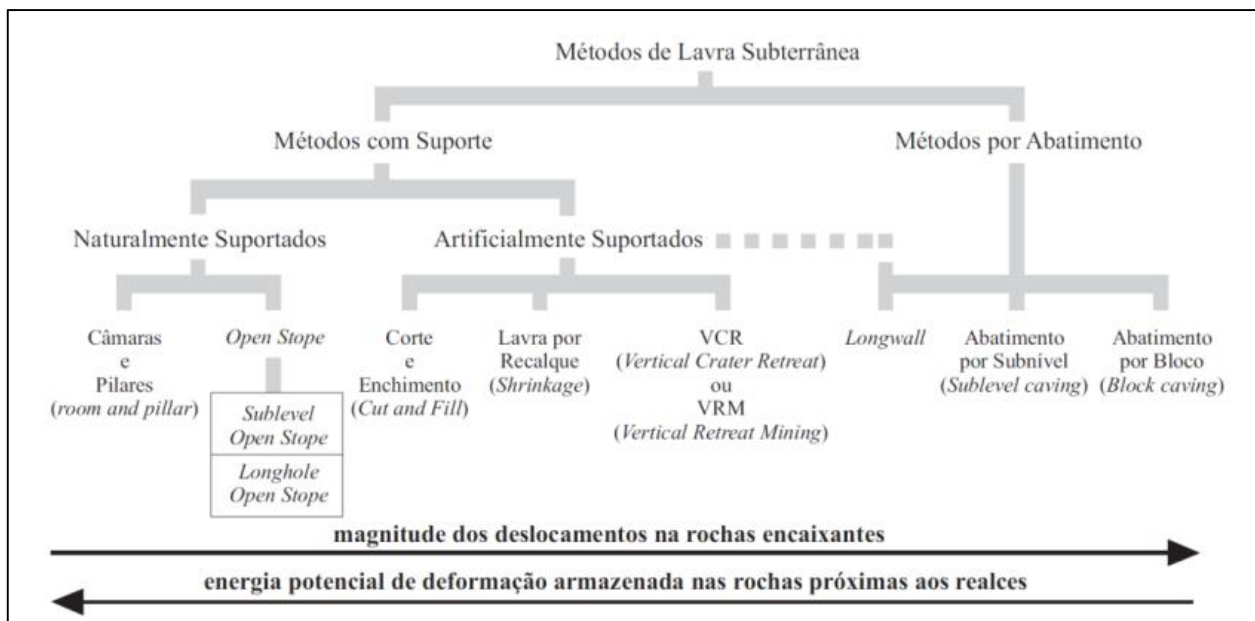
Existem três princípios fundamentais que ajudam a classificar os métodos de lavra subterrânea. Para isso, deve ser realizado um estudo detalhado considerando à questão geotécnica, à sustentação e ao controle das deformações nas aberturas. Dessa forma, teremos que a seleção do método de lavra subterrânea influencia diretamente na segurança, produtividade, custo e recuperação de lavra (CURI, 2017).

De acordo com Curi (2017), por meio dos três princípios apresentados, podemos dividir os métodos de lavra subterrânea em três grandes grupos através do tipo de suporte para as aberturas subterrâneas (Figura 2):





Figura 2: Métodos de lavra subterrânea.



Fonte: Charbel (2015) – traduzido de Brady & Brown.

### 3.3.1. SUBLEVEL STOPING

O método de lavra por subníveis (*sublevel stoping*), apresentado na Figura 3, é o método mais popular para minas metálicas (como, minas de cobre, ferro, zinco, níquel, ouro e outros metais) e rocha dura, sendo esse muito utilizado em lavras subterrâneas na América do Sul (CURI, 2017; JARDIM, 2019).

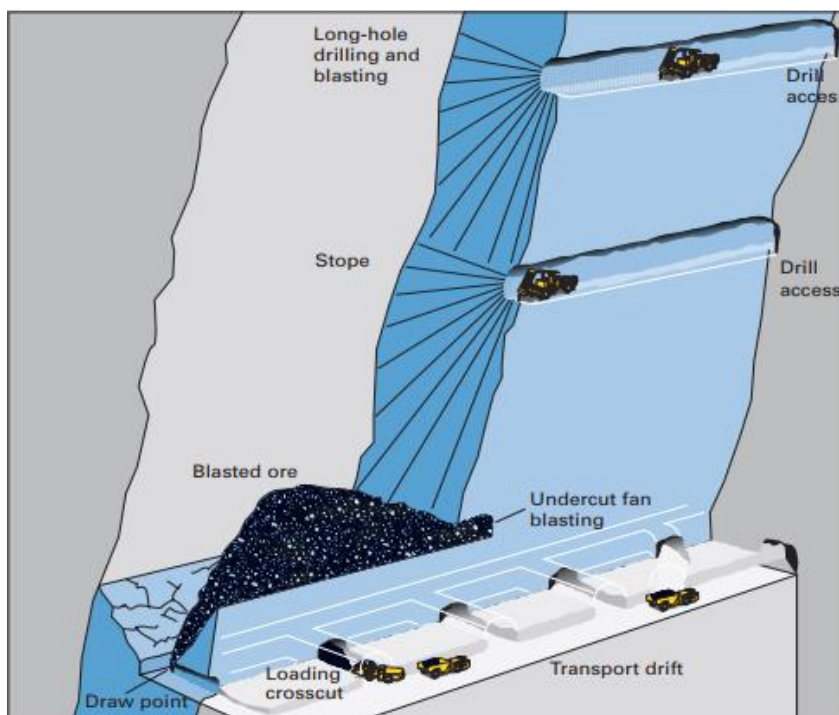
Esse método é muito usado em depósitos de baixo teor, tabulares ou lenticulares, com mergulho bastante acentuado (entre 50° e 90°) e espessura alta a moderada. A rocha encaixante apresenta alto grau de competência, para possibilitar a autossustentação das aberturas executadas sem que seja necessário o 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 através 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 operações unitárias simultâneas, fácil ventilação, diluição moderada e boa recuperação de lavra. Já como desvantagens, teremos alto custo de desenvolvimento, planejamento de lavra não flexível, cuidadoso alinhamento para furos longos e excessiva vibração e falta de seletividade (HARTMAN & MUTMANSKY, 2002).

Figura 3: Realces em subníveis (*sublevel stopping*).



Fonte: Atlas Copco (2007).

### 3.3.2. NARROW VEINS

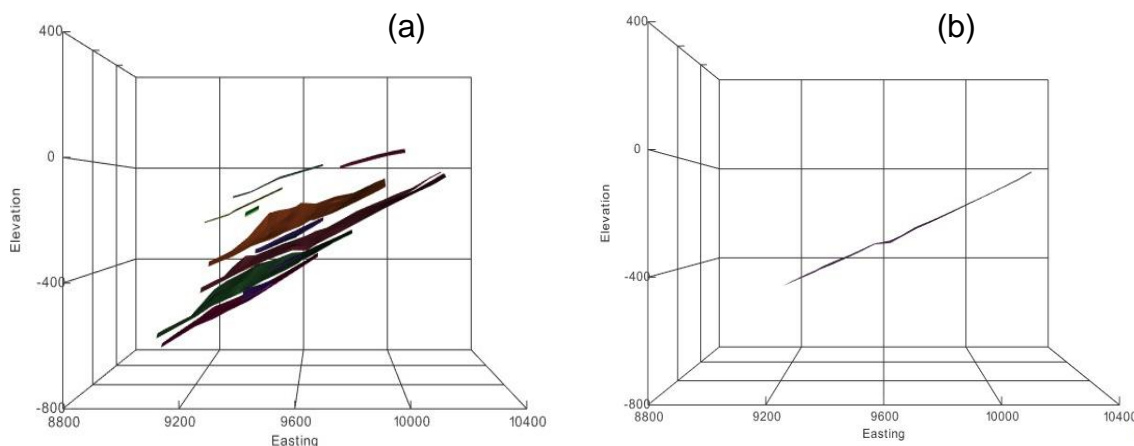
Segundo Brewis (1995), a lavra por veios estreitos (*narrow veins*) pode ser definida como a extração de bens minerais em jazidas que apresentam potências menores que três metros, com um mergulho superior entre 50 a 55° (sendo este um ângulo no qual o minério desmontado pode descer na base do contato), uma alta complexidade geológica, com geometria e distribuição de teores diversos.

Além disso, devido ao alto grau de incerteza em teor e continuidade, encontra-se grandes dificuldades em sua caracterização a partir das campanhas de sondagem exploratória, sendo necessário maiores investimentos em desenvolvimento e perfuração para sondagem *infill*. Dessa



forma, historicamente a lavra por *narrow veins* têm sido associadas a altos custos operacionais e baixos custos de capital (ANDRADE, 2019).

Figura 4: Narrow veins (a) e seção vertical (b) em vista N-S.



Fonte: Relatório Interno.

### 3.4. PERFURAÇÃO E DESMONTE DE ROCHAS

A perfuração de rocha é primeira etapa das operações unitárias de lavra, e com isso, todas as etapas posteriores, como desmonte de rocha, carregamento e transporte, dependem diretamente do desempenho ótimo de sua execução. Assim, é necessário considerar alguns fatores no planejamento da perfuração do maciço rochoso, como: o tipo de material a ser escavado, o volume de rocha necessário, além de sua distribuição ao longo do tempo (produção mensal/semanal/diária), o equipamento de perfuração, as dimensões do britador primário, o porte dos equipamentos de carga, entre outros (QUAGLIO, 2003; SILVA & GOMES, 1998).

Além dos fatores citados anteriormente, também é importante a realização da caracterização geomecânica do maciço rochoso no local ao qual será executado os trabalhos de perfuração. As propriedades geomecânicas influenciam os mecanismos de penetração, sendo elas a dureza, a abrasividade a resistência, a textura, a elasticidade, a estrutura e a plasticidade (RODRIGUES, 2018).

De acordo com Silva (2009), os furos são geralmente caracterizados por quatro parâmetros: diâmetro, profundidade, retilinidade e estabilidade.

➤ Diâmetro dos furos: existem vários fatores que influem na escolha do diâmetro dos furos para detonação. Como exemplo, podemos citar o tamanho desejado dos fragmentos, após



a detonação; o tipo de explosivo que será utilizado; a vibração aceitável durante a detonação; e etc (SILVA, 2009).

➤ Profundidade dos furos: a profundidade do furo é um fator determinante para a escolha do equipamento de perfuração. Para furos com grandes profundidades, a probabilidade de desvios no furo é alta, devido especialmente ao comprimento da coluna de perfuração. Assim, para esses casos é recomendável a utilização de um martelo de fundo de furo (Down the Hole – DTH), ao invés de martelo de superfície (*Top-Hammer*), já que mesmo que a energia transmitida seja dissipada ao longo da coluna de perfuração para os dois casos, ainda assim o DTH age diretamente sobre a coroa e com isso, é eliminado as perdas de transmissão de energia (QUAGLIO, 2003).

➤ Retilidade do furo: a retilidade de uma perfuração varia principalmente devido as características da rocha, o diâmetro e profundidade do furo, as condições de equipamento utilizado e da experiência do operador. Além disso, na perfuração horizontal ou inclinada, o peso da coluna de perfuração pode contribuir para o desvio do furo. Caso ocorra um desvio, para compensar essa ocorrência é necessário furar com menor espaçamento, resultando em maior custo (SILVA, 2003).

➤ Estabilidade do furo: após a perfuração é necessário que o furo permaneça “aberto”, seja através de tubos ou mangueiras de revestimento, para que não haja problemas ao realizar o carregamento dos explosivos (SILVA, 2009).

As características dos furos citadas nos tópicos anteriores, influenciam diretamente em parâmetros econômicos de uma mina subterrânea, sendo esses a diluição e a recuperação de minério. Desse modo, identificar e mapear as possíveis causas para desvios nos furos é extrema importante para a busca por melhorias no desempenho.

Para uma boa execução do desmonte, faz-se necessário a criação de fácies livres em cada nível de realce, o que possibilita que o corpo de minério seja melhor fragmentado. As fácies livres são denominadas *slot raise*. O *slot* encontra-se na extremidade de um realce, onde são realizados furos mais próximos, de modo que seja utilizada uma razão de carga maior para criação de uma face livre e na sequência o desmonte da seção e dos leques (SOUZA, 2017).

Para realização da perfuração dos painéis de lavra são utilizadas perfuratrizes do tipo *fandril* e para o desenvolvimento dos acessos trabalha-se com os jumbos. Já para a retirada do material fragmentado dos realces, são utilizadas carregadeiras do tipo LHD (com controle remoto)



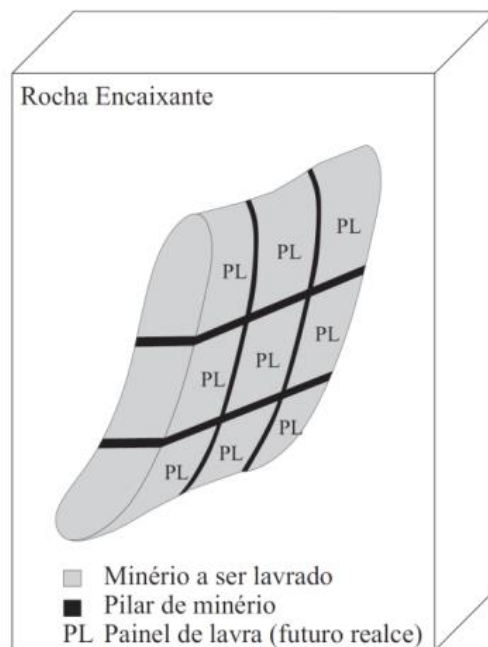
e para o transporte do minério, são utilizados caminhões rodoviários ou rebaixados e vagões sobre trilhos ou correias transportadoras dependendo do projeto de mina (SOUZA, 2017).

### 3.5. DILUIÇÃO E RECUPERAÇÃO

Segundo Wright (1983, citado por Stewart et Trueman, 2008), a diluição pode ser definida como a contaminação do minério por rocha estéril durante o processo de mineração.

Em corpos de minério verticais ou subverticais, os blocos de minério são denominados como unidades de lavra resultante da divisão vertical e horizontal da mina, através de pilares (Figura 5). Em *narrow veins* o controle da diluição é um processo que requer um planejamento com acurácia e precisão, assim como a execução perfeita da operação do processo de perfuração e desmonte. Esses fatores influenciam diretamente na recuperação obtida pela planta de beneficiamento (CHARBEL, 2015; SOUZA, 2017).

Figura 5: Ilustração esquemática de bloco de minério.



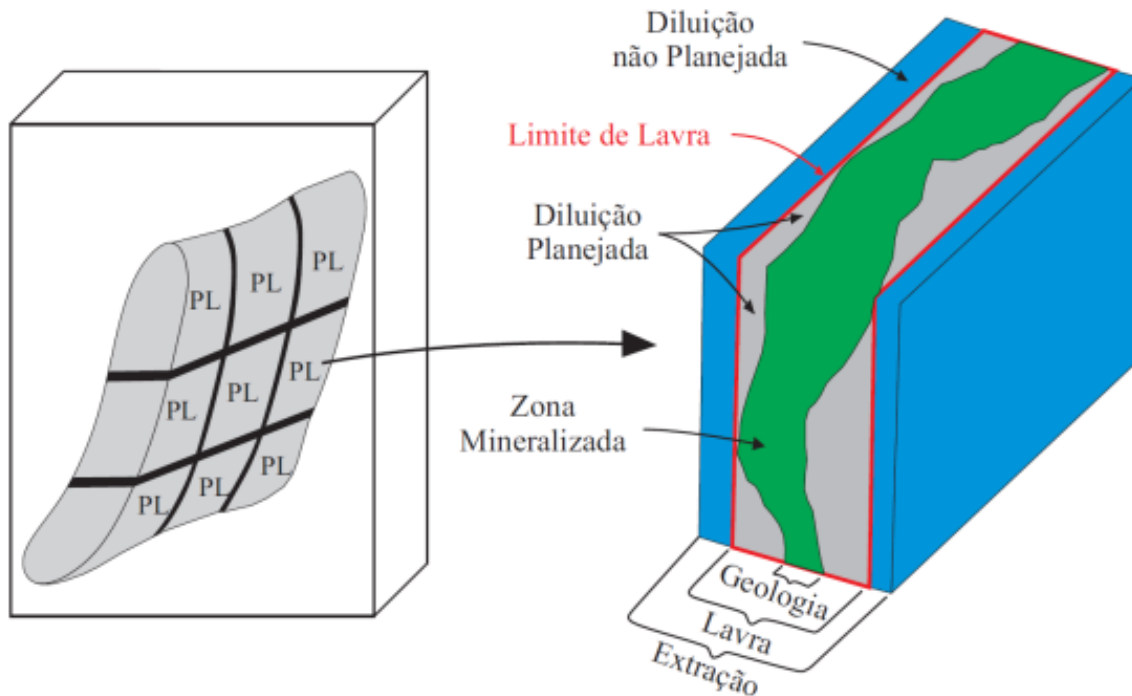
Fonte: Charbel (2015).

Conforme definido anteriormente, entende-se como diluição a contaminação do minério com rocha estéril. Assim, para caracterização da rocha como minério ou estéril, deve-se definir o teor de corte (*cut-off grade*) para a substância útil. Caso o teor esteja acima, define-se como minério e abaixo como estéril. Com isso, a diluição pode ser dividida em dois tipos distintos, sendo

elas: diluição planejada e diluição não planejada (TATMAN, 2001). De acordo com Henning & Mitri (2007), é importante observar que a definição de sobre-escavação (*overbreak*), está diretamente relacionada a diluição não planejada.

A diluição planejada refere-se à rocha estéril que está localizada junto aos limites de lavra do bloco de minério planejado. Já a diluição não planejada ou operacional consiste na remoção de rocha estéril que não estava incluída no realce planejado. Diversas são as origens para a diluição operacional, dentre elas temos a instabilidade do maciço rochoso e erros operacionais durante a perfuração e desmonte (SCOBLE & MOSS, 1994). A Figura 6 ilustra a diluição planejada e operacional.

Figura 6: Ilustração esquemática para diluição planejada e operacional de minério.

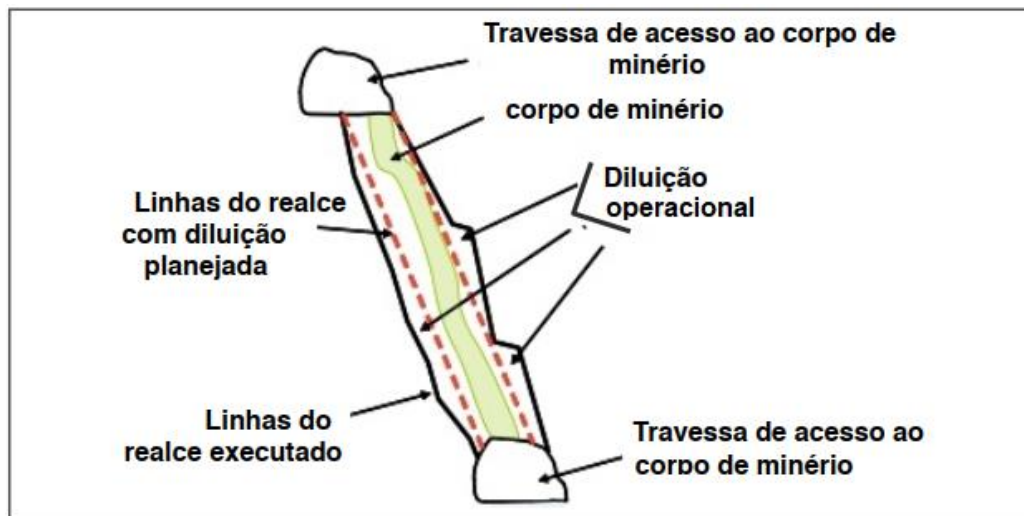


Fonte: Charbel (2015) – traduzido de Scoble & Moss (1994).

Já na Figura 7 é mostrado um modelo esquemático, onde temos a diluição planejada e operacional para um realce (*stope*), a partir da potência do corpo.



Figura 7: Modelo esquemático de diluição planejada e diluição operacional.



Fonte: Souza (2017) – traduzido de Stewart (2005).

Lima (2016), destacou que além da diluição operacional ou *overbreak*, outro parâmetro importante é o *underbreak*, no qual é entendido como o minério não desmontado na operação de detonação e que se encontra remanescente no *stope*. Este parâmetro afeta diretamente na recuperação que pode ser quantificada, a partir da seguinte equação:

$$\text{Recuperação} = \frac{\text{Toneladas planejadas (t)} - \text{Minério perdido na escavação (t)}}{\text{Toneladas planejadas (t)}} \quad (1)$$

O fluxo de caixa é diretamente influenciado pela recuperação. Sendo assim, uma baixa recuperação no processo de lavra significa necessariamente uma diminuição na receita, sendo que em muitos casos, os custos envolvidos são os mesmos, caso não houvesse o *underbreak*. Podemos destacar ainda que o *underbreak* pode ser ocasionado a partir de um desmonte mal dimensionado ou até mesmo pelas características do maciço (LIMA, 2016).

### 3.6. PERFILAGEM DOS FUROS

A perfilagem tem como premissas para analisar as causas e consequências para os desvios na perfuração do *slot raise* e dos leques para desmonte: a medição, quantificação e esquematização dos desvios; de forma que seja traçada diretrizes para evitar possíveis perdas de face livre ou falhas nos desmontes, que inviabilizam a recuperação da lavra.

A perfilagem dos furos é realizada através do instrumento EZ-AQ (REFLEX), onde é realizado a medição dos desvios dos furos feitos pelos equipamentos de perfuração simba



(*fandril*). O processo de leitura do furo é realizado de metro em metro, podendo ajustar de acordo com a necessidade e o nível de detalhes desejado. A haste e o computador de mão podem ser visualizados na Figura 8.

Figura 8: (a) Haste magnética acoplada na mangueira e (b) computador de mão (RECON).



### 3.7. DMAIC

A metodologia *Lean Six Sigma* (LSS) é resultante da integração entre os programas *Six Sigma* e *Lean Manufacturing*. Nessa metodologia os processos são focados em passos quantitativos, estruturados, disciplinados e 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 da aplicação de algumas etapas. Essas etapas são compostas por: *Define* (Definir), *Measure* (Medir), *Analyze* (Analisar), *Improve* (Melhorar) e *Control* (Controlar). Na Figura 9 está representada a definição do DMAIC.



Figura 9: Definição do método DMAIC.



Fonte: Voitto (2016).

No Quadro 2 são apresentadas as etapas e características relacionadas a metodologia DMAIC.

Quadro 2: 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. ESTUDO DE CASO

### 4.1. INFORMAÇÕES MINERAÇÃO SERRA GRANDE

A Mineração Serra Grande (MSG) é uma produtora de ouro, pertencente a AngloGold Ashanti. A empresa representa cerca de 4,4% da produção total de ouro no país e está localizada no estado de Goiás, tendo operações subterrâneas e a céu aberto.

O complexo de mineração Serra Grande localiza-se no município de Crixás, noroeste do estado de Goiás, a cerca de 316 km da cidade de Goiânia e 393 km da cidade de Brasília (Figura 10).

Figura 10: Localização do município de Crixás e da MSG.

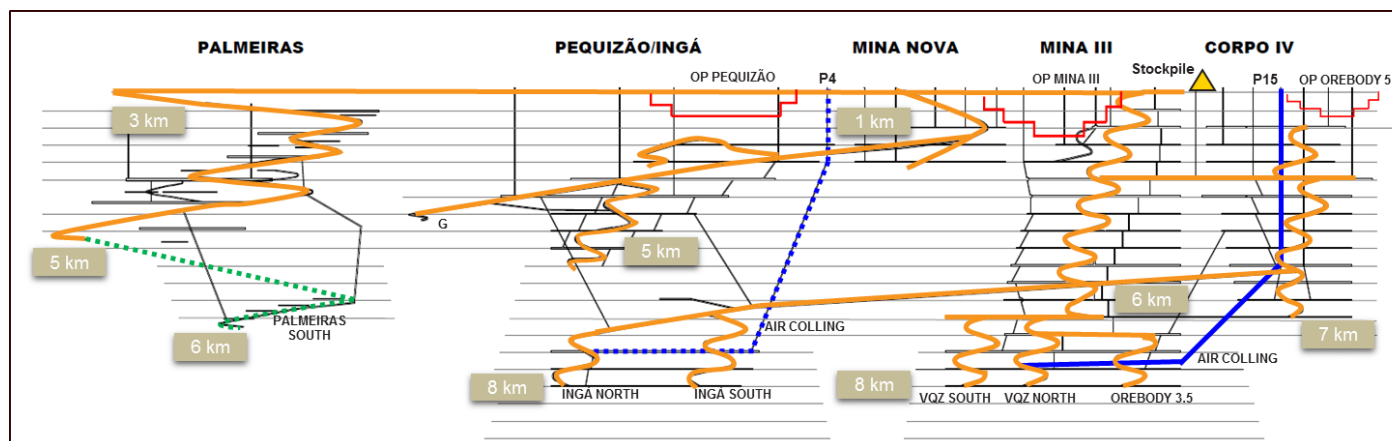


Fonte: Wikipedia (2022) & Google Maps (2022).

Atualmente, é aplicado o método de lavra, *Sublevel Stopping*, e são praticadas em duas formas: sequência *bottom up* (lavra dos subníveis inferiores em direção aos superiores) e preenchido com estéril (*rockfill*); *top down* (lavra dos subníveis superiores em direção aos inferiores). O complexo de MSG opera em profundidades que ultrapassam 1050 m e possui frentes de lavra para 6 corpos de minério diferentes, sendo eles: Palmeiras, Pequizão, Ingá, Mina Nova, Mina III e Corpo V. A Figura 11 ilustra a esquematização dos corpos de minério.



Figura 11: Representação esquemática da MSG.



## 4.2. GEOLOGIA REGIONAL

Segundo Lima (2016), a mineralização presente nos corpos de minério lavrados na MSG, tem ocorrência na transição entre metabasaltos e metassedimentos, sendo encaixados em xistos carbonosos que pertencem a Formação Ribeirão das Antas do Grupo Pilar de Goiás (Faixa Crixás). Os minérios auríferos lavrados são ricos em arsenopirita, e a presença desse mineral caracteriza uma condição especial para a ocorrência de ouro na região.

Os depósitos auríferos têm ocorrência em xistos carbonosos do pacote metassedimentar e compreendem níveis de sulfeto maciço, os veios de quartzo e corpos disseminados. A secção metassedimentar é cortada pelos diques máficos e os corpos mineralizados, sendo assim reconhecidos através de testemunhos de sondagem e nas galerias das minas da porção central do *greenstone*. Os dados estruturais destacam que houve anteriormente a mineralização, dois eventos principais, sendo estes, o dobramento e metamorfismo regionais e durante o evento de cavalgamento epidérmico com a formação de duplex (dobramentos) e antes da intrusão de diques (JOST *et al.*, 2009).

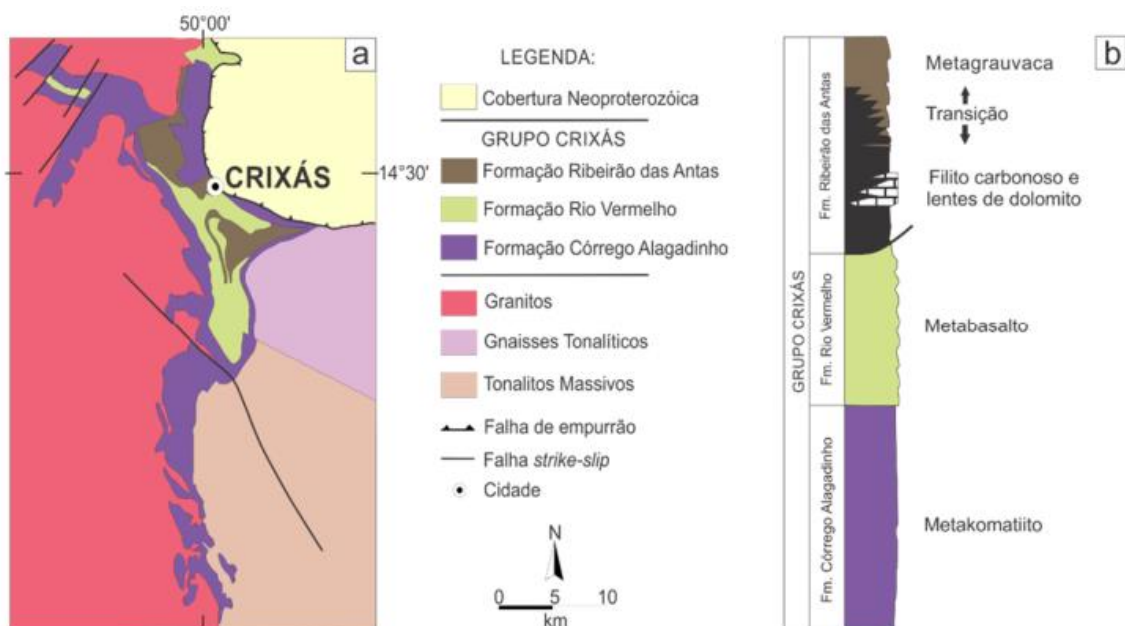
Danni & Ribeiro (1978, citado por Lima, 2016) identificaram os terrenos do tipo granito-*greenstone* em Goiás, onde foram descritas as sequências vulcanosedimentares com características de *greenstone belts*, para Crixás, Guarinos, Hidrolina e Pilar de Goiás, que pertencem ao Grupo Pilar de Goiás.

Esse grupo, também é conhecido como *Greenstone Belt* de Crixás e está localizado na margem oeste do Cráton do São Francisco. O *greenstone belt* de Crixás faz parte de um bloco



arqueano aflorante na porção central da Faixa Brasília, consistindo de uma sequência vulcanossedimentar regionalmente metamorfizada, indo de komatiitos e basaltos na base, seguidos de xistos carbonáticos e grauvacas. As rochas que compõem essa sequência são divididas em Formação Córrego do Alagadinho, Formação Rio Vermelho e Formação Ribeirão das Antas (CARVALHO, 2018). A Figura 12 apresenta o mapa geológico e a coluna estratigráfica do *Greenstone Belt* de Crixás.

Figura 12: (a) Mapa geológico do *Greenstone Belt* de Crixás e (b) coluna estratigráfica do Grupo de Crixás.



Fonte: Castoldi (2015) – modificado de Jost & Fortes (2001); Jost et al. (2010).

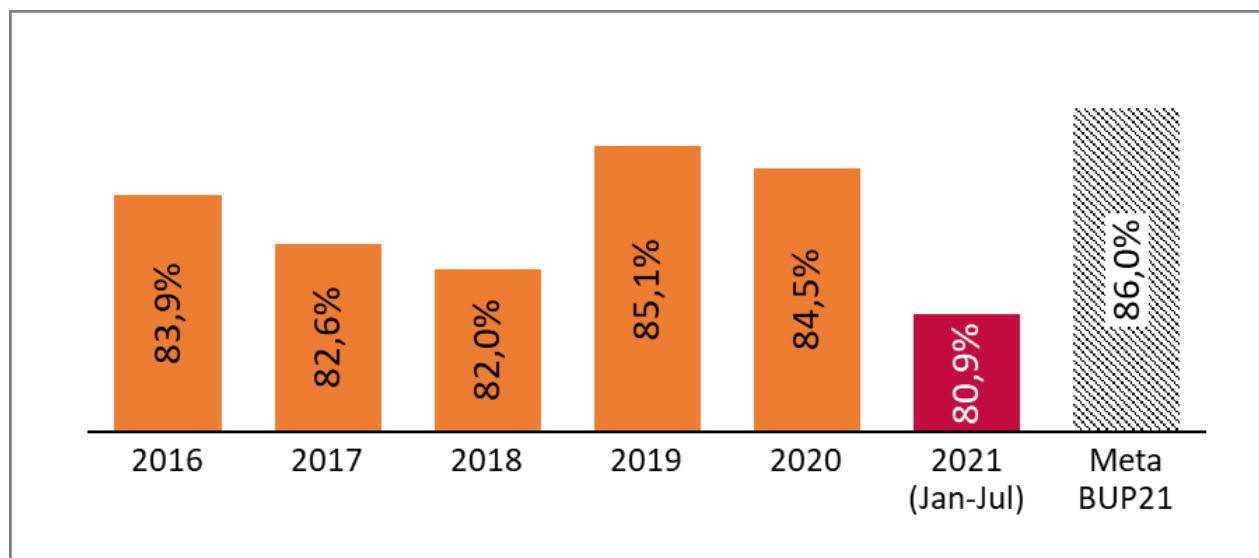


## 5. METODOLOGIA

### 5.1. PROBLEMATIZAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido, com base na metodologia LSS que utiliza o DMAIC para a melhoria dos processos. A definição do problema partiu dos levantamentos realizados na base de dados para a recuperação de lavra. Evidenciou-se que houve uma grande redução da recuperação em relação ao ano de 2020. Além disso, a meta para a recuperação de lavra encontrava-se 5% abaixo da meta do ano. Esses dados são apresentados na Figura 13.

Figura 13: Recuperação de lavra ao longo dos períodos.

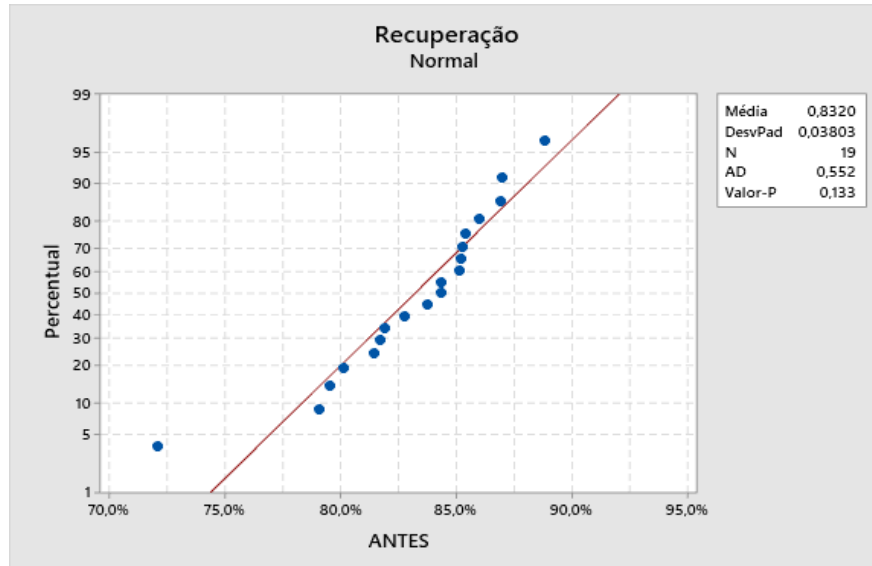


A partir dos dados históricos para a recuperação de lavra da MSG, foi realizado teste de normalidade com os dados de janeiro de 2020 a julho de 2021. Conforme observado na Figura 14, os dados históricos representam uma curva normal, garantindo assim uma maior confiabilidade nas análises estatísticas, devido ao *p-value* (valor de p) ser maior que 0,05.



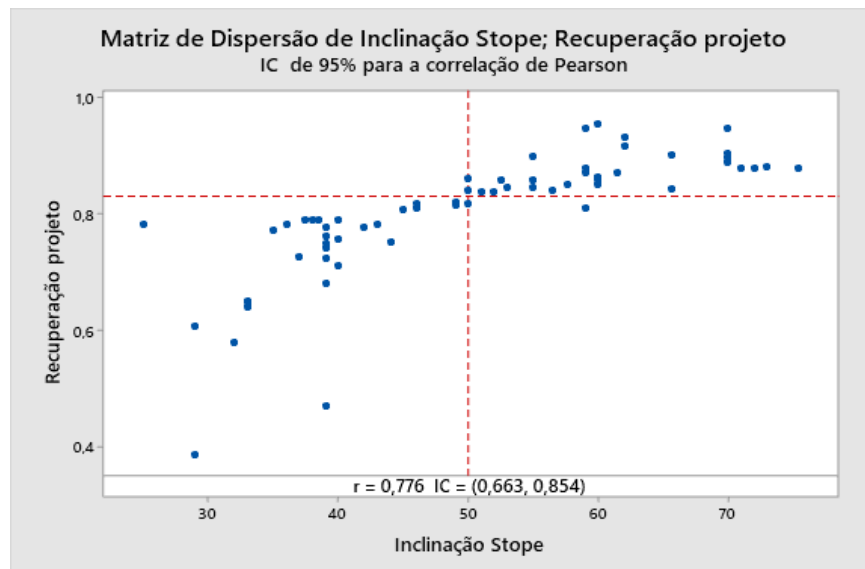


Figura 14: Resultado para o teste de normalidade.



Ao analisar a base dos *stopes* lavrados no período (todos utilizando o método de lavra *Sublevel Stopping*) foi realizado análises de correlação, por meio de histogramas, *boxplot* e Pareto. Na Figura 15, temos um gráfico de correlação, em que é possível observar que há uma forte correlação da recuperação ( $r=0,77$ ) com a inclinação do *stope*, e além disso, conclui-se que inclinações acima de  $50^\circ$ , apresentam uma recuperação acima de 0,84 ou 84%.

Figura 15: Análise de correlação em relação a inclinação do *stope*.



Através dessas análises pode-se fazer algumas considerações como: obtém melhor recuperação quando o *stope* tem maior potência e maior inclinação. Em relação ao corpo,



observou uma tendência de recuperações maiores na região do corpo chamada de Pequizão. Em relação a perfuração específica foi constatado que valores acima de 3,00 t/m atingiram maiores recuperações. No caso do comprimento do *strike*, observa-se que *stopes* acima de 8m de extensão de leque de contra recuo possuem a tendência de baixa recuperação. Sobre o Alfa *Slot*, foi constatado que recuperações maiores ocorrem com *stopes* que não utilizam alfa na perfuração dos *slots*, ou seja, *dump angle* igual a 0°. No caso do alfa leque o valor de inclinação melhor é entre 14° e 16° quando se perfura de sul para norte e 12° quando se perfura de norte para sul.

Com base nas medições e análises dos dados, foram realizadas reuniões do tipo *brainstorming* com o time multidisciplinar (geologia, planejamento e operação), para identificar possíveis causas da baixa recuperação nos *stopes* de lavra. Baseado nessas informações, verificou-se as principais causas, sendo estas: o método e mão de obra.

Após a identificação de todas as causas, elas foram priorizadas através da matriz GUT e, posteriormente, identificou-se por meio da análise de 5 PQ's, as causas raízes associadas. Foram identificadas abaixo as principais causas raízes:

- Falhas na qualidade da perfuração do *slot raise* e dos leques para desmonte ocasionados pelo desvio na perfuração;
- Operadores recém habilitados para operar Simba, resultando uma perfuração de baixa qualidade (leque e *slot*);
- Falha no desmonte ocasionado por desvios durante o carregamento de explosivos e acessórios;
- Alta variabilidade de corpos, necessitando de ajustes nos projetos de *stope*;
- Equipamentos de perfuração Simba (*Fandriil*) com baixa confiabilidade no sistema de marcação.

## 5.2. AÇÕES DESENVOLVIDAS

A partir da definição das causas raízes, foram planejadas as ações no padrão 5W2H, mas devido o volume de ações foi necessário priorizá-las, logo, foram executadas apenas ações de baixo esforço e alto impacto. Sendo assim, foi realizado ações de *quick wins* para obter rápido resultado na performance da recuperação.

Dentre as ações de *quick wins*, uma delas foi a inserção no processo da utilização do acessório para a iniciação eletrônica "Ikon III – Orica", em 100% dos desmontes. Através desse



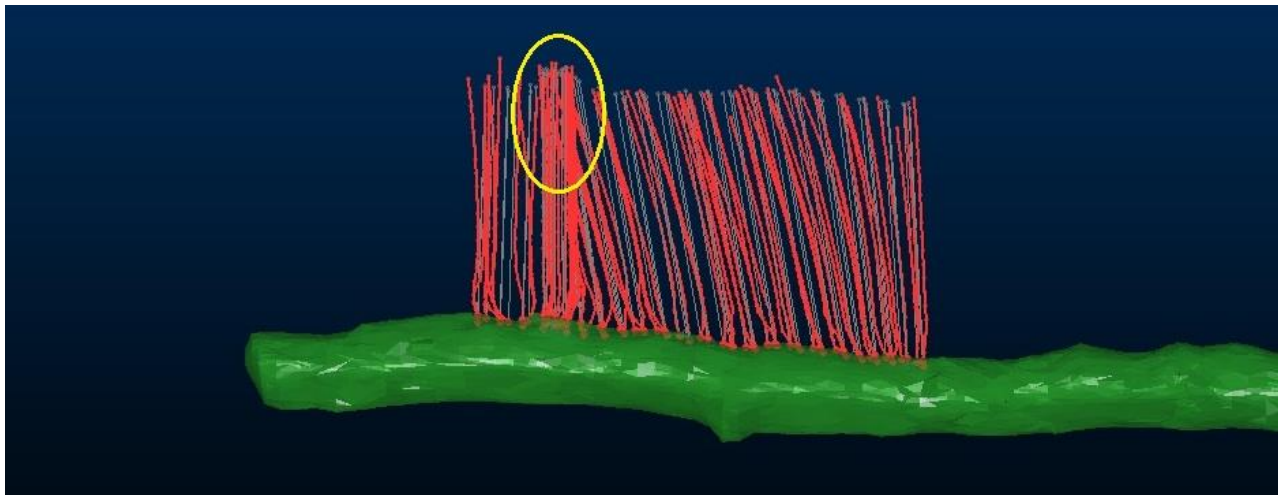
acessório, obteve-se uma melhor precisão e confiabilidade para os desmontes, já que o detonador eletrônico permite a variação de tempo de 0,005%, estando próximo de zero. Além disso, a temporização do Ikon permite uma flexibilidade de temporização, podendo realizar desmontes maiores com até 30.000 ms.

A segunda ação *quick wins* a ser destacada, foi a criação de rotina entre planejamento de mina e operação, de modo a analisar criticamente os *designs* apresentados para os *stopes*. Foi proposto melhorias na malha de perfuração em *narrow veins*, além da identificação antecipada de possíveis *stopes* planejados com baixa recuperação. Para estes casos, foram realizados os ajustes necessários antes de executar a perfuração.

A terceira ação *quick wins*, foi a contratação de uma empresa especializada em perfilagem, a fim de realizar os levantamentos para os furos planejados/executados utilizando o instrumento EZ-AQ (REFLEX), no qual é fornece levantamentos confiáveis e precisos em todos os ângulos. Os resultados obtidos na perfilagem são analisados previamente antes de realizar a detonação. Durante a análise é possível identificar os furos desviados e transpassados, permitindo a tomada de decisão de refazer o furo ou realizar o sequenciamento/tabelamento do desmonte.

Podemos observar na Figura 16 o resultado de uma análise de perfilagem, onde na área circulada em amarelo nota-se os furos que foram desviados. Para esse caso, a decisão foi desmontar o *slot*, seção e contra recuo e posteriormente, dar continuidade no *stope*.

Figura 16: Resultado obtido na análise de perfilagem.



Por fim, outra ação *quick wins* realizada foi o aumento do diâmetro de perfuração e abertura da malha, seguindo os critérios técnicos do modelo Jimeno e modelo Duranovic, em que





para perfuração em *narrow veins* utilizando *bit* de 3", recomenda-se uma malha de 1,8 x 1,8 m para *stope* do tipo cego e 1,8 x 2,0 m para *stope* do tipo varado, conforme observado na Quadro 3 abaixo.

Quadro 3: Dimensionamento de malhas de perfuração.

BIT	CORPO	TIPO STOPE	SENTIDO PERF	MALHA
3"	Narrow Veins ( <4m)	Cego	ASC/DESC	1.8 x 1.8m
		Varado	ASC/DESC	1.8x 2.0m
3"	Main Orebodies ( >4m)	Cego	ASC/DESC	1.8 x 2.0m
		Varado	ASC	1,8 x 2.4m
		Varado	DESC	2.5 X 2.4m

Fonte: Orica (2021).

A fim de resolver os desvios para o manuseio de explosivos, foi realizado treinamento de todos os blasters com empresa especialista em explosivos. A programação do treinamento incluía instruções de descarga e carregamento dos explosivos, carregamento dos furos, medição de densidade, operação do caminhão de bombeamento com bombas de cavidade progressiva e bombas de pistão. Além desse treinamento, foi realizado a calibração de toda a frota de caminhões de bombeamento e definida a nova periodicidade para calibração regular.

Para os operadores de simba (*fandril*) habilitados recentemente e com baixa performance, era feito o acompanhamento em campo com instrutor qualificado. Já para solucionar os problemas de baixa confiabilidade da aderência e paralelismo dos furos, criou-se uma rotina de calibração do sistema de posicionamento/inclinômetro do simba.

De modo a realizar possíveis alterações no processo, foi criado um procedimento para análise de anomalia na operação de perfuração para sempre que ocorrer um desvio não mapeado, será realizado a análise para correção do erro.

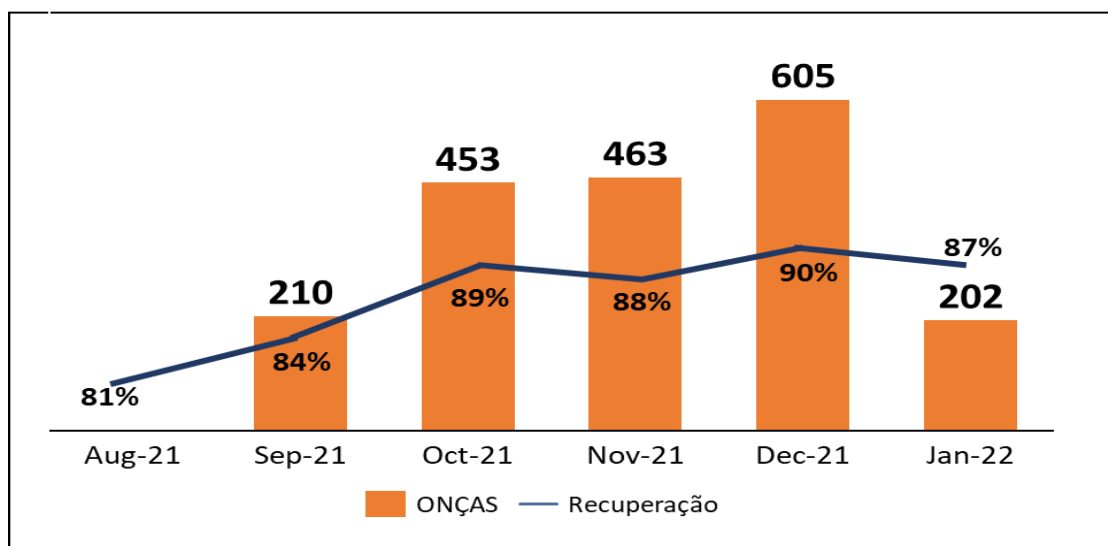


## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para a identificação e mapeamento das possíveis falhas na qualidade da perfuração do *slot raise* e dos leques para desmonte. Através da ferramenta DMAIC foi possível obter a melhoria nos processos de perfuração e desmonte e, conseqüentemente, aumentar a recuperação de lavra.

É possível destacar que o sucesso do projeto está diretamente ligado em priorizar e executar ações que estão relacionadas com as causas raízes. Conforme pode ser observado na Figura 17 o aumento de recuperação está diretamente correlacionado com o ganho de onças, em seis meses durante Agosto/2021 à Janeiro/2022, obteve-se um ganho de 1933 onças devido a melhoria na recuperação de lavra. Entretanto, no mês de janeiro o ganho de onças não foi maior devido ao teor do minério.

Figura 17: Correlação de ganho de onças ao aumento de recuperação.

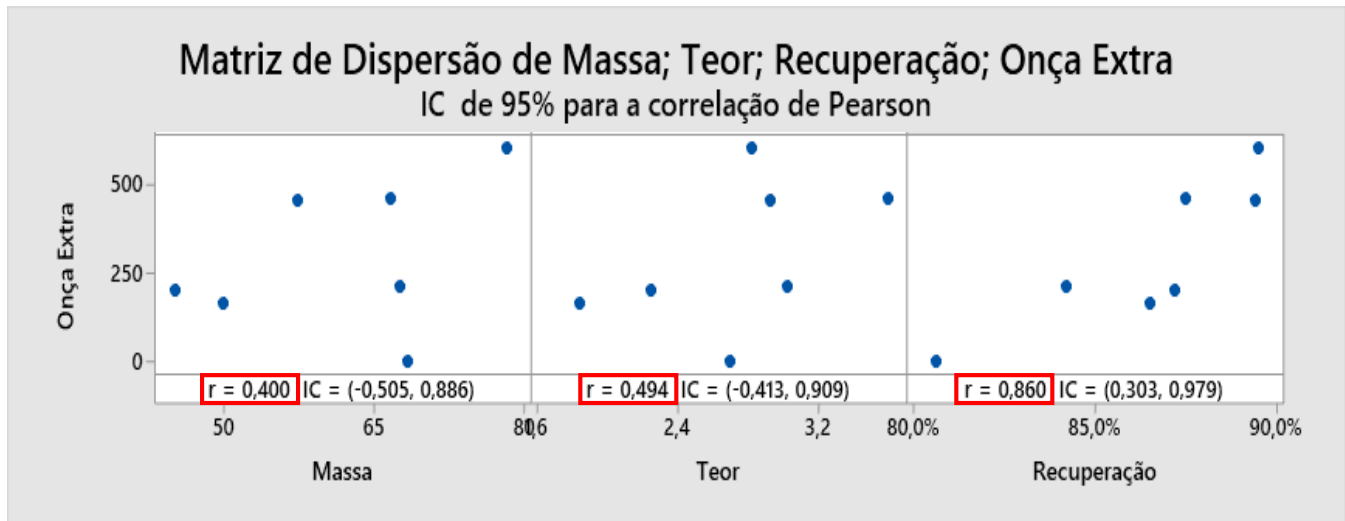


A partir da análise de dispersão utilizando a correlação de Pearson (Figura 18), observa-se que as onças extras geradas, têm fraca correlação com massa e teor, ou seja, nem sempre quando se apresenta os melhores teores, é possível a entrega de onças extras. No entanto, a correlação de recuperação com onça extra é de 0,86, ou seja, uma correlação muito forte, dessa forma, a entrega de onças extras foi possível devido as altas recuperações.

Sendo assim, pode-se inferir que devido a boa aderência ao plano de lavra, quando temos alto teor e grande volume de massa, nem sempre teremos onças extras.

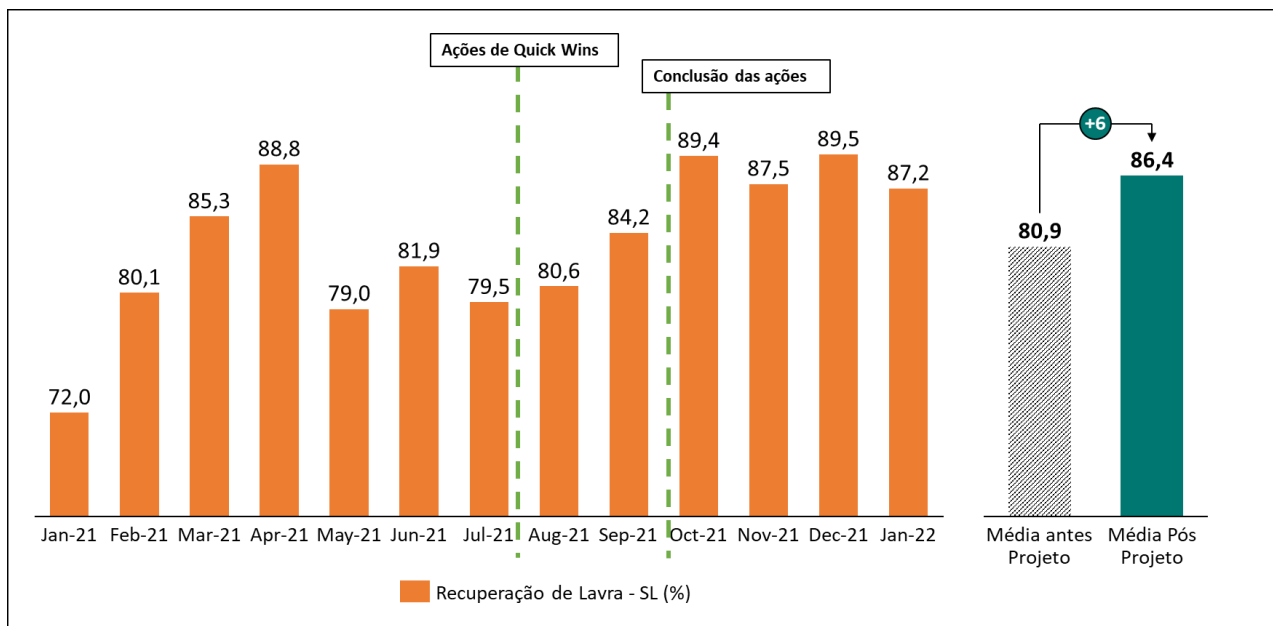


Figura 18: Correlação entre a massa, teor, recuperação e onça extra.



Na Figura 19, observa-se que o *follow-up* e execução de todas as ações foram fundamentais para estabilizar o resultado do indicador, as ações de *quick wins* ajudam de imediato, porém foi necessário à conclusão de todas as ações, para obter resultados sólidos e efetivos. Durante os 6 meses do projeto foi possível obter a média de recuperação (86,4%), sendo a melhor média de recuperação alcançada, anteriormente o melhor resultado havia sido 85,1% em 2019. Além disso a recuperação de dezembro 89,5% foi o melhor resultado histórico utilizando o método de *sublevel stopping*.

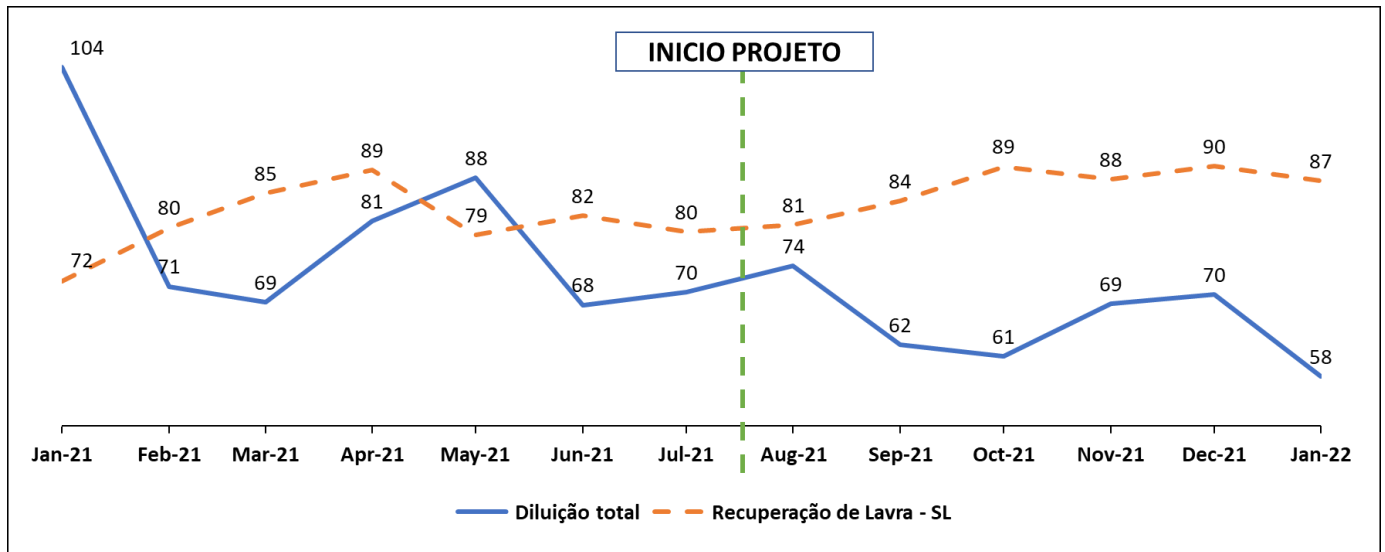
Figura 19: Resultado da recuperação antes e depois do projeto.





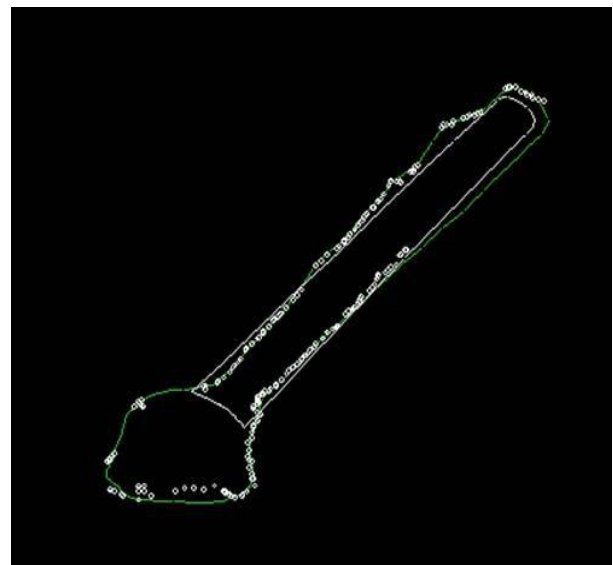
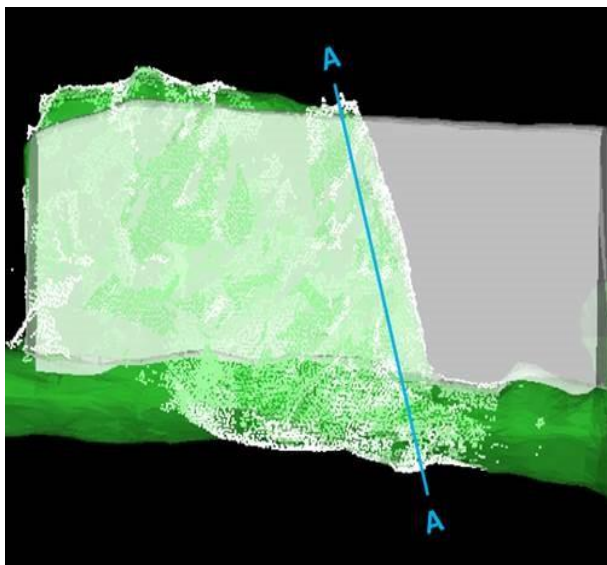
Uma premissa do projeto era de aumentar a recuperação e diminuir a diluição total, como observado na Figura 20 isso foi alcançada com êxito, pois a partir do início do projeto observa-se uma correlação inversamente proporcional entre os dois indicadores.

Figura 20: Correlação entre diluição total e recuperação.



Na Figura 21 observa-se o resultado da lavra do Stope SL\_849\_N\_BL1 através de análise de escaneamento realizado pela topografia. No detalhamento da seção A é notório a aderência da execução da lavra em relação ao design planejado.

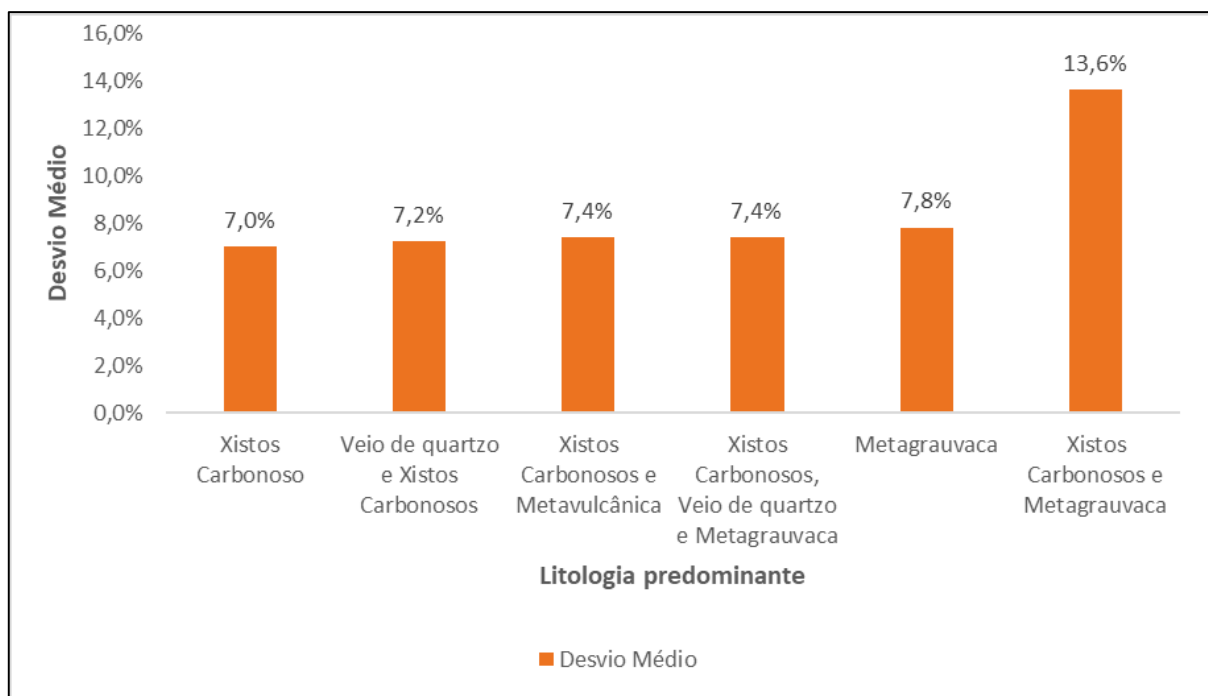
Figura 21: Escaneamento topográfico da lavra do stope SL\_849\_N\_BL1.





Além disso, a partir dos estudos realizados, identificou-se que as áreas com predominância de xistos carbonosos e metagrauvacas, ou seja, as regiões com maior foliação, apresentavam maiores desvios para os furos, conforme mostrado na Figura 22. Isso se deve principalmente, as características geológicas do maciço, que permitem uma maior facilidade na penetração das rochas, propiciando que o furo não siga o planejado. Ainda assim, devido à alta variabilidade dos corpos, eram necessários ajustes no projeto para cada área.

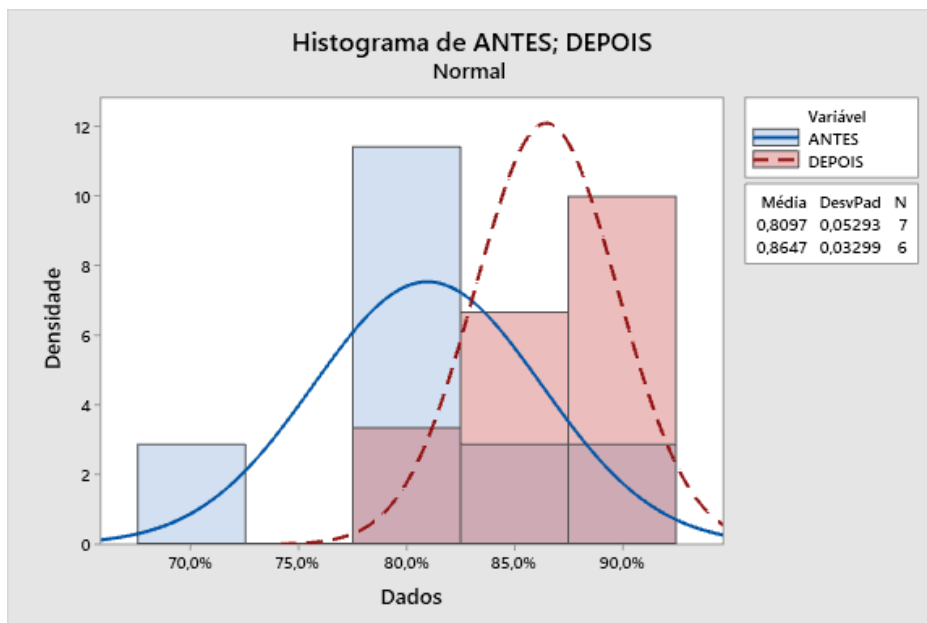
Figura 22: Desvios médios em relação as litologias.



Uma outra avaliação interessante a se fazer (Figura 23) é que além de deslocar a média do processo para um valor 5,5% maior que antes do início do projeto, o desvio padrão também reduziu, ou seja, o processo se tornou mais estável e com uma média maior. O desvio padrão, que antes era de 5,3% passou para 3,3%.



Figura 23: Curvas de recuperação de lavra antes e depois do projeto.

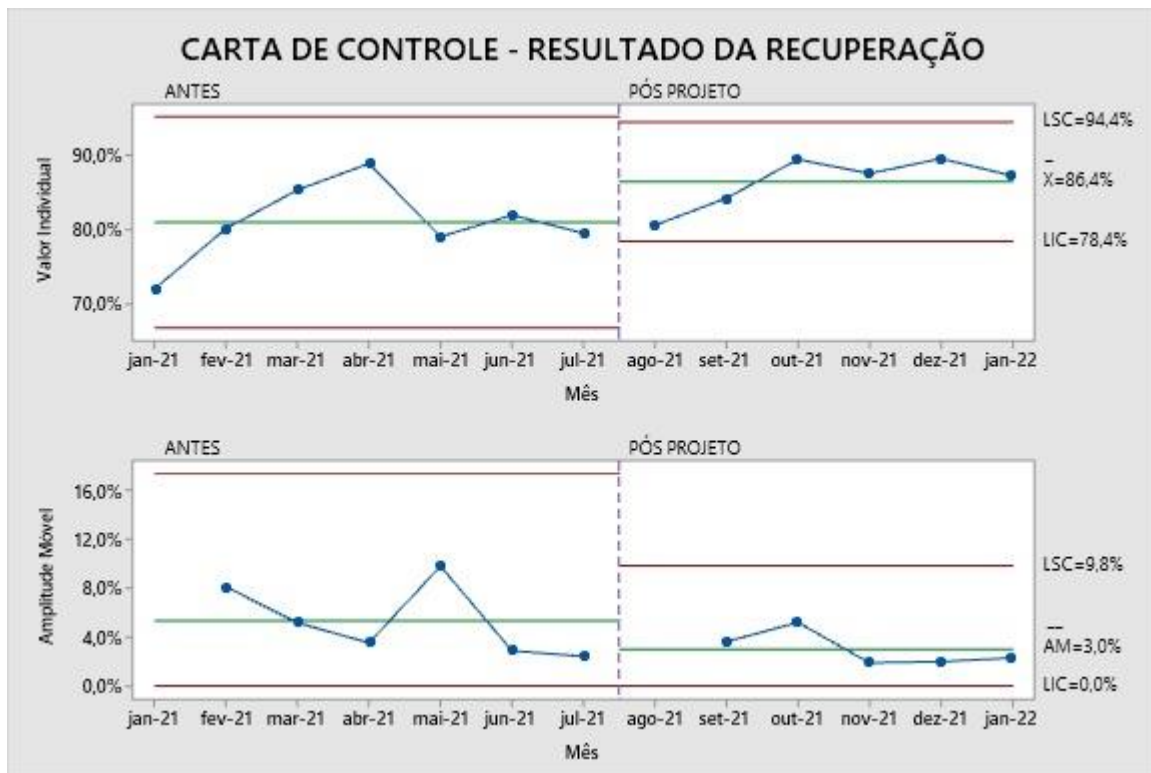


Observa-se que na Figura 24, é apresentado cartas de controle envolvendo os resultados obtidos para a recuperação de lavra. Nesse sentido, na carta de controle superior, observa-se que a média da recuperação de lavra aumentou após a implantação do projeto e o desvio padrão se estreitou, indicando que o processo está estabilizado, ou seja, com uma menor variação do processo.

Ainda na Figura 24, destaca-se na carta de controle inferior a análise da média da amplitude móvel. Os resultados indicam uma redução da amplitude móvel antes e pós projeto, onde nos últimos meses obteve-se uma amplitude móvel próxima de zero.



Figura 24: Carta de controle com resultados da recuperação de lavra.





## 7. CONCLUSÃO

A lavra por *narrow veins* representa um grande desafio em relação a viabilidade econômica e operacionalização dos corpos geológicos. Isso se deve a alta complexidade da formação geológica, geometria dos corpos e diferentes distribuições de teores de acordo com o modelo de blocos. Essas características influenciam diretamente nos fatores de recuperação e diluição da lavra. Para esse estudo de caso, o objetivo principal é o aumento da recuperação com uma menor diluição.

Diante disso, observou-se que a produção não apresentava resultados satisfatórios em relação a recuperação e diluição da lavra, tendo assim influência no retorno econômico do empreendimento. Assim, o projeto também teve como objetivo a identificação e mapeamento das principais falhas na qualidade da perfuração do *slot raise* e dos leques do desmonte. Para isso, utilizou-se da ferramenta DMAIC para entender as possíveis causas raízes do problema.

Dentre as causas raízes, a qualidade da perfuração foi um dos parâmetros que afetavam a produtividade e os custos da operação, por isso foram priorizadas. Além disso, os desvios dos furos eram observados nas regiões mais foliadas, com xistos; metagrauvas; e nas transições de diferentes litologias.

Observou-se também que a partir da criação de práticas padrão, os resultados obtidos com os equipamentos de perfuração e operadores foram relevantes para o estudo. A utilização da perfilagem contribuiu para análise dos desvios dos furos e implementação de melhorias na malha de perfuração em *narrow veins*.

Com isso, os resultados mostram a importância de estudos para melhoria dos processos. Visto que eles têm relação direta com o aumento do fluxo de caixa, em que é levado em consideração uma maior recuperação com baixa diluição operacional, e conseqüentemente, é melhorado o teor alimentado na planta. Entretanto, faz-se necessário o aprimoramento constante no estudo, para criação de padrões para as diferentes formações do complexo geológico.





## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, K. H. de. **Estudo de caso da substituição do método de lavra de Sublevel Stopping para Cut and Fill em Narrow Veins**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- BARROS, A. J. de. *et al.* Estudo de caso: rendimento do desmonte na abertura da face livre na lavra subterrânea mina Córrego do Sítio no município de Santa Bárbara, estado de Minas Gerais, na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), com foco no desenvolvimento local. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, fev. 2017.
- 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.
- BREWIS, A. A. C. **Narrow vein mining 1 – steep veins**. Mining Magazine, 1995.
- 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.
- CARVALHO, A. S. **Correlação entre os modelos geotécnicos de curto e médio prazo da mina Ingá, Crixás, Goiás**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- CHARBEL, P. A. **Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério**. 2015. Tese (Doutorado) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- CURI, A. **Lavra de minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. **Introductory mining engineering**. John Wiley & Sons, 2002.
- HENNING, J.G.; MITRI, H.S. Numerical modelling of ore dilution in blasthole stoping. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Science**, 44, 692-703, 2007.



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

JARDIM, R. J. D. **Qualidade da furação de leques em uma mina subterrânea – causas e consequências**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

JOST, H. **Síntese sobre Unidades de Rocha da Porção Norte do Terreno Arqueano de Goiás e suas Mineralizações Auríferas e do Limite Noroeste da Folha de Santa Terezinha de Goiás: Um Guia para Discussão Durante Excursão de Campo**. Inédito. 23 p.

LIMA, J. G. de. **Relação estéril-minério: referência para a decisão entre lavra a céu aberto e lavra subterrânea**. 2014. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/3657299/apostila>>. Acesso em: jan. 2022.

LIMA, T. C. A. **Análise técnica e econômica para utilização de cabos duplos em realces de *sublevel* na Mina Pequizão – Mineração Serra Grande, Crixás – GO**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

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.

PIRES, J. P. F. **Estudo para solução de problemas e melhoria do sistema de gestão integrada (NIOBRAS – CMOC BRASIL)**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Goiás, 2017.

QUAGLIO, O. A. **Otimização da perfuração e da segurança nos desmontes de agregados através dos sistemas *laser profile* e *boretrak***. 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.



RODRIGUES, A. L. O. **Caraterização e Propostas de Otimização do Ciclo de Perfuração na Mina da Panasqueira**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2018.

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.

SILVA, J. C. R. M.; GOMES, M. H. **Utilização e manuseio de explosivos**. DEXPLO – EXPLOSIVOS MAGNUM LTDA, 104 p. 1998.

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.

SOUZA, R. C. **Lavra subterrânea de veios estreitos: dificuldades e soluções**. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

STEWART, P. C. **Minimising dilution in narrow vein mines**. PhD Thesis, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 2005.

TATMAN, C.R. Mining dilution in moderate – to narrow – width deposits. SME Underground Mining Methods. Engineering Fundamentals and International Case Studies. Edited by William Hustrulid and Richard L. Bullock. Published by **Society for Mining, Metallurgy, and Exploration**, Inc. (SME) Littleton, Colorado, 615-626, 2001.