



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

**LAVRA SUBTERRÂNEA DE VEIOS ESTREITOS:
DIFICULDADES E SOLUÇÕES**

RAPHAEL COSTA SOUZA

Ouro Preto - MG
Março de 2017

Raphael Costa Souza

**LAVRA SUBTERRÂNEA DE VEIOS ESTREITOS:
DIFICULDADES E SOLUÇÕES**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro de Minas.

Área de Concentração: Engenharia de Minas

Prof(a). Orientador(a): José Margarida da Silva

Ouro Preto – MG

Março de 2017

S729L Souza, Raphael Costa.
Lavra de corpos estreitos [manuscrito]: dificuldades e soluções / Raphael
Costa Souza. - 2017.

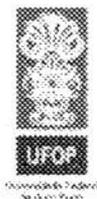
47f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. José Margarida Silva.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

1. Lavra subterrânea . 2. Minas e recursos minerais. 3. Ouro. I. Silva, José
Margarida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

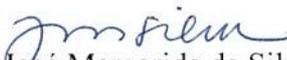
Aos 20 dias do mês de março de 2017, às 14:00h, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN/EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“LAVRA SUBTERRÂNEA DE VEIOS ESTREITOS: DIFICULDADES E SOLUÇÕES”**, pelo aluno **Raphael Costa Souza**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. José Margarida da Silva (Orientador)**, **Prof. M.Sc. José Fernando Miranda** e **Engº de Minas Syro Gusthavo Lacerda**

Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela APROVAÇÃO do candidato, com a nota 9,5 concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

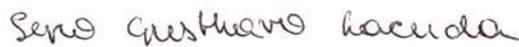
O aluno fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

Ouro Preto, 21 de março de 2017.


Prof. Dr. José Margarida da Silva
Presidente da Comissão Avaliadora e Professor Orientador


Prof. M.Sc. José Fernando Miranda
Membro da Comissão Avaliadora


Engº de Minas Syro Gusthavo Lacerda
Membro da Comissão Avaliadora


Raphael Costa Souza


Prof. Ms.C. José Fernando Miranda
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

À minha mãe e irmã pelo apoio incondicional na busca desta conquista.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao amigo Rômulo Prado Souza, o Kbo, pela oportunidade profissional e por me possibilitar imenso aprendizado no estágio, o que me levou à escolha do tema. Ao engenheiro Igor Sousa Saraiva por compartilhar um pouco do seu conhecimento. A todos os amigos da Jaguar Mining Inc. Complexo de Caeté por dividirem comigo suas experiências e conhecimento técnico. Ao professor José Margarida da Silva, meu orientador, pela paciência e enorme contribuição na elaboração deste trabalho. Aos mestres do DEMIN. À Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino gratuito de qualidade. Aos meus irmãos da República Penitenciária pelo apoio constante.

“sonhos determinam o que você quer, ações determinam o que você conquista”

Aldo Novak

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Metodologia	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Lavra subterrânea de corpos estreitos	4
2.2 Fatores que influenciam na lavra de corpos estreitos	5
2.2.1 Diluição	5
2.2.2 Porte dos Equipamentos e Mecanização	7
2.2.3 Geomecânica dos Maciços Rochosos	8
2.3 Métodos de lavra para narrow veins	13
2.3.1 Alargamentos Abertos	14
2.3.2 Recalque (Shrinkage Stopping)	15
2.3.3 Realce em subníveis	16
2.3.4 Lavra por Longwall	19
2.3.5 Câmaras e Pilares	20
2.3.6 Corte e Enchimento	21
2.3.7 Lavra contínua de veios estreitos	22
2.3.8 Comparativo entre os métodos	23
3 ESTUDO DE CASO	24
3.1 A empresa	25
3.2 Problematização	26
3.3 Ações desenvolvidas	27
4 DISCUSSÃO	29
5 CONCLUSÕES	31
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33
Anexo I	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados na lavra de veios estreitos da Mina de Córrego do Sítio	18
Tabela 2 - Comparação dos parâmetros operacionais	18
Tabela 4 - Lavras de corpos estreitos no mundo.....	24
Tabela 5 - Lista de equipamentos da Mina de Roça Grande (RG)	27
Tabela 6 - Comparação entre as carregadeiras rebaixasadas ST7 e ST2 G	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Total de toneladas produzidas por minas a céu aberto e subterrâneas.....	1
Figura 2 - Vista 3D dos corpos de minério da Mina de Pilar	2
Figura 3 - Modelo esquemático de diluição planejada e diluição adicional.....	6
Figura 4 - Diluição em função da vida da mina	6
Figura 5 - Seção de galeria para lavra em sublevel stoping.	8
Figura 6 - Gráfico de estabilidade de Mathews modificado.....	9
Figura 7 - Fator de estresse da rocha (A)	10
Figura 8 - Fator de design da orientação da superfície da escavação	10
Figura 9 - Fator de orientação das descontinuidades nas paredes	10
Figura 10 - Equivalent Linear Overbreak/Slough	12
Figura 11 - CMS V500 da Optech	12
Figura 12 - Modelo esquemático de utilização de um scanner CMS	12
Figura 13 - Alargamentos abertos com lavra descendente	15
Figura 14 - Seção esquemática do método de recalque	16
Figura 15 - Vista 3D de lavra por furos longos.	17
Figura 16 - Sistema de equipamento utilizados na lavra por longwall	19
Figura 17 - Modelo esquemático de Câmaras e Pilares	20
Figura 18 - Modelo esquemático do método cut and fill e jumbo	21
Figura 19 - Sequência da lavra contínua de corpos estreitos	22
Figura 20 - Mapa de localização dos complexos de mineração da Jaguar Mining ...	25
Figura 21 - Sólido do modelo geológico e sólido de lavra	26
Figura 22 - Seção do modelo geológico e do sólido de lavra	26

RESUMO

As atividades de mineração em subsolo representam uma fatia considerável no mercado mundial de produção de minério. Muitos minerais que não são encontrados em superfície ainda podem ser explorados em profundidade com a utilização de métodos de lavra subterrânea. Dentre os corpos de minério encontrados no subsolo, destacam-se o grupo dos chamados veios, que são corpos tabulares formados pela percolação de material em descontinuidades dos maciços rochosos. Os veios de minério frequentemente estão associados a elementos de grande valor econômico tais como ouro, prata, platina, entre outros. Ainda na família dos veios encontra-se o grupo dos *narrow veins*, ou veios estreitos, que são corpos de no máximo 3 metros de espessura. A lavra de veios estreitos é um grande desafio da indústria da mineração pois geralmente estes corpos não apresentam continuidade em forma, espessura e teor, e por serem pouco potentes, ou seja, pouco espessos, dificultam a lavra mecanizada sem que ocorram grandes diluições. A escolha do método apropriado para se obter a maior recuperação do minério com os menores custos e maior segurança é um desafio para os engenheiros de minas, e requer a análise de diversos fatores, os quais serão objetos de estudo deste trabalho.

Palavras chave: Lavra subterrânea, veios estreitos, ouro, diluição, lavra mecanizada

ABSTRACT

The underground mining activities represent a considerable share of the ore production world market. Many minerals that are not found on surface, can still be explored in depth with the use of underground mining methods. Among the orebodies found underground, stand out the group of the so-called veins, that are tabular bodies formed by material percolation in the rock mass discontinuities. The ore veins are often associated to high economic value elements like gold, silver, platinum, among others. In the family of the veins we still have a group of the so-called narrow veins, that are bodies with 3 meters maximum thickness. Narrow veins mining is a huge challenge in the mining industry, as this bodies usually have no continuity in shape, width and grade, and so on make the mechanized mining with low dilution rates very difficult. The choice of the appropriate method to obtain the larger ore recovery with less costs and higher safety is a challenge to mining engineers, and require analysis of several factors, that will be the objects of study of this paper.

Keywords: Underground Mining, Narrow veins, Gold, Dilution, Mechanized Mining

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A atividade minerária é de suma importância para a manutenção dos padrões de vida na sociedade atual, visto que é dela que provém a maior parte da matéria prima que é transformada em bens de consumo.

Com o passar dos anos, criou-se a necessidade de se lavrar corpos minerais mais profundos devido à escassez de diversos minerais em superfície. Esta escassez se dá devido ao caráter não renovável dos bens minerais, ou seja, não é possível aproveitar superficialmente uma mesma área para um mesmo bem mineral após a exaustão do mesmo.

As atividades mineradoras em subsolo surgiram com o intuito de reduzir a escassez desses bens minerais não mais encontrados em superfície por meio de métodos de lavra subterrânea. A figura 1 ilustra a importância da mineração em subsolo em termos de toneladas totais produzidas anualmente no mundo.

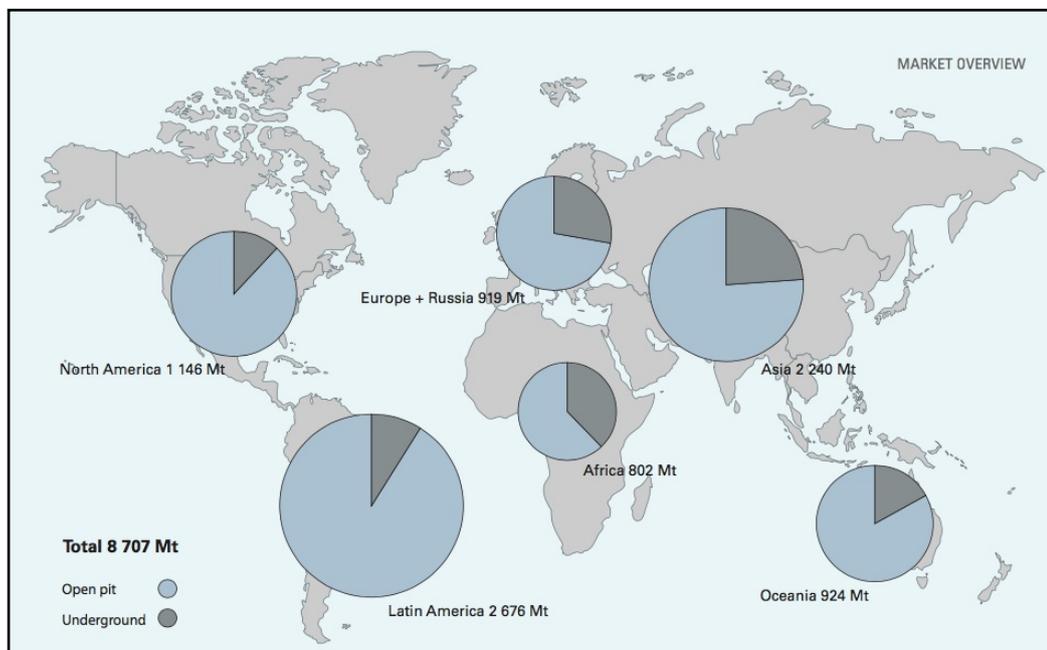


Figura 1 - Total de toneladas produzidas por minas a céu aberto e subterrâneas.
Fonte: Modificado de Atlas Copco (2014).

Nesse contexto encontram-se os corpos denominados veios, que de acordo com Dirige (1996), são corpos tabulares com mergulho geralmente acentuado, que permitem a movimentação das rochas fragmentadas por meio de gravidade, e ainda *narrow veins*, que são veios com menos de 3 metros de espessura. Segundo Olsson et al. (1985, citado por Dirige, 1996), *narrow veins* são corpos de minério que não podem ser lavrados por equipamentos de larga escala comuns. A figura 2 ilustra um modelo geológico de corpos estreitos da Mina de Pilar da Jaguar Mining.

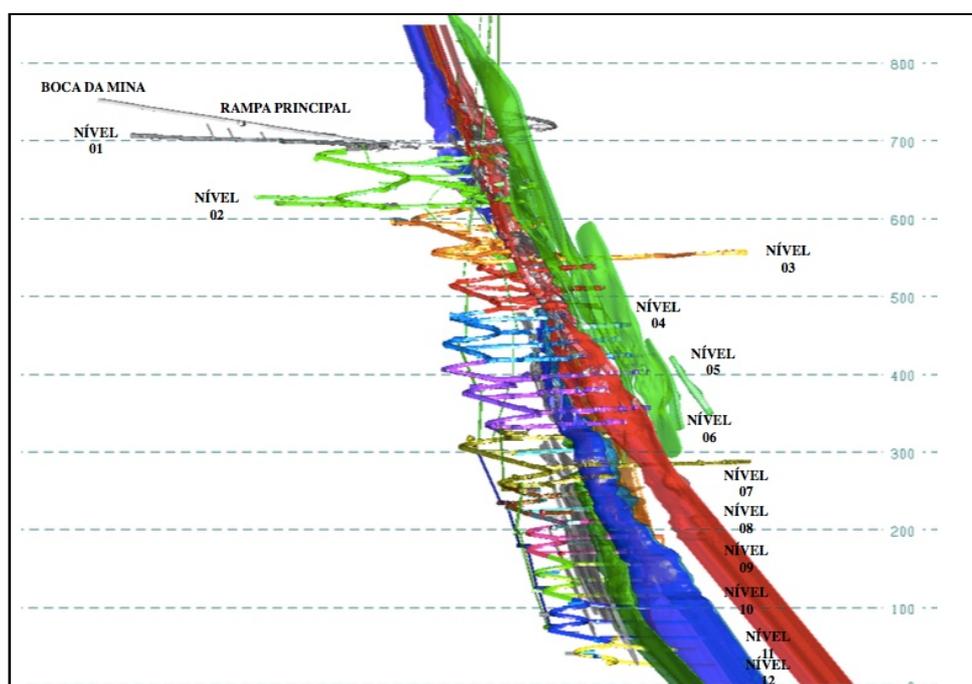


Figura 2 - Vista 3D dos corpos de minério da Mina de Pilar
Fonte: Modificado de Relatório interno da Jaguar Mining Inc - 2016

1.2 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo apresentar os aspectos da lavra dos chamados *narrow veins*, apresentando os fatores determinantes na escolha do método de lavra e mostrar tentativas de aumento da mecanização e da produtividade da lavra subterrânea de corpos estreitos.

1.3 Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso foi adotada a seguinte metodologia:

A - Revisão bibliográfica realizada por meio de consulta a artigos, teses, revistas e livros que envolvem a área trabalhada;

B - Apresentação dos aspectos envolvidos na escolha do método de lavra a ser aplicado em minas subterrâneas;

C - Apresentação de métodos utilizados na lavra de corpos estreitos com comparativo entre os mesmos;

D - Apresentação de casos de minas de veios estreitos e suas especificidades;

E - Apresentação de estudo de caso acompanhado durante estágio em empresa de mineração;

F - Discussão sobre a lavra subterrânea de corpos estreitos, seus desafios e soluções;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Mitchell e Steen (2014, citados por Silva, 2017), a produtividade (índice que mede a eficiência nas minas), tanto em base de volume como de custo, vem diminuindo significativamente na indústria de mineração desde 2000. O grande desafio da lavra de corpos estreitos é reduzir custos e aumentar a produtividade das minas e a segurança dos operadores. Este objetivo pode ser alcançado por meio de implementação de métodos de lavra com maior grau de mecanização e menor utilização de mão de obra.

2.1 Lavra subterrânea de corpos estreitos

De acordo com Finkel et al. (2001), o desenvolvimento de técnicas de mineração em subsolo nas últimas décadas tem sido direcionado para métodos de produção de larga escala e associados a equipamentos mecanizados. A produção tem sido focada em unidades de alta produtividade com alta capacidade de toneladas.

Segundo Silva (2016a), as operações de veios estreitos formam parte relativamente pequena, mas importante da indústria mineira global, focalizada em minérios como ouro, prata e estanho. América Latina e África são fortes nesse ramo, mas existem atividades por todo o mundo.

Segundo Dirige (1996),

“ a primeira questão a ser proposta quando considera-se a abertura de uma nova mina ou expansão de uma já existente é a escolha do método de lavra a ser aplicado para se obter a máxima recuperação com maior produtividade e eficiência econômica. Vários fatores devem ser considerados, tais como, tamanho, forma e configuração do corpo de minério, geologia estrutural, dados geotécnicos e geomecânicos, e é claro, o valor e teor.”

Não existe um método ideal para a lavra de corpos estreitos, pois grande parte das incidências não possui uma homogeneidade em relação a forma e teor, logo é comum que uma mina subterrânea inicie a lavra de um corpo por um método

e ao longo do desenvolvimento adapte a lavra de acordo com as novas características encontradas do corpo de minério.

2.2 Fatores que influenciam na lavra de corpos estreitos

Diversos fatores influenciam na hora da escolha do método apropriado para a lavra de corpos estreitos. No decorrer deste capítulo serão apresentados alguns dos fatores bem como a maneira com que estes são avaliados durante o planejamento e operação do empreendimento mineiro.

2.2.1 Diluição

Segundo Wright (1983, citado por Stewart et Trueman, 2008), diluição pode ser definida como a contaminação do minério por material estéril durante o processo de mineração. Para corpos estreitos o controle da diluição é um processo que demanda um planejamento minucioso e execução perfeita por parte dos operadores, visto que pode influenciar diretamente na recuperação da planta de beneficiamento.

De acordo com Dominy et al. (1998) a mineração subterrânea de minerais metálicos está sempre associada com diluição e que a diluição excessiva é comumente citada como razão de insucessos de diversas minas em todo o mundo. Pode se dizer que a diluição é um dos fatores mais importantes a ser controlado durante as operações da mina, e diversas outras variáveis influenciam diretamente na otimização de seu valor.

Para efeitos de estudo, a diluição neste trabalho será dividida em dois tipos:

A - Diluição planejada

B - Diluição adicional

A diluição planejada envolve o material estéril retirado junto com o minério, que já estava incluso no planejamento à partir da seleção do método de lavra. A diluição adicional envolve o material estéril que foi incorporado ao minério e ao estéril da diluição planejada, seja devido a falha na execução do desmonte ou devido ao comportamento incerto da rocha encaixante. A Figura 3 ilustra a diluição planejada e a diluição adicional em um realce (*stope*) de acordo com a espessura do

corpo, espessura mínima planejada para o realce e espessura extraída.

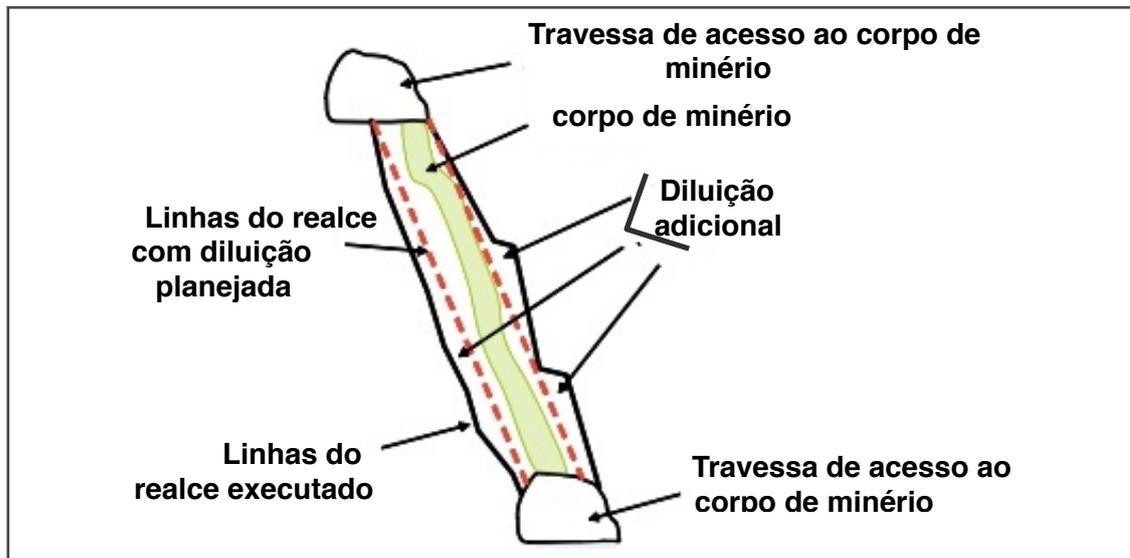


Figura 3 - Modelo esquemático de diluição planejada e diluição adicional
Fonte: Modificado de Stewart (2005).

À medida em que a mina passa pelos estágios de desenvolvimento e produção até atingir o fechamento, há uma tendência de que a diluição varie, assim como mostrado na figura 4 (Dominy et al., 1998). Há casos de diluição pontual que não expressa a faixa usual durante maior parte do tempo da produção. Almeida Filho (2015) revela que na Mina Cuiabá (AngloGold Ashanti) aconteceu situação de diluição de 60% em determinado setor de lavra.

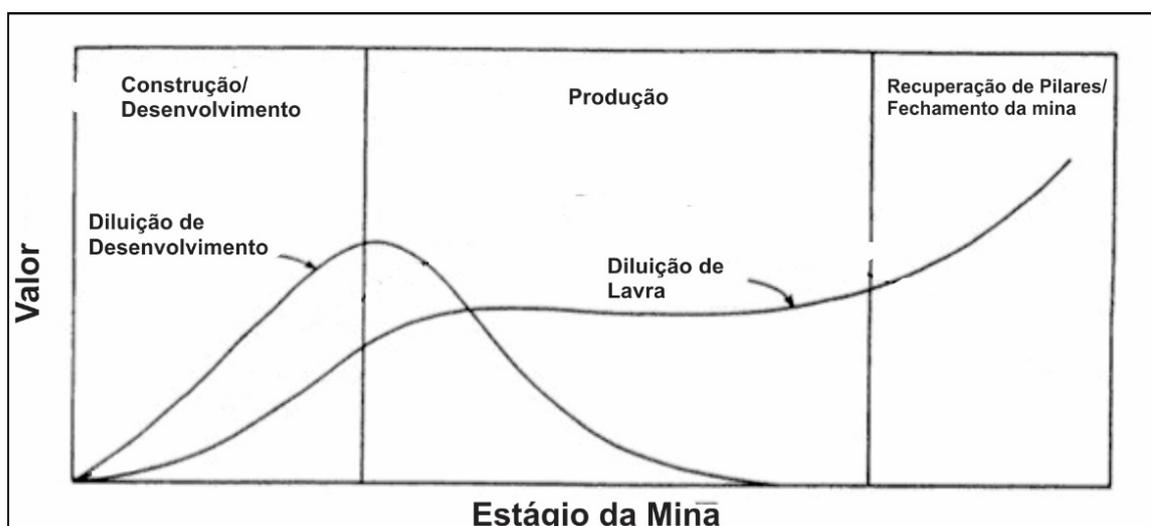


Figura 4 - Diluição em função da vida da mina
Fonte: Modificado de Dominy et al. - (1998)

Apesar da importância de se prever a diluição para a performance econômica da operação, frequentemente são requeridos julgamentos com informações limitadas (Stewart, 2005). Não há uma regra geral sobre o que é aceitável em termos de diluição, visto que o que pode ser razoável em uma mina pode ser economicamente insustentável em outra, dependendo de fatores como teor do estéril, custos de carregamento, transporte entre outros.

2.2.2 Porte dos Equipamentos e Mecanização

De acordo com Wernström (1996), quando se trata de mecanização, não basta apenas adquirir-se uma gama de equipamentos e tentar adaptá-los ao ambiente já existente. Para ser efetiva, a mecanização requer uma mudança de filosofia de trabalho e as vezes até uma mudança no método de lavra. Assim, ao se inserir maquinários no empreendimento minerador, o projeto (design) da mina deve ser pensado levando - se em conta o porte dos equipamentos e as práticas de trabalho também devem ser alteradas se assim necessário.

O porte dos equipamentos influencia diretamente na seleção do método de lavra a ser aplicado, visto que para corpos mais potentes, seções de galeria de lavra maiores poderão ser executadas sem grande influência na diluição, enquanto para corpos estreitos o porte do equipamento influencia diretamente na área da seção de lavra, sendo o mesmo fator preponderante para o aumento ou redução da diluição.

Os equipamentos empregados na lavra de veios estreitos tendem a ser altamente especializados e devem ser capazes de lidar com situações complexas de geologia e geometria. A figura 5 ilustra uma seção de galeria de lavra do método realce em subníveis (*sublevel stoping*) mostrando o quão peculiar pode ser a geometria de um acesso quando se trata de corpos estreitos. O métodos de lavra subterrânea que são aplicados a corpos estreitos serão tratados no item 2.3. O anexo 1 apresenta um plano de fogo para o método de realce em subníveis.

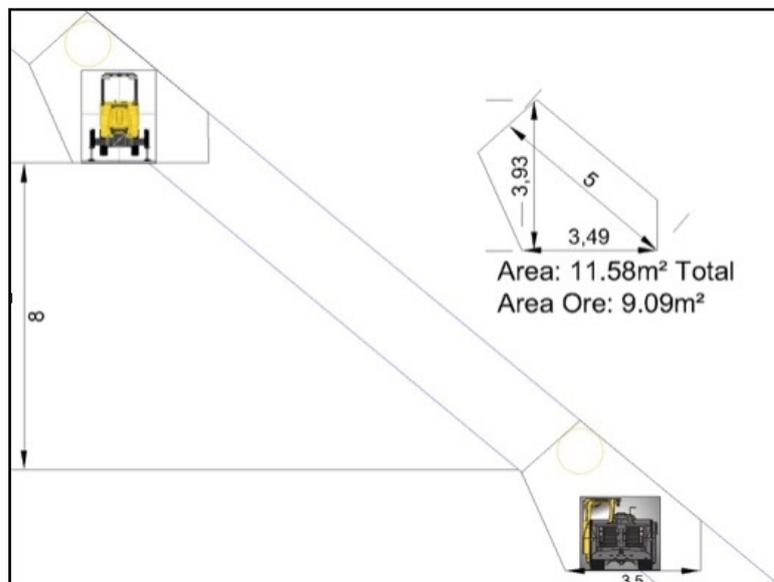


Figura 5 - Seção de galeria para lavra em *sublevel stoping*.
 Fonte: Adaptado do acervo da Jaguar Mining Inc. (2016)

2.2.3 Geomecânica dos Maciços Rochosos

Segundo Lacerda (2016), em minerações subterrâneas, onde existem diversas galerias, a interrelação entre escavações pode ser tão complexa que os recursos da engenharia atual são incapazes de analisar profundamente o comportamento mecânico do maciço rochoso.

Um método de se avaliar a estabilidade dos realces nas escavações subterrâneas, é por meio da utilização do gráfico de estabilidade de Mathews. O método é baseado em dois fatores calculados: o número de estabilidade de Mathews, N , que representa a capacidade da rocha de se manter estável sob condições de estresse; e o fator de forma, S , ou raio hidráulico, que avalia a geometria da superfície. (Mawdesley et al. 2003).

O principal conceito implícito no gráfico de estabilidade é que a dimensão da escavação pode ser relacionada com a competência do maciço rochoso para indicar a estabilidade ou instabilidade do mesmo. A figura 6 ilustra o modelo do gráfico de estabilidade de Mathews alterado após serem incorporadas informações de mais de 400 estudos de caso, enquanto o original era baseado em apenas 50.

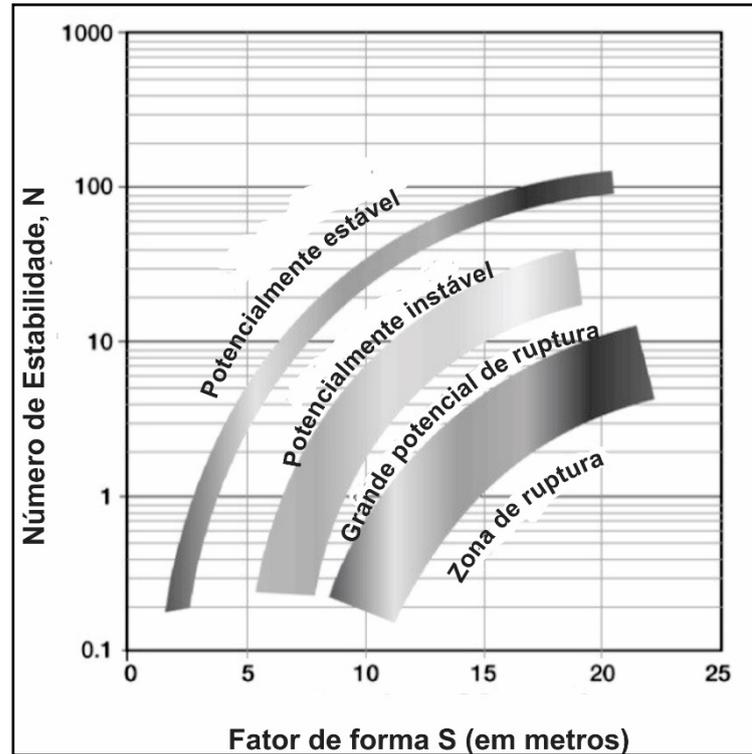


Figura 6 - Gráfico de estabilidade de Mathews modificado.
Fonte: Adaptado de Mawdesley et al (2003)

De acordo com Mawdesley et al. (2003), o método de Mathews utiliza uma forma modificada do sistema Q de classificação geomecânica. O valor modificado de Q, Q', é calculado por:

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$$

onde **RQD** é o índice de qualidade da rocha, **J_n** é o número de famílias de descontinuidades, **J_r** é a rugosidade das paredes da família de descontinuidades mais desfavorável e **J_a** é o grau de alteração das paredes da família de descontinuidades mais desfavorável. Assim, o número de Mathews é obtido relacionando-se o valor Q', com os fatores A, B e C, para estresse induzido, orientação de descontinuidades e orientação da superfície da escavação respectivamente, sendo então definido por:

$$N = Q' \times A \times B \times C$$

As figura 7, 8 e 9 ilustram como são analisados os fatores A, B e C respectivamente.

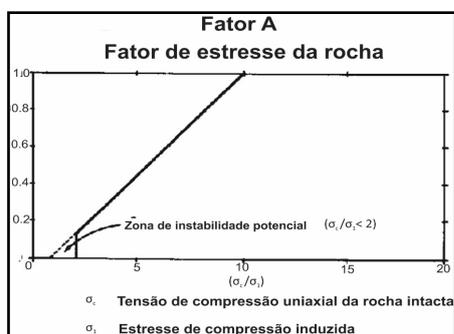
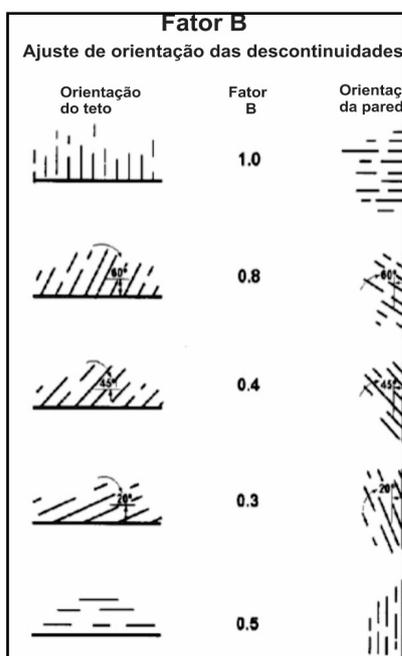


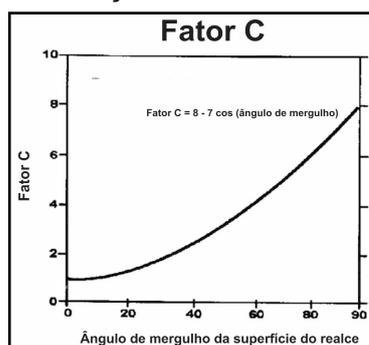
Figura 7 - Fator de estresse da rocha (A)
Fonte: Adaptado de Mawdesley et al. (2003)

Figura 8 - Fator de design da orientação da superfície da escavação



Fonte: Adaptado de Mawdesley et al. (2003)

Figura 9 - Fator de orientação das descontinuidades nas paredes



Fonte: Adaptado de Mawdesley et al. (2003)

O Fator de forma S, relaciona a área do realce com o perímetro do mesmo.

Apesar de bastante útil, a subjetividade das categorias de estabilidade apresentada no ábaco de Mathews é uma importante limitação deste quando aplicado a *narrow veins* assim como alertado por Ascott et Li (2000, citado por Stewart, 2005).

Vassalo (2016) propõe a aplicação da técnica de análise discriminante ao gráfico de estabilidade brasileiro modificado por Potivin, para definição de faixas de estabilidade.

Para se obter medidas objetivas de *overbreak* muitas empresas tem incorporado a tecnologia a laser de monitoramento de cavidades em suas atividades. Essa tecnologia incorpora o ELOS ou *linear equivalente overbreak/slough* que é um fator que relaciona a diferença entre o volume planejado e extraído do *stope* e a área superficial das paredes do mesmo excluindo-se o piso.

A determinação da diluição nas cavidades é calculada através da razão do fator ELOS, com o comprimento da dimensão normal à superfície analisada. Por exemplo, se ELOS = 0,5 m no *Hanging wall* e o corpo possui potência de 5 m, a diluição seria de $0,5/5 = 0,1$, ou seja 10% (Lima, 2016).

Diversos modelos que contêm esta tecnologia estão disponíveis no mercado atualmente por meio de diversos fornecedores tais como Riegl, Optech entre outros. O ELOS é uma eficiente medida de diluição por falha geomecânica porque independe da espessura do *stope*. A figura 10 apresenta uma esquematização do que é avaliado pelo ELOS. As figuras 11 e 12 apresentam um modelo de equipamento de escaner a laser da empresa Optech que apresenta o sistema CMS, *cavity monitoring system*, em português, sistema de monitoramento de cavidades, no qual o conceito do ELOS é incorporado e um modelo esquemático de utilização do equipamento em uma cavidade.

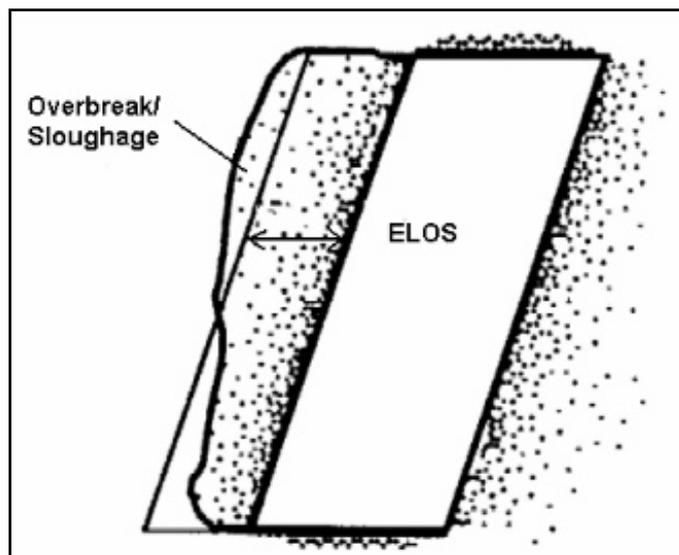


Figura 10 - Equivalent Linear Overbreak/Slough
Fonte: Modificado de Stewart (2005)



Figura 11 - CMS V500 da Optech
Fonte: Geodesia (2017)

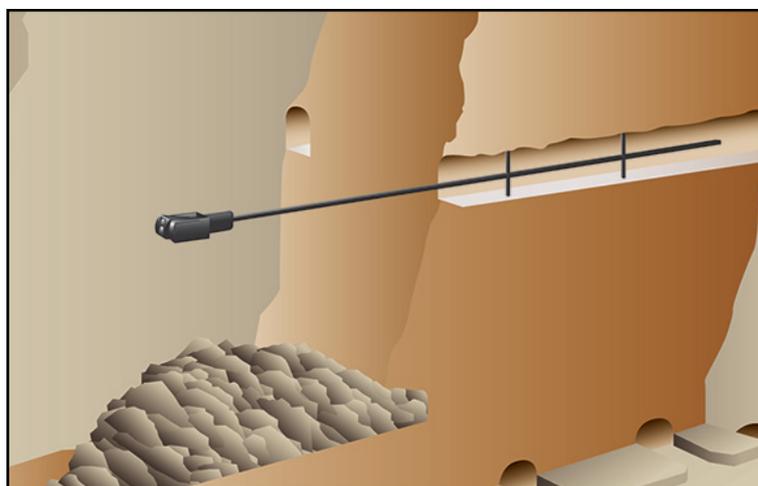


Figura 12 - Modelo esquemático de utilização de um scanner CMS
Fonte: Geodesia (2017)

A partir da análise da figura 12 pode-se verificar que com a utilização de escaners com tecnologia CMS, o risco para o operador é mínimo pois este não precisa entrar no realce para realizar a avaliação e descrição do mesmo.

Algumas experiências bem sucedidas com o sistema de monitoramento de cavidade, CMS, são citadas por Silva (2016b) tais como a redução da diluição e otimização dos realces na mina Fazenda Brasileiro da Yamana Gold, e a projeção do volume de enchimento e volume dos realces gerados na mina de Taquari Vassouras da Vale e por Silva Filho (2009) na determinação de volume vazio no deslocamento de passagens em mina do Quadrilátero Ferrífero de ouro.

2.3 Métodos de lavra para *narrow veins*

Na lavra subterrânea podemos classificar os corpos de minério em extração em: corpos de mergulho acentuado, corpos horizontais e sub-horizontais e finalmente de corpos de mergulho suave. Nos corpos com forte mergulho, o minério fragmentado desce por gravidade até atingir a galeria de transporte. Nos corpos de mergulho suave a inclinação excede limites de trafegabilidade de equipamentos, mas não é suficiente para que ocorra escoamento do minério desmontado, sob ação da gravidade, das frentes de lavra até galeria de transporte. Nos corpos planos (horizontais e sub-horizontais), o equipamento sobre rodas pode chegar até a pilha de material fragmentado.

A importância da lavra de veios estreitos varia geograficamente, com a América Latina sendo uma área forte, porém minas assim se encontram por todo o mundo. Muitos depósitos históricos de ouro são retrabalhados ou redeseñvolidos, conforme International Mining (2010). De acordo com Stewart (2005) existem métodos convencionais para a lavra de *narrow veins* os quais utilizam equipamentos convencionais tais como perfuratrizes manuais e carregadeiras pneumáticas .

A escolha depende da natureza do corpo, de seu mergulho, da competência da rocha encaixante e de considerações técnicas. De acordo com Laflamme *et al.* (1994, citado por Silva, 2016a), os procedimentos de lavra de um depósito podem mudar no tempo em função do desenvolvimento de novos arranjos ou de novos equipamentos . Métodos por abatimento não são recomendáveis para a lavra de veios estreitos pois estes acarretam em grande diluição.

Entre os métodos aplicados à lavra de veios estreitos, destacam-se os Alargamentos Abertos com lavra ascendente e descendente, Recalque (*Shrinkage Stopping*), Realce em subníveis (*Sublevel Stopping*) e suas variações para corpos com alto mergulho (maior que 50°), os quais permitem o fluxo de material fragmentado por gravidade e os métodos de lavra por *Longwall*, Câmaras e Pilares e Alargamentos Abertos com lavra frontal, para corpos com médio e baixo mergulho. Ainda variações do método de Corte e Enchimento (*Cut and Fill*), que é um método bastante versátil, podem ser utilizadas tanto para corpos de alto mergulho quanto para corpos de médio mergulho.

Além destes um novo método já está sendo proposto pela empresa Mancala Resources Pty Ltd na lavra de corpos estreitos por meio da utilização de um minerador vertical. Este e os métodos citados anteriormente serão descritos a seguir.

2.3.1 Alargamentos Abertos

Em sentido amplo, a lavra por realces auto-suportantes (*stopes with natural pillars, unsupported methods*) ou alargamentos abertos engloba os métodos de câmaras e pilares, subníveis e recalque. Teoricamente, exceto para plácemes, são aplicáveis a qualquer tipo de corpo de minério (Hartman, 1987, citado por Silva, 2016).

Em sentido restrito, alargamentos abertos (*open stopes*) referem-se àqueles em que as cavidades são deixadas completamente vazias, sem emprego de nenhum método regular de suporte, geralmente em corpos de menores dimensões. O método de Alargamentos Abertos abrange o ataque ao corpo de minério de maneira frontal, ascendente e descendente. Para uma melhor aplicação do método dos Alargamentos Abertos é importante que as rochas do corpo de minério e encaixantes tenham uma competência de média a boa para evitar altas diluições. O método é de difícil mecanização e não permite uma alta produtividade. A figura 13 ilustra o método de alargamentos abertos com lavra descendente

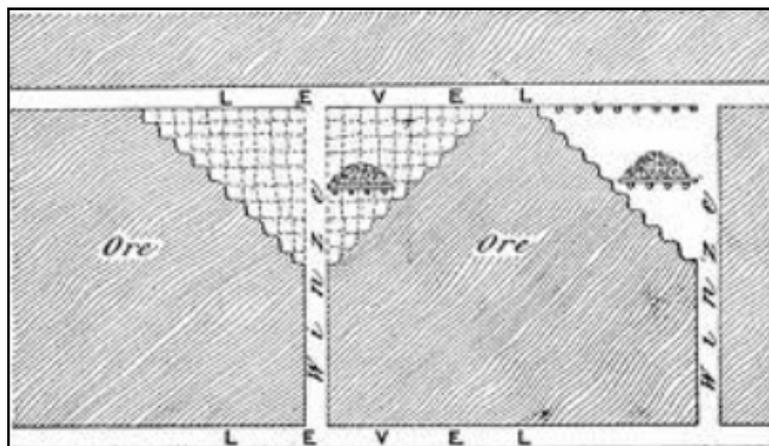


Figura 13 - Alargamentos abertos com lavra descendente
Fonte: Extraído de Silva (2016a)

2.3.2 Recalque (Shrinkage Stopping)

O método de recalque é um método de lavra ascendente em que a maioria do minério desmontado permanece no realce para prover piso de trabalho para os mineiros. Segundo Haptonstall (2011), este método pode ser facilmente aplicado a corpos com espessura por volta de 1 metro, apesar de poder ser empregado com sucesso para corpos de maior espessura.

Para a aplicação do método, a rocha do minério deve ser resistente bem como as encaixantes. O corpo de minério pode ter qualquer forma porém com limites bem definidos. O mergulho do corpo de minério deve ser preferencialmente acima de 50° para permitir o fluxo livre do minério por gravidade. O desenvolvimento da lavra geralmente se dá por galerias dentro do corpo de minério, separadas verticalmente por níveis que variam de 30 a 180 metros. Após a definição dos limites do corpo de minério, são feitos *raises* para se comprovar a continuidade do corpo e também para se fornecer ventilação e entrada para suprimentos e operadores. Para as atividades de perfuração, são utilizadas perfuratrizes manuais na lavra e jumbos podem ser empregados no desenvolvimento dos níveis. Para a limpeza das frentes de desenvolvimento e nivelamento do piso de trabalho podem ser utilizadas carregadeiras do tipo LHD (*load haul dump*) ou escavadeiras de pequeno porte. O carregamento do material pode ser feito por meio de vagonetas que devem ser instaladas sobre os chutes de minério ou por caminhões rebaixados. A figura 14 ilustra um modelo esquemático de lavra por recalque.

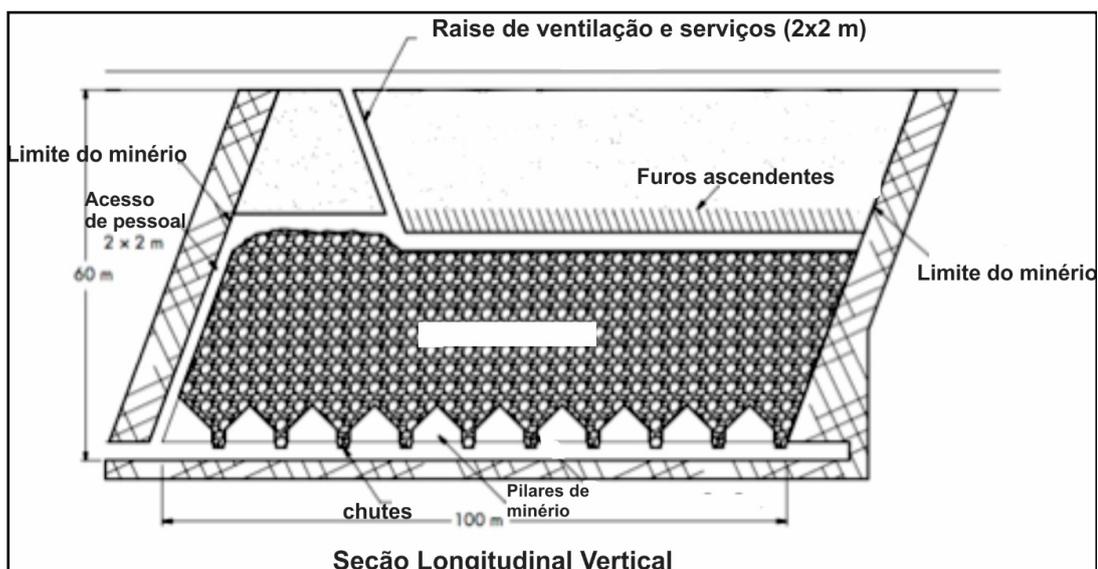


Figura 14 - Seção esquemática do método de recalque
 Fonte: Modificado de Haptonstall (2011).

2.3.3 Realce em subníveis

No método de realce em subníveis, ou *sublevel stoping*, o corpo de minério é dividido em *stopes* que são espécies de fatias do corpo de minério. Os *stopes* são planejados com o auxílio de softwares de planejamento de lavra, tais como VULCAN, DATAMINE, MINESIGHT e DESWIK, os quais otimizam as dimensões dos *stopes* para obtenção de menores valores de diluição e possibilitam a visualização da operacionalidade da mina. Assim como na lavra por recalque, são desenvolvidas galerias espaçadas verticalmente, desta vez com distâncias variáveis de 10 a 30 metros entre subníveis. Esse espaçamento vai de acordo com a capacidade de perfuração dos equipamentos disponíveis.

A lavra por realce em subníveis requer que as rochas do *hanging wall* e do *footwall* sejam de competência alta, visto que não há utilização de suportes nos realces deixados após o desmonte. Além disso, entre dois níveis são deixados os chamados *sill pillars* que são pilares horizontais de espessura variável e os *rib pillars* que são pilares verticais. Ambos os pilares são utilizados para reforçar a estabilidade nos realces suportando a redistribuição de tensões provocada pela escavação.

Para que a execução do desmonte seja bem sucedida, é necessário criar-se fácies livres em cada nível de *stopes* possibilitando que o corpo de minério seja melhor fragmento, pois a resistência das rochas à tração é bem menor do que a

resistência à compressão. Essas fácies livres são denominadas *slots*. O *slot* em um *stope* é uma região na extremidade do *stope* em que são realizados furos mais próximos e que é depositada uma razão de carga maior para se criar uma face livre suficiente para comportar o desmonte. Os *slots* também podem ser obtidos com a utilização de equipamentos do tipo *raise borer*. Os equipamentos utilizados para perfuração dos painéis de lavra são perfuratrizes que podem ser do tipo *fandril* e para o desenvolvimento dos acessos jumbos são bastante utilizados. Para se retirar o material fragmentado dos realces, são utilizadas carregadeiras do tipo LHD com controle remoto, evitando assim que o operador entre no realce e fique exposto a eventuais desprendimentos ou rolamentos de rochas. Para transportar o minério podem ser utilizados caminhões rodoviários ou rebaixados e ainda vagões sobre trilhos ou correias transportadoras a depender do projeto da mina.

O *sublevel stoping* apresenta algumas variações que têm sido implementadas dentre as quais destacam - se o *Longhole Stopping*. Na lavra por furos longos, elimina-se quase que em totalidade a existência de subníveis. A distância entre níveis é limitada apenas pelo comprimento do furo que a perfuratriz é capaz de executar com desvios pequenos (menos de 2°).

A figura 15 ilustra um modelo esquemático de utilização do método de *longhole stoping* onde estão representados: 1 - *Stope*; 2 - Minério fragmentado; 3 - Galeria de extração; 4- Acesso de perfuração; 5 - Furos longos; 6 - Material de *Overbreak*; 7- Galeria de transporte; 8 - Cabeceira de carregamento .

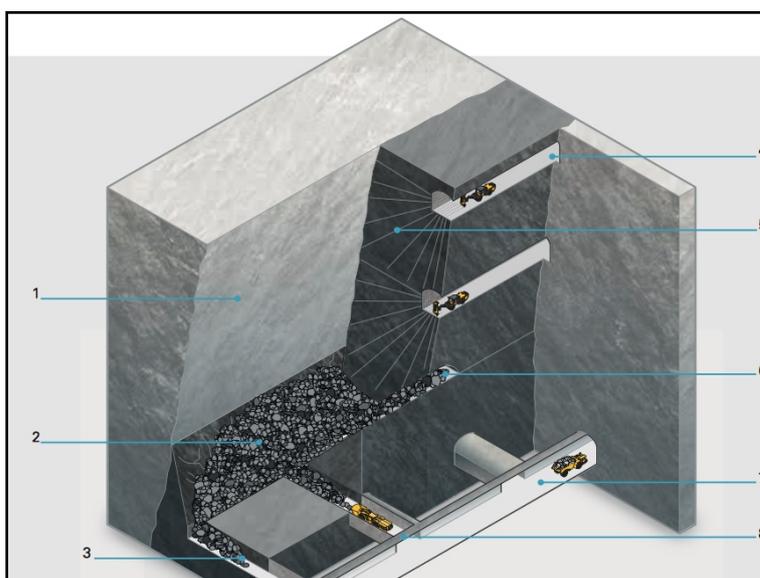


Figura 15 - Vista 3D de lavra por furos longos.
Fonte: Modificado de Atlas Copco Underground Mining (2014)

Januário et al. (2010) estudaram o impacto na diluição operacional, ocasionado pela execução de furos longos de 15 e 20 m para lavra de múltiplos veios estreitos com espessura média de 2 m na Mina de Córrego do Sítio. Neste trabalho os autores buscam viabilizar a lavra destes múltiplos veios, aumentar a produtividade da mina e reduzir a diluição. A tabela 1 mostra os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 1 - Resultados na lavra de veios estreitos da Mina de Córrego do Sítio

Parâmetros	Área mínima de lavra	Diluição nos contatos	Desenvolvimento de galerias
Antes do Estudo	2,89 metros	50 centímetros	-
Após o Estudo	2,20 metros	25 centímetros	Redução de 35 km

Fonte: Autor

Quanto à produtividade, os painéis de 20 metros se mostraram mais eficientes assim como apresentado na tabela 2.

Tabela 2 - Comparação dos parâmetros operacionais (SL 15m x SL 20m)

Parâmetros Operacionais	Subníveis de 15 metros	Subníveis de 20 metros	Qual é o melhor
Geometria do corpo	Semi regular complexa	Semi regular complexa	igual
Largura mínima de lavra	2,2 metros	2,2 metros	igual
Produtividade (t/furo)	44	63	SL 20 m
Perfuração Específica (m/t)	0,78	0,61	SL 20 m
Razão de carga (kg / t)	0,64	0,57	SL 20 m
Maior Perfuração Longa (m)	14	10	SL 20 m

Fonte: Modificado de Januário (2010)

A mudança da dimensão dos subníveis de 15 m para 20 m possibilitou aumento de 38% de produtividade e diminuição de 29% no desenvolvimento.

2.3.4 Lavra por *Longwall*

De acordo com Bessinger (2011), a lavra por *longwall* é uma técnica que evoluiu amplamente nos últimos anos devido a necessidade de melhores condições de segurança e produtividade, redução de mão de obra e de custos. Fileiras de pilares de madeira que eram usadas na frente de lavra deram lugar a suportes auto marchantes e detonações foram substituídas por mineradores contínuos. Além disso o transporte por vagonetas foi substituído por correias transportadoras e *shuttle cars* e o número de colaboradores na frente de lavra pôde ser reduzido. Segundo Hamrim (2001) o desenvolvimento da lavra por *Longwall* envolve a escavação de uma rede de galerias de carregamento para acesso da frente e transporte do minério para os *shafts* de acesso a mina. A distância entre duas galerias adjacentes de acesso à frente determina dimensão da frente longa. O método é comumente aplicado na extração de carvão e potássio mas também tem larga utilização para corpos estreitos de baixo mergulho que contêm minerais metálicos. A segurança na frente de trabalho é feita por suportes auto marchantes que se movem segundo o avanço da lavra e o teto atrás do suporte pode eventualmente colapsar sem riscos à segurança dos trabalhadores.

A figura 16 ilustra um sistema de equipamentos utilizados na lavra por *Longwall*.



Figura 16 - Sistema de equipamento utilizados na lavra por *longwall*
Fonte: Extraído de mining.com (2014)

2.3.5 Câmaras e Pilares

A lavra por Câmaras e Pilares consiste na abertura de vários *stopes* ou câmaras segundo um plano horizontal ou com pouca inclinação, no qual são deixados pilares de minério ou estéril lavrado para suportar as tensões verticais. Para aumentar a recuperação do minério, são deixados os menores pilares possíveis. De acordo com Hamrim (2001), como o gradiente da escavação é menor do que o necessário para o fluxo do material desmontado por gravidade, o minério fragmentado é carregado na câmara e transportado para pontos de descarga onde ele poderá ser transportado por gravidade ou por meios mecânicos para finalmente chegar ao ponto de retirada de material da mina. O desenvolvimento dos acessos geralmente se dá dentro do próprio corpo e a utilização de câmaras já lavradas como rotas de transporte é usual. Para a perfuração desenvolvimento das câmaras e dos acessos são utilizados jumbos, o material é fragmentado por desmonte com explosivos e então carregado para os pontos de extração com utilização de carregadeiras e caminhões rebaixados. A figura 17 ilustra um modelo esquemático do método de Câmaras e Pilares onde estão representados: 1– Cable bolt; 2 – Bancada Vertical; 3 – Pilar ; 4 - Camada Horizontal.

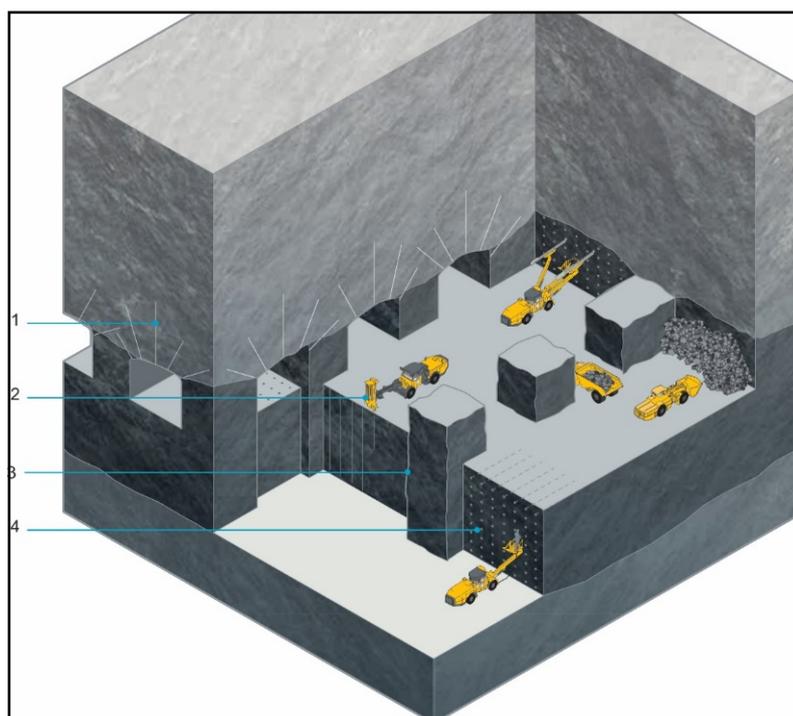


Figura 17 - Modelo esquemático de Câmaras e Pilares
Fonte: Modificado de Atlas Copco Underground Mining (2014)

2.3.6 Corte e Enchimento

O método de lavra por corte e enchimento, ou *cut and fill*, é um método no qual os vazios criados pela escavação precisam ser preenchidos para que a lavra continue. Esse enchimento é requerido tanto para prover suporte para as escavações subsequentes quanto para fornecer um piso de trabalho para os próximos níveis da escavação. A maior vantagem apresentada pelo método é a seletividade que a lavra possibilita, sendo assim bastante utilizado na lavra de corpos que não apresentam homogeneidade em forma e teor. O desenvolvimento das galerias é executado com jumbos realizando a perfuração, desmonte com explosivos e o transporte através de chutes ou com auxílio de carregadeiras e caminhões. O ataque ao corpo de minério é feito de maneira ascendente podendo também ser frontal caso o corpo tenha baixa inclinação. A figura 18 ilustra o método de corte e enchimento e apresenta uma imagem real de um jumbo realizando a perfuração da frente de lavra onde estão representados: 1 – Dutos de Ventilação; 2 – Piso de backfill; 3 - Rampa principal.

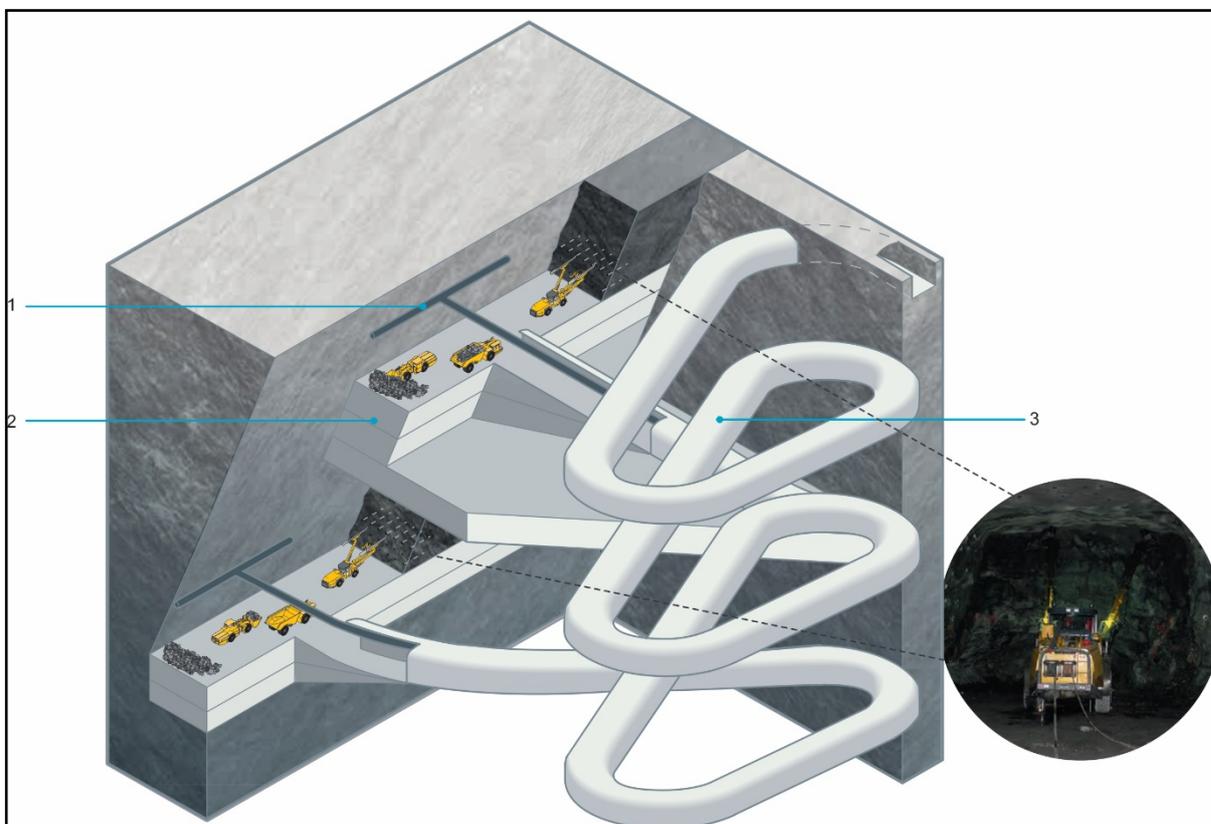


Figura 18 - Modelo esquemático do método *cut and fill* e jumbo
Fonte: Modificado de Atlas Copco Underground Mining (2014)

2.3.7 Lavra contínua de veios estreitos

A implementação de um novo método está sendo estudada para viabilizar o Conrad Silver Project no sudeste da Austrália. Trata-se da utilização de um minerador vertical mecanizado, que será fornecido pela Mancala Resources Pty Ltd. A empresa apresenta em vídeo a utilização deste equipamento. A lavra com a utilização do MVM (Minerador Vertical Mecanizado) é uma espécie de “*raise and fill*”, onde o MVM perfura *raises* ascendentes equidistantes ao longo do *stope*, sendo que o material lavrado nos furos é depositado em uma espécie de caçamba e retirado com auxílio de uma carregadeira adaptada. Após a execução da primeira sequência de furos, os mesmos são preenchidos com material cimentante. Após a secagem, o material de enchimento fornece resistência ao maciço rochoso possibilitando que os espaços entre os *raises* iniciais sejam lavrados da mesma maneira. A empresa promete executar a lavra com pouca ou nenhuma diluição de veios com espessura mínima de até 80 centímetros e com avanço de até 4 metros por hora. Caso a implementação seja bem sucedida em Conrad Silver Project, esse método pode revolucionar a maneira como são lavrados os corpos estreitos de alto mergulho. A figura 19 apresenta uma sequência esquemática da lavra contínua de veios estreitos.



Figura 19 - Sequência da lavra contínua de corpos estreitos
Fonte: Modificado de Mancala (2013)

2.3.8 Comparativo entre os métodos

A tabela 3 apresenta um comparativo de alguns dos parâmetros indicados por Hartman (1987) para os métodos citados anteriormente.

Tabela 3 - Comparação da aplicabilidade dos métodos

Características	Métodos de Lavra					
	Estabilidade Geomecânica	Mergulho do depósito	Grau de mecanização	Seletividade	Produtividade	Diluição
Alargamentos Abertos	Vãos menores, utilização de cabos e straps	Alto (ascendente e descendente) Baixo (frontal)	Baixo	Alta	Baixa	Baixa
Recalque	Alta	Alto (fluxo de minério por gravidade)	Baixo	Moderada	Baixa	Baixa
Realce em Subníveis	Moderada a Alta	Alto (fluxo do minério por gravidade)	Alto	Baixa	Alta	Moderada
Longwall	Abatimento controlado	Baixo, preferencialmente horizontal	Alto	Baixa	Alta	Baixa
Câmaras e Pilares	Alta	Baixo, preferencialmente horizontal	Alto	Baixa	Alta	Moderada
Corte e Enchimento	Flexível para rochas de baixa-média resistência;	Moderado a alto	Alto	Alta	Moderada	Baixa
Mineração Contínua	Alta estabilidade do maciço devido a enchimento	Alto	Alto	Alta	Baixa	Baixa

Fonte: Autor

3 ESTUDO DE CASO

Vários depósitos minerais ocorrem em profundidade na forma de veios estreitos. No passado, esses corpos foram explorados com a utilização de grande mão de obra a altos custos para se obter as maiores taxas de produção com mínimas diluições, ou por métodos mecanizados de baixo custo com baixa produção e alta diluição (Hall, 1987). Segundo McCarthy (1993), a maioria dos corpos estreitos explorados no mundo são veios de ouro, provavelmente por causa do alto valor de mercado, tornando - os mais econômicos do que veios estreitos de outros minerais. De acordo com Walker (2015), as empresas líderes mundiais em fabricação de equipamentos para mineração possuem equipamentos de perfuração e carregamento adaptáveis para veios estreitos. A tabela 4 apresenta alguns casos de lavra de corpos estreitos no mundo.

Tabela 4 - Lavras de corpos estreitos no mundo

Mina	Bem mineral	Método de lavra	Especificidades	Fonte
Mina Galena (EUA)	Prata	Corte e enchimento	Largura de até 6 m, média 1,8 m, profundidade 1500 m, tensões são o fator principal	Hall (1987)
Mina Transvaal (África do Sul)	Ouro	Recalque	Largura de 1 a 3 m, mergulho acima de 50°, furos com inclinação de 45°	Hall (1987)
Mina Dome (Canadá)	Ouro	Realce em subníveis	Largura de até 6 m, mergulho 65°	Hall (1987)
Mina Pilar de Goiás (Brasil)	Ouro	Câmaras e Pilares e Realce em Subníveis	Espessura média de 1,1 m, e mergulho médio de 18°	Takano (2016)
Mina de Roça Grande (Brasil)	Ouro	Corte e enchimento	Espessura mínima de até 0,4 m	Jaguar Mining (2015)
Mina Co-O (Filipinas)	Ouro	Corte e enchimento e Recalque	Espessura varia de 1 a 3 m, mergulho varia de subvertical a ângulos muito pequenos	Medusa Mining (2017)
Mina Vouters (França)	Carvão	Corte e Enchimento	Mergulho acima de 60°, uso de correia transportadora	Hall (1987)
Mina Fondon (Espanha)	Carvão	Corte e enchimento	Largura entre 0,45 e 2 m, vagonetas de 3m ³	Hall (1987)
Mina Fraisse (França)	Urânio	Corte e enchimento	300 m de profundidade, limitado a 3 m de largura pelas condições do maciço	Hall (1987)

Fonte: Autor

3.1 A empresa

A Jaguar Mining Inc. é uma empresa canadense de mineração que atualmente opera em dois complexos de mineração de ouro no Brasil. Os principais ativos operacionais da empresa estão localizados no *greenstone belt* prolífico do estado de Minas Gerais e inclui o Complexo de Mineração de Ouro de Turmalina (Mineração Turmalina Ltda - MTL) e o Complexo de Mineração de Ouro de Caeté (Mineração Serras do Oeste Ltda - MSOL) que combinados produzem mais que 90.000 onças de ouro anualmente.

O Complexo de Mineração de Caeté, que inclui as minas do Pilar e Roça Grande e a planta de Caeté, está localizado entre 50 a 100 quilômetros da capital Belo Horizonte. A figura 20 apresenta um mapa da localização dos complexos de mineração da Jaguar Mining.

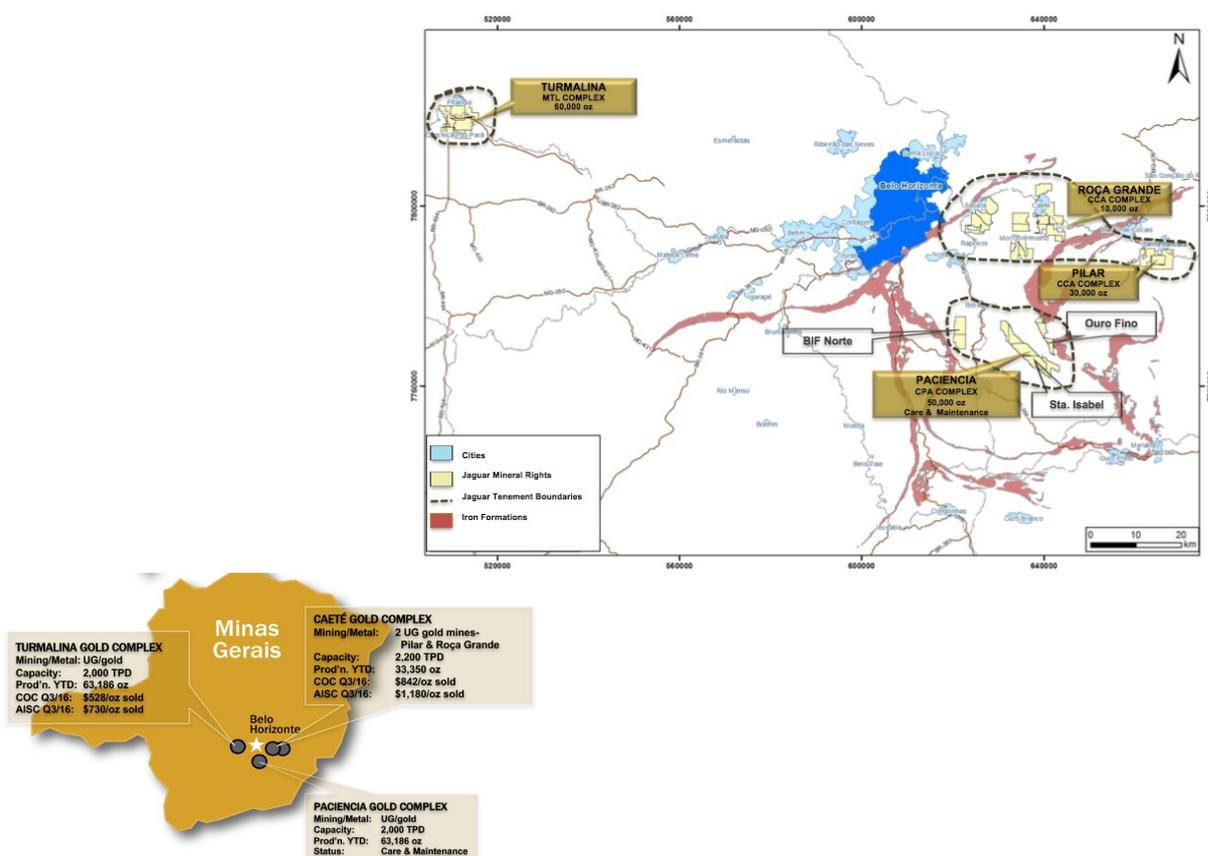


Figura 20 - Mapa de localização dos complexos de mineração da Jaguar Mining
Fonte: Jaguar Mining Inc (2016)

A seguir será apresentado um estudo de caso realizado na mina de Roça Grande do complexo de Caeté para justificar os fatores apresentados para escolha do método de lavra para corpos estreitos.

3.2 Problematização

A figura 21 ilustra o modelo geológico do corpo de minério RG7 da mina de Roça Grande em laranja e o sólido de lavra por corte e enchimento a ser executado para o stope no nível 4 em marrom.

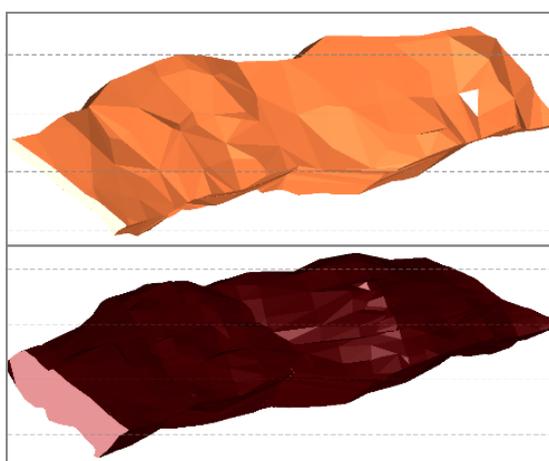


Figura 21 - Sólido do modelo geológico e sólido de lavra
Fonte: Relatório Interno Jaguar Mining Inc (2016a.)

A figura 22 ilustra a seção do sólido do modelo geológico sobreposta pela seção do sólido do stope a ser lavrado.

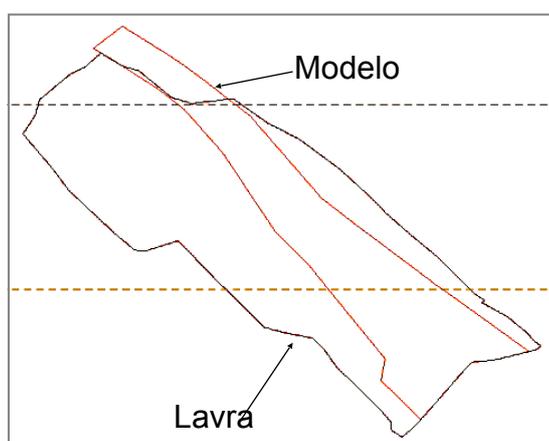


Figura 22 - Seção do modelo geológico e do sólido de lavra
Fonte: Relatório Interno Jaguar Mining Inc (2016a.)

Esse método ocasionaria uma diluição de 40 % em massa e teor. A proposta do planejamento era de utilizar equipamentos de menor porte e mão de obra própria para obter a redução da diluição e viabilizar a lavra do corpo.

3.3 Ações desenvolvidas

A empresa desenvolveu um estudo a respeito de *stopes* dos níveis 4 e 5 espaçados verticalmente em 70 metros e a viabilidade de utilização de equipamentos de menor porte para redução da diluição na lavra. O corpo nos níveis estudados varia em espessura de 0,4 a 2,81 metros. Seriam executados painéis de lavra com 8 metros na vertical e 12 metros inclinado. O método de lavra estudado é o *sublevel stoping* e a utilização de rastelo e/ou jatos de água para carrear o minério para o subnível inferior também seria estudada devido ao mergulho dos corpos que é em média de 38°, valor que não permite o fluxo livre do minério por gravidade, também dificulta o trabalho de equipamentos sobre pneus diretamente na pilha de minério fragmentado. Após campanha de sondagem aprovada, foi estimado um teor médio para a lavra entre os níveis 4 e 5 (lavra mais desenvolvimento secundário).

A tabela 5 apresenta a lista de equipamentos disponíveis para a lavra pelo método atual, na Mina Roça Grande (RG).

Tabela 5 - Lista de equipamentos da Mina de Roça Grande (RG)

Equipamento	Unidades	Comentários
Jumbo Atlas T1 D	2	A mina de RG possui um e outro seria alugado
LHD Atlas ST7	2	A mina de RG possui um equipamento e o outro seria transferido do complexo de Turmalina
Fandrill – Atlas 1257	1	O equipamento seria transferido do complexo de Turmalina
Rastelo	2	Reconstrução dos rasteiros da mina de RG

Fonte: Modificado de Relatório interno da Jaguar Mining Inc.

A tabela 6 apresenta uma comparação entre a carregadeira rebaixada LHD Atlas ST7 e a LHD Atlas ST2 G. Essa última seria a opção de equipamento de menor porte disponível para aplicação da lavra por realce em subníveis.

Tabela 6 - Comparação entre as carregadeiras rebaixadas ST7 e ST2 G

Dados Técnicos	ST7	ST2 G
Largura recomendada da galeria (m)	3,1	2,7
Capacidade de transporte (t)	6,2	3,6
Caçamba padrão (m ³)	3,1	1,9
Comprimento (m)	8,62	7,109
Altura (m)	2,16	2,16
Altura da caçamba levantada (m)	3,2	2,54
Largura do equipamento (m)	2,12	1,735

Fonte: Modificado de Relatório interno Jaguar Mining Inc (2015)

Devido a possibilidade de se lavar com seção menor, conseqüentemente diminuindo a diluição, o teor médio estimado (lavra mais desenvolvimento) aumentou em 23% em relação à outra alternativa. Apesar de os estudos apontarem para uma boa aplicabilidade do método de realce em subníveis, até o momento em que o estágio foi concluído, o método ainda não havia sido empregado devido a influência do preço da onça de ouro no mercado, que ainda não viabilizava economicamente a lavra da área em estudo.

4 DISCUSSÃO

O entendimento de como acontecem os procedimentos a nível operacional pode ser a chave para melhorar produtividade para o setor mineral. A produtividade média dos equipamentos vem caindo, segundo os pesquisadores, desde 2006, entre 14 e 32%.

Índices de performance de equipamentos são analisados periodicamente por grande parte das empresas para se tentar chegar na maior produtividade possível com o melhor grau de utilização dos equipamentos. São considerados fatores para melhorar eficiência de equipamentos: estratégia da mina, gestão dos dados e de pessoas.

A taxa de desenvolvimento tem caído uniformemente, aumentando o tempo para se alcançar um novo corpo de minério. A lacuna de produtividade aparece mais quando um novo depósito não é adjacente ao que está sendo lavrado. Uma das formas de aumento da produtividade pode se dar pelo aumento da mecanização. É importante adequar a lavra e desenvolvimento em relação a equipamentos de operações auxiliares: carregamento de explosivos, remoção de choco, aplicação de ancoragens entre outros, além de equipamentos de perfuração e carregamento.

Entre as vantagens da lavra por veios estreitos estão o baixo custo unitário de lavra, o controle acurado de teor. Entre os desafios estão: a diluição, a preservação do piso da galeria e baixa tonelagem de minério a ser tratada.

A lavra subterrânea de minerais metálicos está sempre associada com diluição e a diluição excessiva é comumente citada como razão de insucessos de diversas minas no mundo todo. Pode se dizer que esse é um dos fatores mais importantes a ser controlado durante as operações da mina, e diversas outras variáveis influenciam diretamente na otimização de seu valor. Furos mais curtos no desmonte podem reduzir a diluição, porém avanços menores podem reduzir a produtividade.

Entre os problemas que o aumento da diluição traz para o empreendimento podem ser citados: aumento no custo de transporte de estéril, maior quantidade de estéril enviado para a planta de beneficiamento e aumento na quantidade de rejeito que é depositado na barragem de rejeito (Silva, 2016b).

A diluição pode ter várias causas. Entre elas, causas naturais, pela geometria do próprio corpo de minério, como o mergulho, a potência e a resistência. Inclinações intermediárias do realce podem provocar diluição, além de problema de estabilidade nas rochas circunvizinhas (capa e lapa). Dependendo da complexidade, a diluição influenciada pela geologia pode ser responsável por um terço da diluição total. Depósitos com rochas hospedeiras fracas, que podem ser causadas por falhas geológicas, foliação da própria rocha e contatos indistintos usualmente estão associados à alta diluição.

Os fatores geotécnicos, como as características *in situ* no maciço rochoso, a presença de falhas geológicas, a própria foliação das rochas e alterações na fase de operação devido a redistribuição das tensões na escavação, resultam geralmente em *overbreak* (ocorrência de retirada de volume de materiais além dos limites planejados), sendo muitas das vezes necessária a utilização de suportes artificiais (tirantes, cambotas, entre outros) ou de suportes naturais (pilares) que podem ser melhor dimensionados devido as técnicas utilizadas para realizar os levantamentos e controlar a diluição

As empresas ao redor do mundo buscam a devida quantificação e o bom controle da diluição para reduzir custos.

Novas tecnologias têm contribuído para alcançar tal sucesso, como a aplicação de novos equipamentos de escavação e o uso de aplicativos (*softwares*) de planejamento de mina, que visualizam o corpo em três dimensões, no desenvolvimento de novos dispositivos que contribuem para análise dos realces reais lavrados de forma mais eficaz e que auxiliem na comparação com os realces de projeto.

Vários autores tais como Wernström (1996) e Finkel (2001) descrevem tentativas de mecanização, uma vez que veios estreitos alcançam produtividades da ordem 5-10 t/homem por turno de trabalho.

A tendência do desenvolvimento é claramente na direção dos métodos que permitam um mais alto grau de mecanização, tais como os métodos de corte e aterro, realce em subníveis ou variações desses.

5 CONCLUSÕES

É evidente a necessidade de estudo da melhoria da eficiência das operações de mineração, relacionada à produtividade. Essa produtividade é maior em grandes minas que em pequenas minas. O fator mais importante é evidentemente lavar o minério com a menor diluição possível. Esse fato pode parecer muito óbvio, porém na prática nem sempre as operações ocorrem dessa maneira.

A lavra de depósitos constituídos por veios estreitos é um desafio à produtividade, competitividade e lucratividade de muitas minas. O grau de mecanização das operações nesses corpos pode significar a continuidade ou não de diversos projetos. Muitas empresas de grande porte, fabricantes de equipamentos de mineração, já têm produtos voltados para a lavra de corpos estreitos porém diversas empresas de pequeno porte produzem equipamentos exclusivamente para este tipo de operação.

Os avanços na tecnologia já tem sido percebidos nos últimos anos, visto que muitas minas que tinham suas atividades interrompidas, estão sendo retrabalhadas ou replanejadas.

O aprimoramento dos softwares de planejamento de mina tem ajudado no desenvolvimento dos procedimentos operacionais e na viabilização da lavras de corpos estreitos.

A extração subterrânea de minério a grandes profundidades tende a se intensificar cada vez mais, devido aos poucos recursos minerais próximos à superfície e também às maiores restrições ambientais impostas à lavra a céu aberto. Mesmo com a crise mundial, os preços de alguns minérios comumente retirados por meio de aberturas subterrâneas continuam competitivos.

O alto valor dos bens minerais associados aos veios estreitos tem influência direta na busca por melhores práticas na lavra destes corpos.

A inclusão de equipamentos de porte apropriado para corpos estreitos e a utilização de métodos de lavra subterrânea mais mecanizados, pode ter uma significativa contribuição para a redução de custos no desenvolvimento e aumento na recuperação de minério, vide a economia alcançada por meio dos estudos de Januário et al. (2010) na Mina de Córrego do Sítio e da redução na diluição

apontada nos estudos da Jaguar Mining para a Mina de Roça Grande.

A mecanização das operações de mineração subterrânea é hoje um fator crucial para a sobrevivência saudável de muitos projetos. O futuro deverá contemplar apenas as operações de lavra capazes de manter custos de produção compatíveis com os preços de mercado do mineral explotado. Com isso, serão viáveis apenas aqueles projetos capazes de lavar com efetiva economia.

Minas com corpos estreitos também podem ser explotadas com nível adequado de lucratividade. Além de um bom projeto, são fundamentais ainda: o conhecimento geológico, o controle operacional (precisão na perfuração, controle de sobrequebra no desmonte - *overbreak*), sustentação eficiente das paredes de escavações e qualidade da mão-de-obra.

No estudo de caso apresentado, a inclusão de um equipamento de menor porte para a implantação de um novo método, viabilizaria a lavra do corpo de minério RG7 da Mina Roça Grande entre os níveis 4 e 5, mesmo com a implantação de um método não usual para corpos de médio mergulho, que é o realce em subníveis.

Um estudo aprofundado da influência dos softwares de planejamento na produtividade e otimização operacional fica como sugestão para trabalhos posteriores.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida Filho, Z. **ETE na Mina Cuiabá**. Comunicação no Fórum Ciência e Tecnologia. EMOP. 2015.

Atlas Copco - ***Underground Mining: A global review of methods and practices*** - Primeira Edição – 2014. Disponível em www.atlascopco.com - acesso em 08/02/2017

Bessinger, S. L. - ***Longwall Mining*** - In: *Darling, P. SME Mining Engineering Handbook*, Terceira Edição - Cap 13.8. 2011

Caterpillar. ***Longwall plow system helps set new low seam coal production record***. Disponível em <http://www.mining.com/web/cat>; acesso em 08/02/2017.

Dirige, A. Ph E. ***"A proposed procedure for preliminary mining method selection for narrow vein."*** - *Mine planning and equipment selection* - 1996.

Dominy, S. C.; Phelps, R.F.G.; Sangster, C.J.S.; Camm, G. S. - ***The nature of dilution in narrow vein mining operations***. *Mine Planning and Equipment Selection* 1998. p. 93-97.

Finkel, M.; Olsson, M.; Thorshag, H.; Wernstron, J.; Johansson, G. ***"Narrow ore mining in Zinkgruvan, Sweden."*** *Underground Mining Methods–Engineering Fundamentals and International Case Studies* - 2001. p. 221-227.

Geodesia – Disponível em <http://geodesia.microgeo.cl> - acesso em 08/02/2017.

Hall, B. E. - ***Mining of Narrow Steeply Dipping Veins*** - 1987.

Hamrim, H. – ***Underground Mining Methods and Applications*** – SME - *Underground Mining Methods* - Cap 1 - 2001

Haptonstall, J. - ***Shrinkage Stopping*** –In: *Darling, P. SME Mining Engineering Handbook*, Terceira Edição - Cap 13.3. 2011

Hartman, Howard L. **Introductory mining engineering**. New York: J.Wiley c1987. 633 p

International Mining. ***Mechanized narrow vein***. October 2010, p. 60-62.

Jaguar Mining Inc. Disponível em jaguarmining.com - acesso em Nov/2016.

Januário, J. L. T.; Pereira, R.; Oliveira, M. F.; Luciano, E.S. **Lavra Experimental: Obtenção de Parâmetros Operacionais e Validação do Planejamento de Lavra de Veios Estreitos de Ouro, Projeto Sulfetado, Mina Córrego do Sítio, Brasil.** – Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea - 2010.

Lacerda, S. G., “**Dimensionamento de Sistema de Suporte a partir de Levantamento Geomecânico.**” Trabalho de Conclusão de Curso - DEMIN. UFOP - 2016.

Laflamme, M.; Planeta, S.; Bourgoïn, C. ***Technological aspects of narrow vein mining: suggested modifications and new developments***. CIM Bulletin, march, p. 145-149. 1994.

Lima, T. C. A. **Análise técnica e econômica para utilização de cabos duplos em realces de sublevel na Mina Pequizão - Mineração Serra Grande, Crixás - GO.** Dissertação de mestrado em Engenharia Geotécnica no NUGEO - UFOP. 2016.

Mancala Resources Pty Ltd. ***Mechanized Narrow Vein Mining*** . Disponível em <http://www.mancala.com.au/> acesso em 09/02/2017.

Mawdesley, C. ; Trueman, R. ; Whiten, W.J. ***“Extending the Mathews stability graph for open-stope design”*** - 2003.

McCarthy, P. L. - ***Economics of narrow vein mining - Proceedings Narrow Vein Mining Seminar***, Bendigo, Victoria - 1993. p. 89-97.

Meduza Mining - Disponível em <http://www.medusamining.com.au/> - acesso em 17/02/2017

Relatório interno da Jaguar Mining Inc. **RG Mine - Study Method**. 21 p - 2015 a.

Relatório interno da Jaguar Mining Inc. **RG Underground Equipment Sizing**. 17 p - 2011

Silva, J. M. - **Notas de aula da disciplina MIN114 - Lavra Subterrânea** – 2016 a.

Silva, J; M. **Relatório do Projeto Produtividade e Fluxo de Material Fragmentado em Mineração Subterrânea**. UFOP - 2017.

Silva, R. L. C. **Medidas para controle de diluição planejada e não planejada em mina subterrânea**. Trabalho de Conclusão de Curso – DEMIN. UFOP - 2016 b.

Silva Filho, A. B. **Efeito da rugosidade em escoamento em passagem de minério**. Dissertação (Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto. 2009.

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

Stewart, P. C., and R. Trueman. **Strategies for minimising and predicting dilution in narrow-vein mines–NVD Method.** *Narrow Vein Mining Conference 2008.* Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008.

Takano, C. C. “**Aprendizado Prático Dos Trabalhos Das Diversas Áreas Da Mina Pilar De Goiás Pelo Acompanhamento E Descrição Das Atividades - Relatório de Estágio Supervisionado - DEMIN - UFOP - 2016**

Vassalo, T. F. S. 2016. **Aplicação da técnica de análise discriminante ao gráfico de estabilidade brasileiro modificado por Potvin.** Qualificação de Mestrado. PPGEM. UFOP. Ouro Preto

Walker, S. **Niche Mining Machines - Engineering & Mining Journal - Set/ 2015**

Wernström, J. **Selecting equipment for mechanized mining of narrow orebodies.** *Mining planning and equipment selection* - 1996. p. 493-498.

Anexo I

