

MONITORAMENTO DE ESCAVAÇÕES DAS GALERIAS DA MINA SUBTERRÂNEA DA MINERAÇÃO CARAÍBA S/A

Raíza Andressa Silva Farias, Andrade Gutierrez, e-mail: raizaandressa@gmail.com
Pedro Yamaguchi de Souza, Mineração Caraíba S/A
Erisvaldo Bitencourt de Jesus, Universidade Federal da Bahia

RESUMO

O monitoramento de escavação é uma forma concisa de avaliar o desempenho operacional do desenvolvimento de uma galeria através do acompanhamento dos índices de *overbreak*, *underbreak* e a qualidade da escavação. Ao iniciar o desenvolvimento das galerias subterrâneas os fatores não controláveis intrínsecos ao maciço rochoso devem ser avaliados de modo que as falhas operacionais peculiares ao processo sejam minimizadas, principalmente, na execução das atividades de marcação topográfica das frentes, perfuração horizontal. Para garantir melhor controle, tornar mais confiáveis às medições dos índices, realizou-se uma retroanálise dos levantamentos das escavações da Mineração Caraíba S/A, determinando os índices de *overbreak* e *underbreak*, a qualidade das escavações e correlações entre a razão de carregamento e os indícios foram investigados.

Palavras-chave: Escavação, *Overbreak*, *Underbreak*, Qualidade de Escavação.

ABSTRACT

Excavation monitoring is a concise way of evaluating the operational performance of a gallery development by monitoring the *Overbreak*, *Underbreak* and Excavation Quality indices. When starting the development of underground galleries, the non-controllable factors intrinsic to the rock mass should be evaluated so that the operational failures peculiar to the process are minimized, mainly in the execution of topographic marking activities of the fronts, horizontal drilling. In order to ensure better control, to make index measurements more reliable, a retroanalysis of the excavation of the Mine Caraiba S/A surveys was carried out, determining the *overbreak* and *underbreak* indices, the quality of the excavations and correlations between the loading rate and the evidence were investigated.

Keywords: Excavation, *Overbreak*, *Underbreak*, Excavation Quality.

INTRODUÇÃO

Em empresas de mineração o monitoramento de escavações é uma ferramenta fundamental para avaliar o desempenho das operações e dar subsídios às equipes de planejamento no sequenciamento da lavra. Este monitoramento, normalmente, consiste na comparação do *layout* da escavação realizada com a escavação de projeto. As seções utilizadas são obtidas através de levantamentos topográficos da região escavada e os dados posteriormente tratados em *softwares* apropriados. O processo de monitoramento de galerias de desenvolvimento, em particular, é de fundamental importância para analisar o desempenho das operações e a manutenção do planejamento de lavra. Além disso, é importante para avaliar economicamente e planejar as operações mineiras. Um monitoramento bem executado permite o acompanhamento da evolução das escavações e a identificar eventuais causas de anomalias.

As atividades que envolvem as escavações em rochas compreendem inicialmente as operações de perfuração e desmonte. A perfuração da rocha é a primeira operação do ciclo de lavra e tem como finalidade abrir os furos com uma distribuição e geometria adequada dentro dos maciços para alojar os explosivos e iniciar os desmontes. Essas operações devem ser sempre aprimoradas ao longo da vida da mina, com o intuito de aperfeiçoar e reduzir os custos oriundos dessas operações, permitindo um maior controle das escavações.

Diversos trabalhos na literatura sugerem diferentes formas de avaliar o desempenho da etapa de escavação em rocha. Os indicadores chaves de performance (KPI – *Key Performance Index*) mais comuns são o *overbreak* e *underbreak*, no entanto, há na literatura diferentes formas e metodologia para a determinação desses indicadores [1 – 5].

De forma simplificada o *overbreak* pode ser definido como um fenômeno de ruptura excessiva de um maciço rochoso. Enquanto o *underbreak* é um fenômeno que ocorre quando a ruptura do maciço é incompleta. Na Mineração Caraíba S/A (MCSA) o *overbreak* é calculado pela subtração entre a área real da escavação escaneada pela área planejada enquanto que o *underbreak* não é calculado. Entende-se, na empresa, que o *underbreak* ocorre quando a área real da escavação escaneada é menor que área planejada.

As escavações da MCSA atualmente apresentam uma alta variação de sobre-escavação e sob-escavação, que são conjuntamente denominadas de “*overbreak*”. Essa prática inviabiliza a identificação ou mascara as reais causas do *overbreak*, compensando as áreas de *underbreak* presentes na escavação. Por esse motivo foi identificado a oportunidade de readequar as condições desse controle, destrinchando as variáveis envolvidas com o intuito de descortinar as escavações nos níveis de desenvolvimento.

No presente trabalho foi realizado, portanto, a reavaliação das seções escaneadas das galerias do desenvolvimento da MCSA separando os tipos de seções e quantificando os índices de *overbreak* e *underbreak*. Com base nos dados disponíveis foi possível implementar um índice de controle de qualidade das seções e avaliar a existência de correlações entre esses índices e a razão de carga, que é um reconhecido fator influente nos índices de *overbreak* e *underbreak*.

ASPECTOS TEÓRICOS

O *overbreak* é definido como um trecho de rocha removida além do necessário considerando o projeto de uma escavação, enquanto que o *underbreak* é a porção de rocha indesejável que restou durante o processo de escavação [1]. As escavações em rocha por detonação, inevitavelmente resultam em deformações não previstas segundo o plano inicial. Um exemplo clássico de *overbreak* é mostrado na Figura 1. *Overbreak* e *underbreak* são

ambos indesejáveis, por demandar altos custos e tempo para reparo. A ocorrência do *overbreak* requer métodos de preenchimento nos espaços vazios enquanto que o *underbreak* precisa ser removido com esforços mecânicos ou detonações auxiliares. Além disso, o *overbreak* é geralmente acompanhado por danos na rocha por altas tensões no maciço. As escavações que não são devidamente tratadas por conta do *overbreak* e *underbreak* resultam em galerias com perfis longitudinais irregulares, resultando em maior resistência ao fluxo ar, prejudicando a ventilação da mina [2 - 4]

Overbreak e *underbreak* são causados por condições geológicas ou fatores de detonação, perfuração ou uma combinação deles. Os fatores pertinentes que causam a sobre-escavação e a sub-escavação são diversos, entre eles se destacam os fatores geológicos que influenciam o rompimento do maciço rochoso, a orientação do corpo do minério, a razão de carga, o tamanho do bloco, alterações geológicas e tensões *in-situ*. A força da rocha sob algumas circunstâncias pode ser um fator significativo. As altas velocidades de detonações, altas densidades explosivas, alta resistência ao peso do maciço e os grandes diâmetros dos furos carregados com explosivos levam ao aumento da quebra de rochas e danos no maciço [5 - 8].

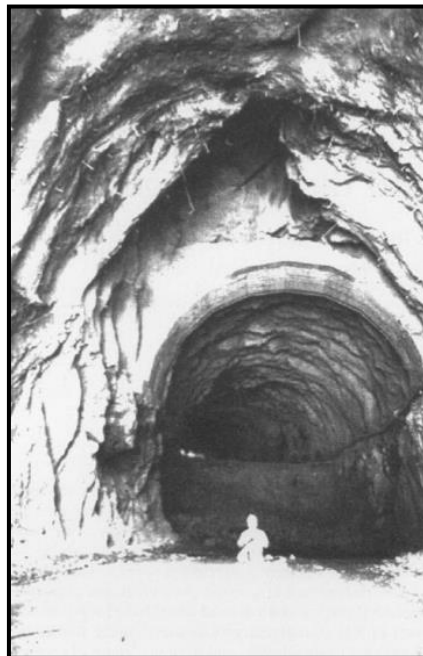


Figura 1: Efeitos de uma detonação em uma galeria. Fonte: [3].

De acordo com [9] encontrado em [3], o desvio de perfuração pode ser considerado como um dos principais responsáveis para a ocorrência do *overbreak* e *underbreak*. Existem dois tipos de desvio de perfuração: ao iniciar a perfuração, no momento do emboque e durante o processo de perfuração. O desvio no momento do emboque acontece por conta do posicionamento incorreto da broca no início da perfuração, é causada por descuido, ou a técnica de marcação inadequada, ou irregularidades locais sobre a superfície da rocha. De acordo com [10] encontrado em [3], na perfuração dos furos de contornos há uma necessidade de inclinação para que não ocorra o estreitamento da galeria conforme os avanços da mesma, os descuidos com a perfuração no contorno da galeria principalmente com o não uso do inclinômetro (que ajuda a garantir o ângulo ideal para a perfuração) causam *overbreak* quando apresenta uma malha de perfuração mais espaçada e *underbreak* uma malha menos espaçada.

Normalmente, fatores de detonação e perfuração podem ser ajustados para reduzir o índice de *overbreak*, embora a sua redução provoque aumento da incidência de *underbreak* e vice versa. As condições geológicas não podem ser alteradas, mas o método de escavações, tamanho da galeria, forma ou alinhamento da escavação podem ser ajustados para

melhorar o perfil da galeria. Medições rápidas, simples, confiáveis e de baixo custo de *overbreak* e *underbreak* são necessárias para avaliação adequada da escavação pelo método de perfuração e detonação. Problemas que causam danos nas rochas podem ser identificados e remediados enquanto o trabalho ainda está em andamento [3].

Para o desenvolvimento das galerias é necessário o processo de detonação com o uso do explosivo confinado nos furos perfurados em rocha. A aplicação repentina destas cargas produz impulsos de tensão compressiva na superfície interna do furo (rocha), provocando danos na zona circundante da abertura subterrânea. As dimensões dos danos dessa zona dependem do tamanho da carga explosiva detonada, resistência à força dinâmica das rochas, da velocidade de propagação da onda, e as velocidades da vibração transmitidas à rocha. Quando uma carga explosiva detona dentro dum furo podem distinguir-se danos de diversos tipos e dimensões, na zona circundante: 1) Zona de rocha triturada; 2) Zona de fraturas radiais; 3) Zona de expansão das fraturas; e 4) Zona elástica, onde não se forma nenhuma fratura. Os danos que podem ocorrer na rocha verificam-se antes da zona elástica conforme a Figura 2 [11].

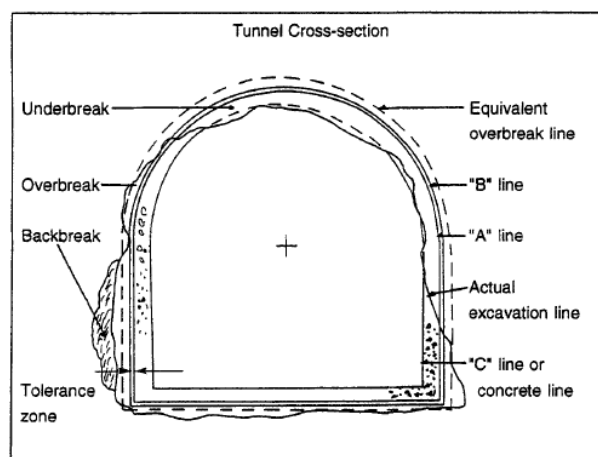


Figura 2: Efeitos de uma detonação em uma galeria. Fonte: [11].

A zona de trituração e fraturamento denominam-se como EDZ (Zona de Escavação Danificada) que se apresenta sob duas formas: sobre-escavação ("*overbreak*") e sub-escavação ("*underbreak*") chamada também de DOW (Danos nas Paredes de Abertura) na Figura 3, que é a danificação de certa espessura de rocha circundante à abertura ocasionada pela ação explosiva. Os fatores que influenciam o valor de EDZ podem convenientemente ser agrupados em duas categorias: características do maciço rochoso, fatores geológicos e do explosivo, fatores de desmonte de rochas [11].

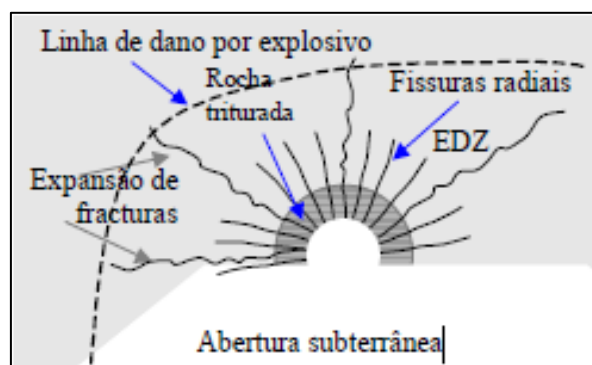


Figura 3: Efeitos de uma detonação em uma galeria. Fonte: [11].

De acordo com [12] encontrado em [13], as escavações em rocha, seja em aplicações de superfície ou subterrânea, provocam equivalentes ou maiores consequências nas discontinuidades que na rocha intacta. Assim sendo, a classificação do maciço rochoso

para aplicações de engenharia não se baseia somente em testes de laboratório, mas também em características estruturais e no ambiente o qual o objeto de estudo está disposto. Segundo [14] a presença de uma família principal de descontinuidade ou de várias, não necessariamente implica que o maciço rochoso irá se comportar como meio descontínuo. Em ambiente de mineração, no qual as rochas encaixantes são submetidas a elevados esforços compressivos, é razoável considerar o maciço rochoso como um meio elástico contínuo equivalente [14].

Levantamento topográfico de galerias

O levantamento e mapeamento das escavações são cruciais para as inspeções de rotina do desenvolvimento operacional. A maioria dos equipamentos de mapeamento se concentra nas informações geométricas das escavações extraíndo os dados com varredura a laser. Existem dois tipos de aplicações amplamente discutidas na literatura: medição de deformação e extração de características. A medição tradicional de deformação em um ambiente subterrâneo é realizada com uma série de pontos de controle permanentes instalados ao redor do perfil de uma escavação. O uso da varredura a laser para análise de deformação oferece muitos benefícios em comparação com as técnicas tradicionais de monitoramento. A mudança de perfil pode ser totalmente caracterizada e as áreas com anomalias podem ser facilmente separadas das tendências gerais devido à alta densidade dos dados da nuvem de pontos. Além disso, o monitoramento com um *scanner* a laser não requer a instalação permanente de pontos de controle, como acontece na estação total, portanto o monitoramento pode ser concluído mais rapidamente após a escavação. A principal desvantagem de usar o escaneamento a laser para o monitoramento de deformação é a espessura da nuvem de pontos, que em algumas regiões são mais grossas e dificulta o operador a obtenção da seção mais representativa [15].

Para avaliar a estrutura de uma escavação e calcular o *overbreak* e *underbreak*, levantam-se as seções transversais da adutora, durante o período de sua construção. Para gerar essas seções podem ser utilizados diversos métodos de levantamento de dados, resumidos nas Tabelas 1, adaptadas de [16]. A Tabela 1 demonstra os métodos em manuais e automáticos, em função da automação dos equipamentos. Na primeira coluna indicam-se os equipamentos necessários e na segunda, os prós e os contras de cada método que são utilizados para o levantamento da planta, do perfil e para a extração de seções transversais ao longo de seu eixo [17].

Tabela 1: Métodos manuais utilizados em levantamentos subterrâneos. Fonte: [17]

| Equipamentos | Prós e Contras |
|-------------------|--|
| Estação Total | Pró: alta precisão, a coleta de dados e o processamento podem ser feitos em campo. |
| | Contra: grande número de demoradas observações, acarretando um tempo grande para a coleta de dados. |
| Taqueômetro laser | Pró: rápido e fácil de utilizar, precisão aceitável para muitas aplicações e com baixo custo. |
| | Contra: operação e gravação manual, restrito em função de não poder utilizar laser mais potente em função da segurança. |
| Laser Scanner 3D | Pró: alta precisão, rápida taxa de gravação, coleta informações de todo o objeto, não apenas de seções isoladas. |
| | Contra: equipamento caro, operador altamente qualificado, deve-se trabalhar com uma estação total (alguns equipamentos). |

Com a finalidade de garantir a segurança, a estabilidade em longo prazo e o controle de qualidade em operações modernas de escavação em galerias, é necessária a obtenção de informações geotécnicas sobre as condições das rochas e as informações detalhadas dos

suportes que serão utilizados. O tempo curto entre as detonações e os levantamentos de galerias torna a disseminação dos dados algo desafiador [15].

O planejamento da mina da Caraíba Mineração S/A utiliza várias técnicas dentre as quais uma retroanálise das galerias de desenvolvimento com base nos levantamentos topográficos com o uso dos *scanners* a laser I-Site, VS ou pontos topográficos gerados por Estação Total durante o desenvolvimento das frentes de cada mês. Esses aparelhos fazem levantamentos através da coleta de pontos de coordenadas x, y e z, gerando nuvens de pontos que são utilizadas para interpretação do desenho (seção) no *software* Topograph que em seguida é usado para a determinação das áreas no *software* Datamine.

Determinação do *overbreak* e *underbreak*

De acordo com o encontrado em [18] citado em [19], a sobre-escavação (*overbreak*) é representado pela subtração entre o volume real da escavação levantada subtraído pelo volume ideal a se escavar exemplificada na equação (1) e na Figura 4:

$$\text{Overbreak} = (\text{Volume executado escaneado}) - (\text{Volume programado}) \quad (1)$$

$$\text{Overbreak} = (1+2+5) - (2+3+4) = (1+3+4+5)$$

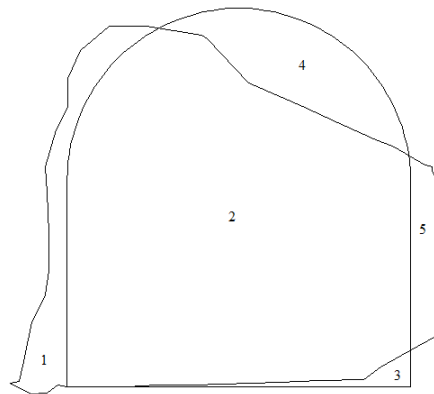


Figura 41: Representação esquemática do *overbreak* e *underbreak*. Adaptado de [18] citado em [19].

Diferente da proposição enunciada por [18] encontrada em [19], [3] define o *overbreak* e *underbreak* conforme as equações abaixo, cuja representação geométrica, baseada no diagrama de Venn, é apresentada na Figura 5:

$$\text{Overbreak} (O) = (R - P) \cap X \quad (2)$$

$$\text{Underbreak} (U) = (X \cup P) - (X \cap P) - O \quad (3)$$

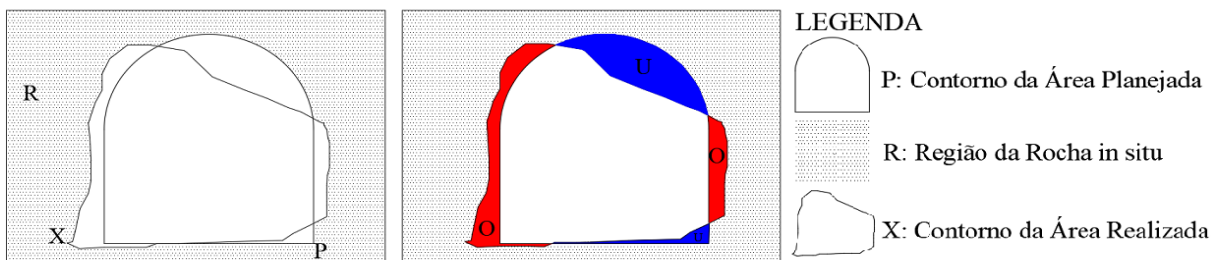


Figura 5: Representação esquemática do cálculo de *overbreak* e *underbreak*, (R) região da rocha *in situ*. (U) *underbreak*. (O) *overbreak*. Adaptado de [3].

A metodologia proposta no presente trabalho se baseia na definição de [3], em que consiste na utilização de um *script* exclusivo no *software* Datamine, que contém as equações (2) e (3), para obter as áreas de *overbreak* e *underbreak*.

MATERIAS E MÉTODOS

Considerações do processo

O presente trabalho foi iniciado com o levantamento em campo do *layout* das escavações executadas nas galerias de desenvolvimento no período de um ano, doze meses. A Figura 6 apresenta trechos de galerias da mina subterrânea da Mineração Caraíba S/A levantadas através dos diferentes métodos.

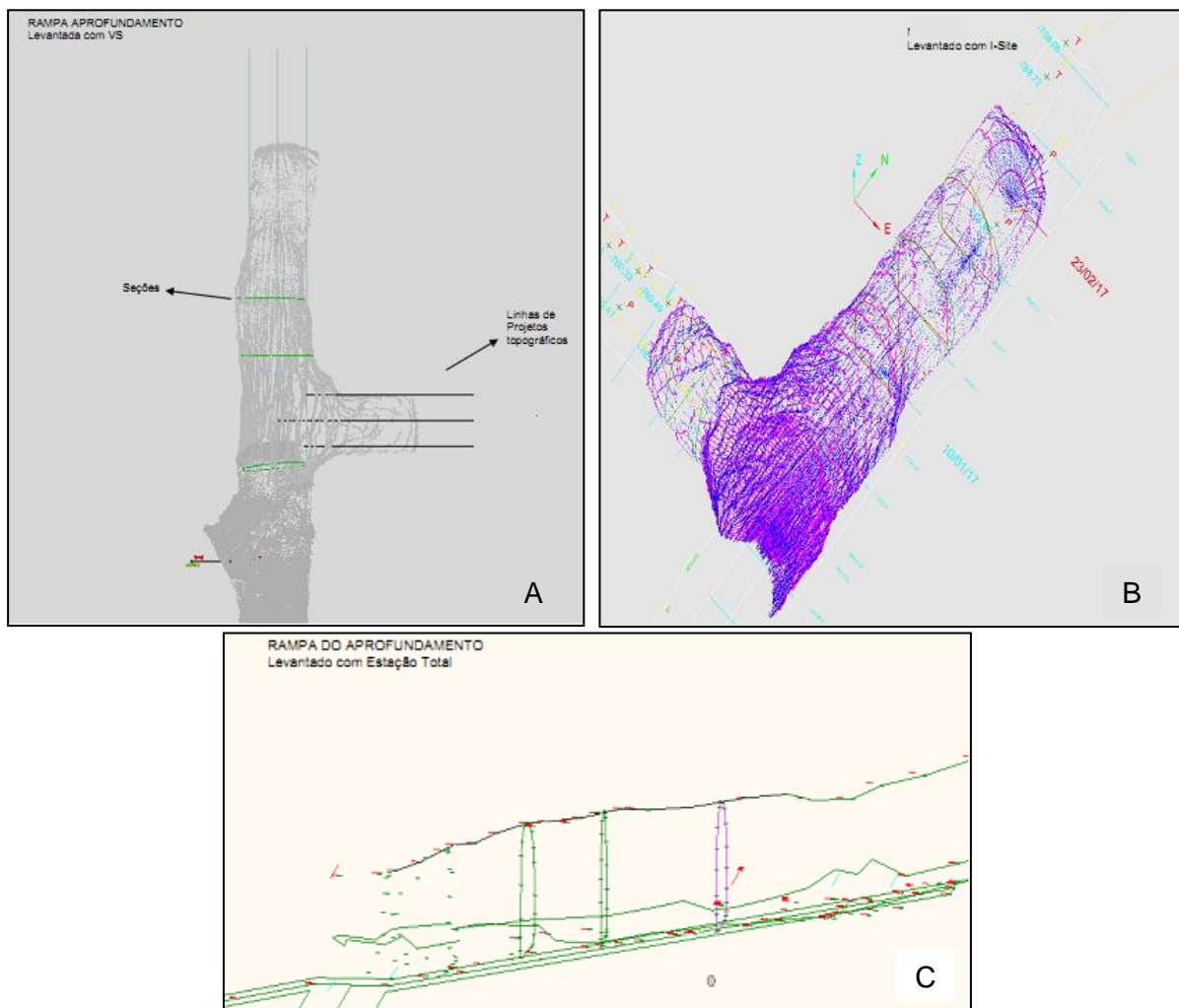


Figura 6: Levantamentos topográficos de galerias da mina subterrânea da MCSA. A) Levantamento topográfico de rampa de aprofundamento realizado com o *scanner* a laser VS; B) Levantamento topográfico de galeria realizado com o *scanner* a laser I-Site; C) Levantamento topográfico de rampa de aprofundamento realizado com Estação Total.

A partir dos dados levantados, arquivos na extensão *.dxf* foram preparados no Topograph e inicialmente tratados nesse *software*. Posteriormente o arquivo gerado no Topograph foi exportado e tratado no Datamine Studio 3.0. Os dois tipos de seções das escavações adotados pela Mineração Caraíba S/A foram estipulados levando em consideração o tamanho dos equipamentos que transitam nas galerias. Nas seções de 5,0 x 5,5 m, que normalmente são seções destinadas às galerias de transporte de minério, rampas e desvio

de galerias, existe o transporte de todos os equipamentos da mina subterrânea. O equipamento mais alto (Figura 7A) demonstra a necessidade das dimensões desse tipo de galeria, respeitando sempre o diâmetro do duto de ventilação e o espaço de folga para os tipos de seções padrões. As seções 4,5 x 4,8 m normalmente são destinadas às galerias de acesso, travessas e galerias de ventilação. Nessas galerias os equipamentos corriqueiros são os de perfuração de lavra e desenvolvimento e a carregadeira (Figura 7B).

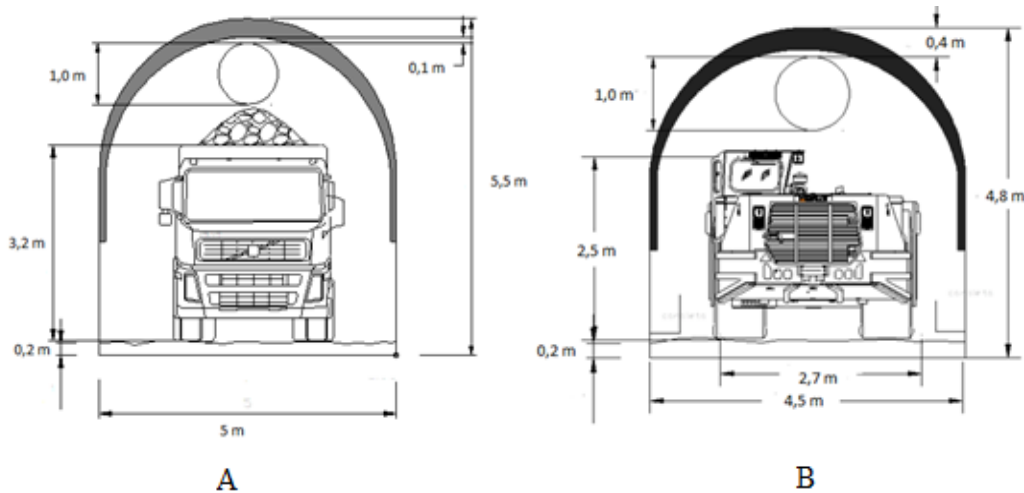


Figura 7: (A) Dimensões do caminhão Volvo na maior seção atual. (B) Dimensões da carregadeira na menor seção atual. Fonte: MCSA.

A distância entre as seções levantadas das frentes de desenvolvimento ocorre em torno de 5 m, para que haja aleatoriedade entre seções com *overbreak* e *underbreak*. A quantidade de seções que representam o desenvolvimento realizado do mês é a divisão do desenvolvimento realizado mensal por 5. As medições de *overbreak* são individuais em cada mês, ou seja, a seção de determinado mês não conta para o mês seguinte. Regiões de *slash*, emboques ou curva foram desconsideradas exceto quando o levantamento ocorreu antes de iniciarem a perfuração que resultam essas regiões. A Figura 8 ilustra as seções posicionadas imediatamente a frente das regiões mencionadas e mais próximo possível da seção anterior. O *overbreak* e *underbreak* de cada frente são determinados pela média das seções levantadas, assim como o *overbreak* e *underbreak* mensal são obtidos pela média das frentes.

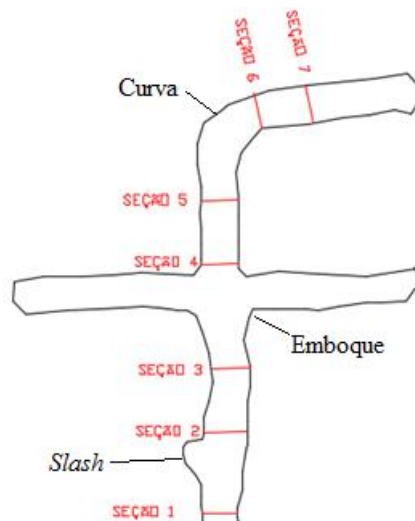


Figura 8: Galeria com posicionamento adequado das seções e os posicionamentos correto levando em conta regiões proibidas para alocar seções da MCSA.

Determinação da qualidade das seções

Na tentativa de avaliar a qualidade das escavações foi elaborada uma proposta para estimativa da área máxima, média e mínima das seções, a fim de demonstrar as dimensões das seções escavadas baseada na no trabalho de Calazans (2017) [20]. Para exemplificar a qualidade das escavações criou-se uma maneira no software Datamine de demonstrar à máxima, média e mínima seções realizadas no desenvolvimento. O objetivo dessa análise pressupõe expor as regiões predominantes do *overbreak* e *underbreak* quando se desenvolve nas galerias da mina subterrânea da Mineração Caraíba S/A.

Todas as seções foram separadas pelo tamanho das seções planejadas (5,0 × 5,5 m e 4,5 × 4,8 m) e agrupadas no mesmo plano. No software Datamine as seções foram unidas pelo centróide. Na sequência as seções foram seccionadas em ângulos de 24°, totalizando 8 planos e 16 fatias, conforme a Figura 9.

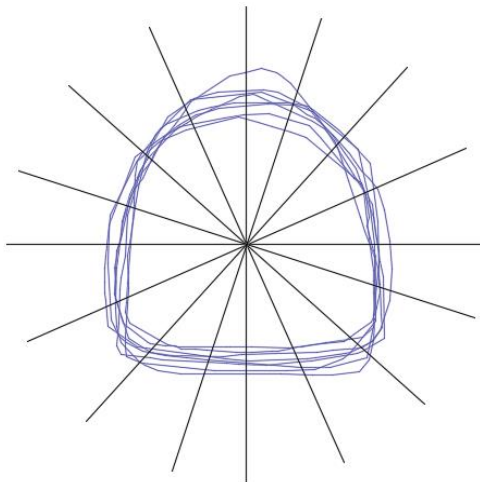


Figura 9: Seções fatiadas pelo centróide.

Para determinar a seções máximas e mínimas criaram-se pontos de interseção das linhas dos planos com os conjuntos de seções, conforme a Figura 10. O ponto superior e inferior de todas as seções do plano define a escavação máxima e mínima realizada, enquanto a seção média foi definida a partir dos pontos médios de cada um dos 8 planos. Todos os pontos foram importados para o arquivo CSV DATA e usados para o calculo das médias dos 8 planos, definindo assim a seção média.

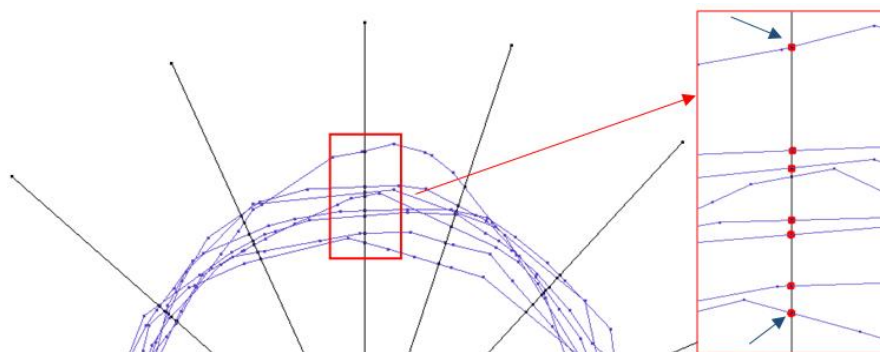


Figura 10: Pontos de interseção dos planos com as seções.

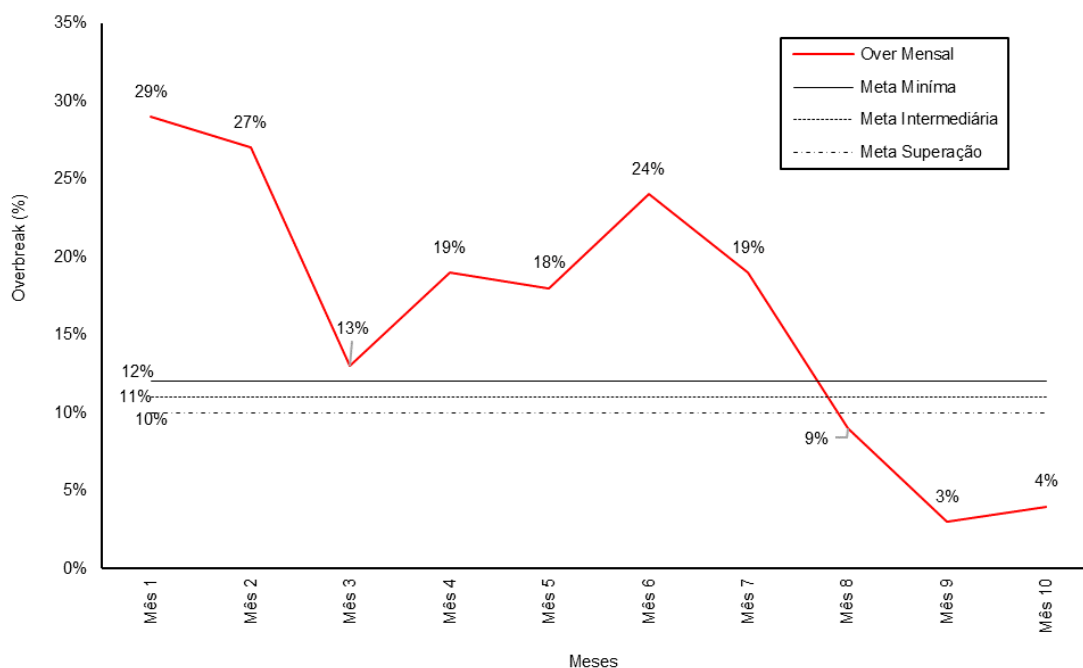
RESULTADOS E DISCUSSÕES

A determinação do *overbreak*, conforme padrão da Mineração Caraíba S/A (MCSA) segue a estimativa de *overbreak* conforme definido por [18] e encontrado em [19] usando o *software*

Topograph. A Figura 11 mostra o gráfico com o comportamento do *overbreak* mensal durante o período de realização do presente trabalho e os limites de metas estabelecidos pela MCSA. As tolerâncias das médias de *overbreak* foram determinadas pela Empresa em 12% para meta mínima, 11% meta média e 10% meta de superação. As seções que constituíram a média do *overbreak* do mês 1 foram coletadas nos meses três meses anteriores, devido aos dois primeiros meses ano apresentarem poucos levantamentos topográficos em decorrência do baixo desenvolvimento de galerias realizados. As áreas correspondentes as seções 5,0 x 5,5 m e 4,5 x 4,8 m são 24,663 m² e 19,297 m² respectivamente.

O gráfico da Figura 11 mostra que nos meses de 1 e 2 foram registradas as maiores ocorrências de *overbreak*. No mês 3 foram feitos testes de implantação da técnica de desmonte escultural, o que resultou em médias menores de *overbreak* na maioria das galerias desse mês. Entre os meses de 4 a 7 ocorreram mais testes referentes a carregamento com explosivos, onde os resultados não foram satisfatórios. No mês 6, em especial, além da realização de testes para o ajuste do plano de fogo, as escavações foram realizadas em regiões próximas a galerias antigas, com elevadas tensões. A movimentação extra de massa em decorrência do *overbreak* resultou, neste mês, o aumento de custos relacionados a transporte de material. Nos meses 8 a 10 ocorreram decaimentos bruscos da média do *overbreak*, por conta da mudança da malha de perfuração, tornando-a menor. Essa prática foi uma forma rápida de minimizar a geração *overbreak*.

Figura 11: Gráfico de controle do *overbreak* de galerias de desenvolvimento da MCSA



Diante da proposta de modificação do controle dos índices de *overbreak* e *underbreak*, utilizou-se o *software* Datamine Studio 3.0 seguindo as equações 2 e 3 propostas por [3]. As áreas correspondentes as seções 5,0 x 5,5 m e 4,5 x 4,8 m são 24,818 m² e 19,427 m² respectivamente. A Figura 12 retrata as áreas do *overbreak* e *underbreak* da seção da galeria da rampa principal no mês 6.

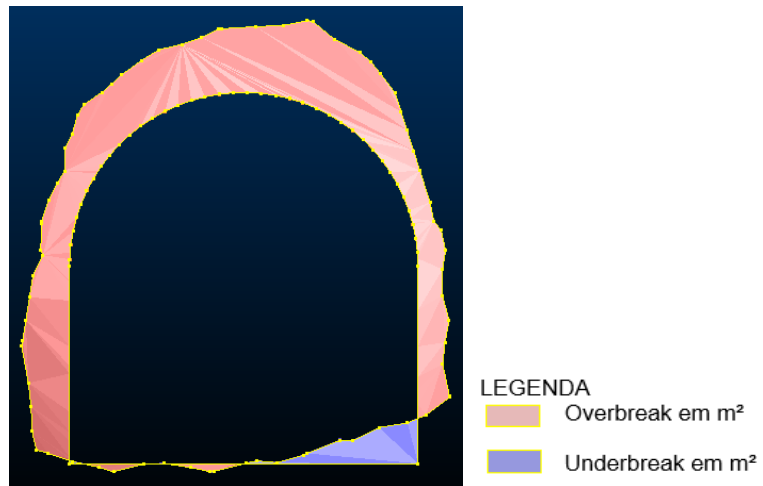


Figura 12: Galeria da rampa principal no mês 6 da MCSA. Área de *overbreak* em rosa e área do *underbreak* em azul.

Os dados referentes às áreas foram adicionados a uma nova planilha com os dados. A Figura 13 e a Tabela 2 apresentam um exemplo do cálculo do *overbreak* e *underbreak* de uma galeria de acesso a qual tinha previsão de área de seção planejada de 19,4 m² tendo sido realizada 20,7 m².

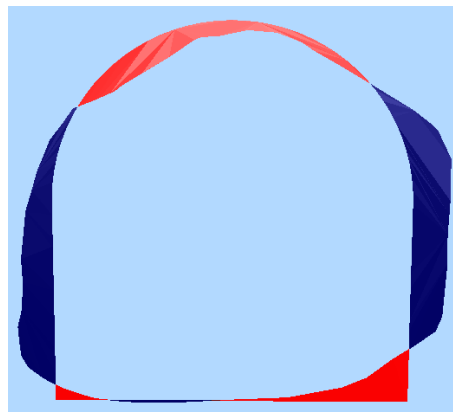


Figura 132: Galeria de acesso da MCSA. Área de *overbreak* em azul e área do *underbreak* em vermelho.

Tabela 2: Dados da seção 1 da galeria de acesso (seção 4,5 x 4,8 m).

| | Área (m ²) | (%) |
|-------------------|------------------------|-------|
| <i>Overbreak</i> | 2,43 | 12,51 |
| <i>Underbreak</i> | 1,55 | 5,92 |

A Figura 14 mostra o gráfico com o comportamento do *overbreak* mensal e *underbreak* durante o segundo semestre do ano. É possível observar que a média do *overbreak* aumentou devido a não compensação da área de *underbreak* como ocorria anteriormente.

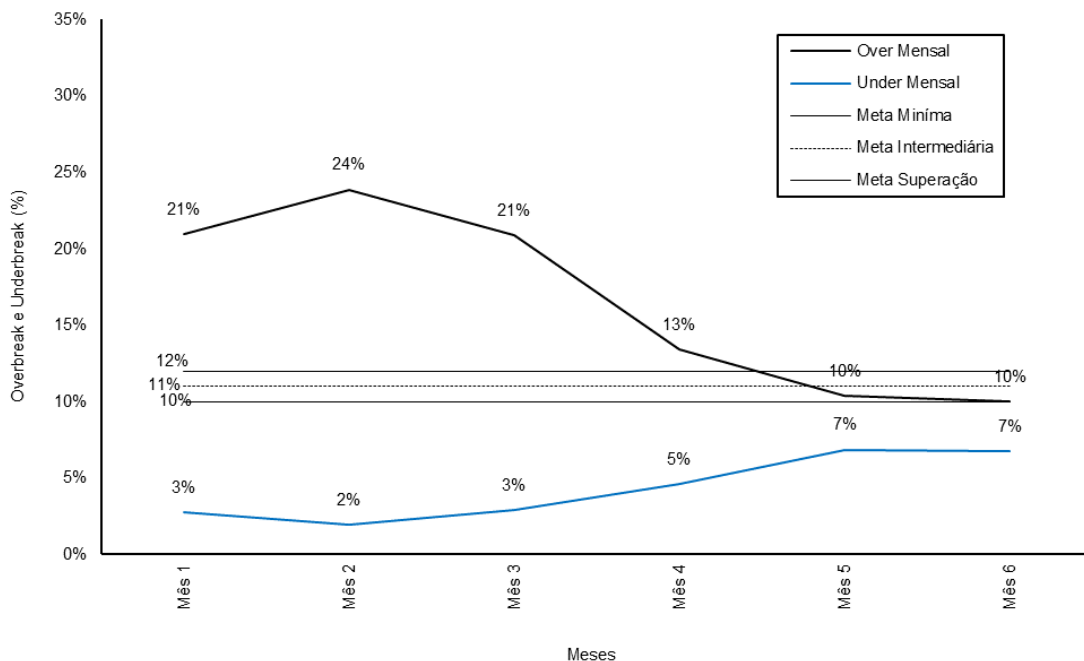


Figura 14: Gráfico do novo controle do *overbreak* de galerias de desenvolvimento da MCSA.

A Figura 15 faz a comparação entre as metodologias a fim de demonstrar o comportamento dos índices. Pode-se observar que a curva do *overbreak* antes se disfarçava por conta do *underbreak*. O mês 5 segundo a antiga metodologia foi o mês que conseguiu obter a menor média do *overbreak* no ano considerado, mascarando a realidade ocorrida na escavação. A maior média de *underbreak* ocorreu no mês 5 coincidindo com o aumento de 22% nos custos com perfuração e desmonte. De acordo com [3], na tentativa de diminuir o *overbreak* inevitavelmente aumenta-se a incidência de *underbreak* como é observado no gráfico da Figura 14. Entre os meses 4 e 6 a campanha para redução rápida do *overbreak* apresentou esse comportamento.

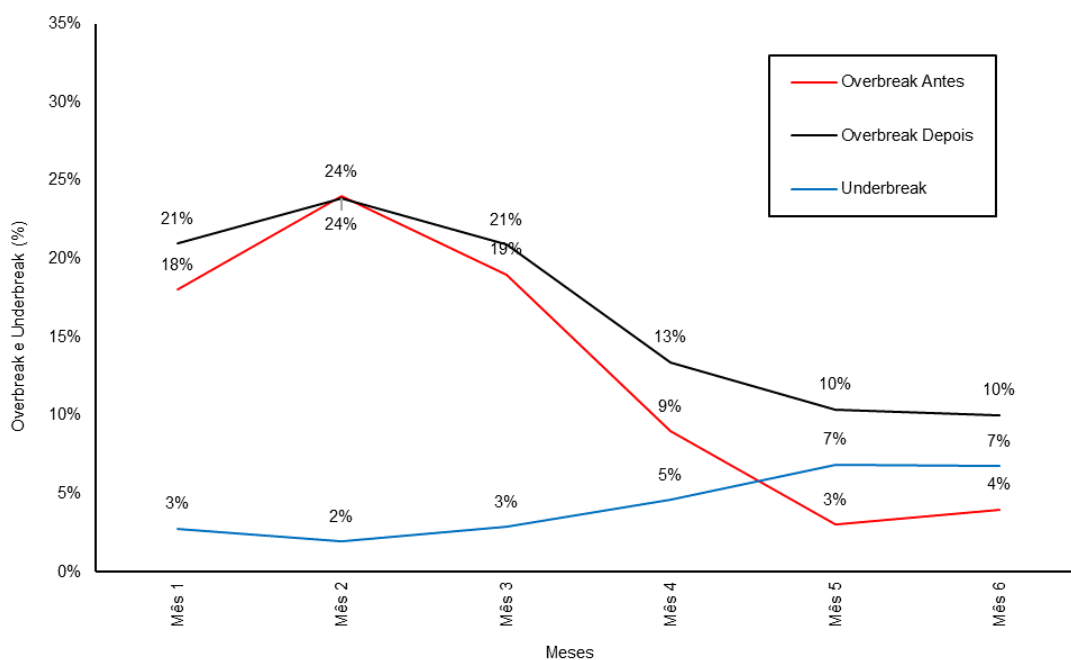


Figura 15: Comparação entre as metodologias antiga e nova na MCSA.

A Figura 16 ilustra a qualidade das seções do mês 5 do gráfico da Figura 15. Pode-se concluir que as seções de 5,0 x 5,5 m tendem a “quebrar” em forma de capelamento. Capelamento são quebras mecânicas em regiões de alta tensão de maciços anisotrópicos.

Nessa região os planos da foliação que são aproximadamente paralelos à sua parede formam finas camadas de rochas que podem ocasionar um mecanismo de ruptura, no qual a rocha tem suas camadas rompidas para dentro da escavação. As regiões da mina subterrânea da MCSA onde estão desenvolvendo com as seções 5,0 x 5,5 m são descritas pela equipe de Geotecnia da Empresa como regiões de capelamento e em sua maioria possui orientação N-S.

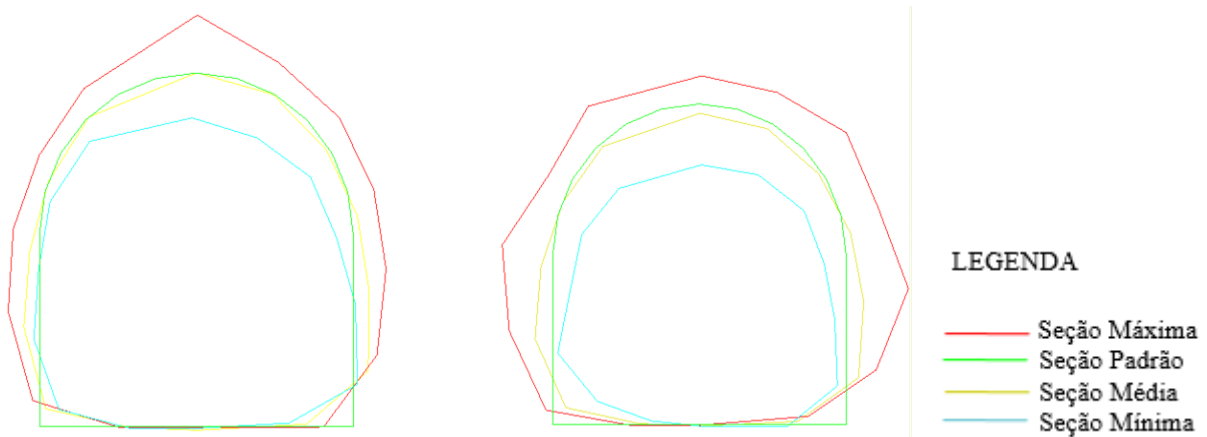


Figura 16: Qualidade das seções da MCSA: a esquerda seção 5,0 x 5,5 m e a direita 4,5 x 4,8 m.

As Figuras 17 e 18 apresentam gráficos de dispersão entre a razão de carga de explosivo usados no desmonte da rocha nas galerias de desenvolvimento e os *overbreak* e *underbreak*. Para a construção desses diagramas foram utilizadas informações de 97 seções executadas nos meses no segundo semestre do ano.

O gráfico da Figura 17 mostra que há uma forte correlação logarítmica entre os valores de *overbreak* e razão de carga. Vários modelos matemáticos foram investigados para explicar a melhor relação entre razão de carga e *overbreak*, no entanto, aquele que apresentou maior coeficiente de regressão foi o modelo logaritmo, $R^2 = 0,80$. De acordo com [21], o coeficiente de determinação (R^2) é uma medida descritiva da proporção da variação de Y que pode ser explicada por variações em X e que quanto mais próximo de 1 estiver o coeficiente de determinação melhor será o grau de explicação da variação de Y em termos da variável X. Assim, de acordo com o gráfico da Figura 16, pode-se constatar que quanto maior a razão de carga maior é o *overbreak*. Essa constatação corrobora o que foi observado por [2, 5 - 7] e postulado por [3, 4 e 8].

A Figura 18 mostra que existe uma relação dispersa entre os valores da razão de carga e o *underbreak* nas galerias de desenvolvimento da MCSA. No entanto, pode-se notar que existe alguma tendência decrescente que relaciona o *underbreak* com o aumento da razão de carga, quando são desconsiderados os pontos com maiores valores de *underbreak* (pontos destacados em vermelho no gráfico da Figura 17). Esse comportamento também foi observado por [2, 5 - 7] e postulado por [3, 4 e 8]. Os pontos que apresentam altos valores de *underbreak* (pontos em vermelho) estão relacionados com galerias que foram desenvolvidas em zonas com grandes blocos de rochas caracterizadas como competentes e a presença de pequenas famílias de descontinuidades. Por essa razão, o resultado dos desmontes resultou na quebra parcial do material na galeria aumentando assim os índices de *underbreak*.

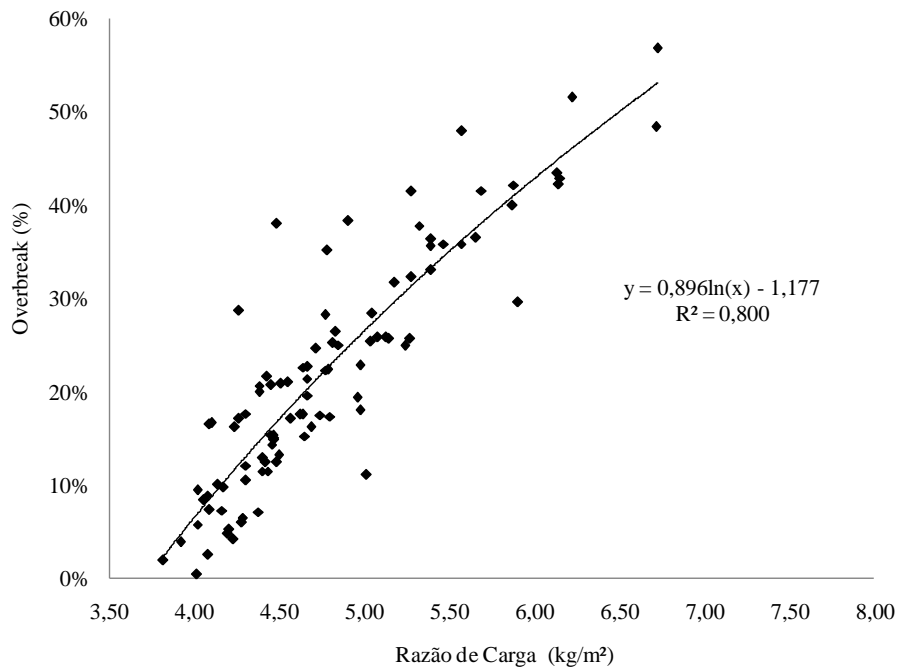


Figura 17: Relação entre o *overbreak* e a razão de carga das galerias de desenvolvimento da MCSA.

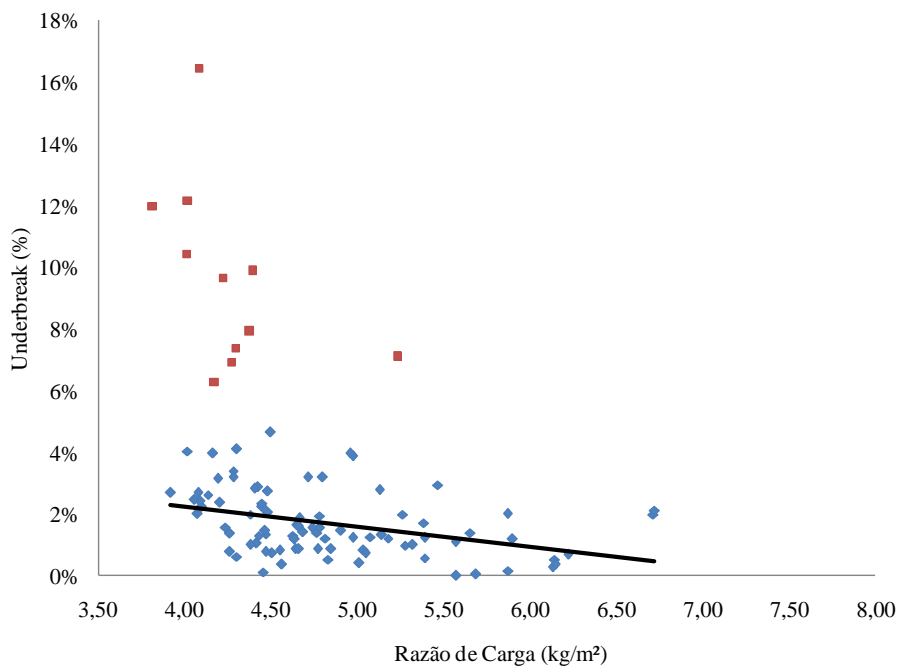


Figura 18: Relação entre o *underbreak* e a razão de carga das galerias de desenvolvimento da MCSA.

A Tabela 3 aponta as galerias com os maiores índices de *underbreak*. As galerias mais superficiais, genericamente chamadas de níveis A e B, estão em zonas de grandes blocos de rochas competentes enquanto os níveis do aprofundamento, genericamente chamados de C, D e E, estão em zonas de baixa qualidade, que são propícias a desvios de perfuração causados pela direção preferencial de fraturamento da rocha.

Tabela 3: Maiores *underbreak* de galerias de desenvolvimento da MCSA no segundo semestre do ano.

| Níveis | Frentes | <i>Underbreak</i> (%) | |
|--------|---------|-----------------------|---------|
| | | Seção 1 | Seção 2 |
| A | GTN-A | 12,13 | 16,44 |
| B | GTN-B | 6,25 | 11,97 |
| B | TRN-B | 7,36 | 7,93 |
| B | TRN-B | 9,63 | |
| C | GAN-C | 6,90 | 9,88 |
| D | GAN-D | 7,10 | |
| E | TRN-E | 10,40 | |

Os resultados apontam que medidas gerenciais podem ser adotadas para viabilizar a distinção entre o *overbreak* e *underbreak* na Mineração Caraíba S/A. A adoção desta estratégia de controle possibilitará uma investigação das reais causas que provocam elevados índices de *overbreak* e *underbreak*. A análise da qualidade das seções descreve, de um modo geral, a máxima, média e mínima seção dos tipos de escavações da Empresa destacando, características geotécnicas, entre certos tipos de seções. O índice razão de carga relacionado com o índice de *overbreak* corrobora uma forte correlação que constata que quanto maior a razão de carga maior é o *overbreak*.

CONCLUSÕES

O controle de escavação em galerias evidencia a execução do trabalho que está sendo executada e o que ela pode causar a mineração em curto, médio e longo prazo. Sendo assim, esse trabalho sugeriu uma forma alternativa para esse controle, detalhando todos os processos que envolvem uma escavação: *overbreak*, *underbreak* e qualidade da escavação. O controle de *overbreak* e *underbreak* de galeria assume papel fundamental de servir como diagnóstico na operação da escavação na mina subterrânea. Os indicadores propostos *overbreak* e *underbreak* são passíveis de avaliação e análise dos diversos setores de uma mina subterrânea (planejamento, operação, geotécnica e geologia) uma vez que as atividades executadas por profissionais desses setores afetam diretamente a qualidade das escavações e podem ser utilizados como Indicador Chave de Performance, permitindo a identificação e correção das influências nos próximos projetos de galerias.

A avaliação do *overbreak* seguindo a metodologia antiga mascara as reais causas das problemáticas que envolvem uma escavação, pois além de omitir a presença do *underbreak* compensa essa área na obtenção do *overbreak*. Com a nova abordagem, separando as áreas referentes ao *overbreak* e *underbreak*, percebe-se um aumento na média de *overbreak* em cada mês. Fica evidente que em alguns meses o esforço para reduzir o *overbreak* diminuindo a malha de perfuração, aumenta o índice de *underbreak*.

Foi constatada uma correlação crescente entre a razão de carga de explosivo e o índice de *overbreak* de tal forma que na medida em que se aumenta a razão de carga aumenta-se a incidência do *overbreak*. Por outro lado, levando em consideração todos os dados disponíveis, foi verificada a ausência de correlação visível e marcante entre a razão de carga e *underbreak*. No entanto, excluindo os maiores valores de *underbreak*, que estavam relacionados a problemas geotécnicos, pode-se perceber uma sensível relação entre a razão de carga e o *underbreak* de tal forma que se aumenta a razão de carga diminui o *underbreak*.

REFERÊNCIAS

- [1] FRANKLIN, J., IBARRA, J., MAERZ, N. (1989). Blast overbreak measurement by light sectioning. *International journal of mining and geological engineering*. v. 6, p. 97-112.
- [2] LANGEFORS U., KIHLESTRÖM B. (1967). *The Modern Technique of Rock Blasting*, Almqvist & Wiksell, Stockholm, 1967.
- [3] MAERZ, N.H., IBARRA, J.A., FRANKLIN, J.A. (1996). Overbreak and underbreak in underground openings Part 1: measurement using the light sectioning method and digital image processing. *Geotechnical and Geological Engineering*. v. 14, p. 307-323.
- [4] VERMA H.K. (2017). Blast induced rock mass damage around tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. India, 149-157 p.
- [5] KUZYK, G.W., LANG, P.A., Le BEL, G. (1986). Blast design and quality control at the second level of atomic energy of Canada's underground research laboratory. *Proceedings of the International Symposium on Large Rock Caverns*. p. 147-58, Helsinki (1986).
- [6] BERTA, G. (1990). *Explosives: An Engineering Tool*. Italesplosivi, Milano, (1990).
- [7] CLARKE, T. A. (1995). Study of blast induced damage. Internal Report. The University of British Columbia, Canadá, 1995.
- [8] GERMAIN, .P., HADJIGEORGIOU, J. (1997). Influence of stope geometry and blasting patterns on recorded overbreak. *Elsevier Science Ltd*. v. 34, n. 3-4, p. 1-12.
- [9] THOMPSON, D.E., KOWN, M.A.F., FOURNEY, W.L., SPERRY, P.E. (1979). Field Evaluation of Fracture Control in Tunnel Blasting. Report 100-79-14, US Department of Transportation, Washington, DC, 1979.
- [10] OLOFSSON, S.O. (1988). Applied Explosives Technology for Construction and Mining. *APPLEX*. p. 131-60. Sweden, 1988.
- [11] TORRES, V.F.N; GAMA, C. (2005). *Engenharia Ambiental Subterrânea e Aplicações*. Editora Fatima Engel. Rio de Janeiro, 2005.
- [12] GOODMAN, E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. p.13, New York, 1989.
- [13] PEREIRA, F.B. (2016). *Interpretação do overbreak da rampa fonte grande sul (mina Cuiabá) e sua interação com o sistema de suporte*. Ouro Preto: UFOP. 186 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de pós-graduação em Geotecnia da UFOP, Escola de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.
- [14] BRADY, B.H., BROWN, E.T. (2004). *Rock mechanics for underground mining*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004.
- [15] WEIXING WANG, ZHIWEI WANG, YA HAN, SHUANG LI, XIN ZHANG. (2015) Continuous section extraction and over-underbreak detection of tunnel based on 3D laser technology and image. *Proc. SPIE 9393, Three-Dimensional Image Processing, Measurement (3DIPM), and Applications 2015*. v. 9393, 1-10 p. Estados Unidos, (2015).
- [16] CLARKE, T. (1996). A Review of Tunnel Profiling Methods. *International Review Paper*.

[17] CINTRA, J.P. (2017). Topografia de túneis com laser scanner terrestre: estudo de caso. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 23, n.1, p. 115-133, Curitiba: Universidade Federal do Paraná, (2017).

[18] SPATHIS, A.T. (2012). Tunnelling in rock by drilling e blasting. Workshop hosted by fragblast 10 — the 10th international symposium on rock fragmentation by blasting, New Delhi, India. Editora Taylor & Francis Group v.1, p.83-85.

[19] ZDAZINSKY, C. (2015). Effect of electronic detonators in underground tunneling application. *The Journal of Explosives Engineering*, v.32, p.28-35.

[20] CALAZANS, P. (2017). Análise de seção de desenvolvimento primário da Mina Lamego da Anglo Gold Ashanti. ENCONTRO PLANEJAMENTO DE MINA SUBTERRÂNEA 2017. Sabará-Minas Gerais, 2017.

[21] KUTNER, M.H., NACHTSHEIM, C.J., NETER, J., LI, W. (2005). *Applied Linear Statistical Models*. McGraw-Hill Irwin, ed. 5, 2005.