



## **MONITORAMENTO DE DESMONTE DE ROCHAS: IMPACTO DO DESLOCAMENTO DE MATERIAL NO CONTROLE DE TEOR**

**Marcell Silveira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Blast Movement Technologies, part of Hexagon.  
Av. Andrés Bello 2777 Office 2002, Las Condes, Santiago, Chile. E-mail:  
marcell.silveira@hexagon.com

**Pedro Gonçalves<sup>2</sup>**

<sup>2</sup> Blast Movement Technologies, part of Hexagon.  
Av. Raja Gabaglia 959, Cidade Jardim, Belo Horizonte, Brasil. E-mail:  
pedro.goncalves@hexagon.com

### **RESUMO:**

O Desmonte de Rochas é um processo crítico para a maior parte das minas a céu aberto. Embora importante no controle de teor, o desmonte de rochas e, conseqüentemente, o deslocamento espacial do material desmontado é, frequentemente, negligenciado nos planejamentos de lavra de curto prazo. Isso ocorre, principalmente, devido à dificuldade de obtenção dos dados relacionados ao plano de fogo e a complexidade da dinâmica de deslocamento do material desmontado. Este estudo sumariza a aplicação comercial de uma tecnologia de monitoramento do deslocamento no desmonte de rochas. Os principais parâmetros relacionados à dinâmica do deslocamento espacial nas diferentes regiões de uma malha são também investigados.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Desmonte de Rochas; Dinâmica de Deslocamento; Controle de Teor.

### **ABSTRACT:**

Rock blasting is a critical process for most open pit mines, especially those in which the ore is associated with hard rock. Although essential for optimal grade control, the movement of the post-blast material is often neglected in short-term mine planning. This is mainly due to the difficulty of measurement and lack of data concerning the blasting, furthermore, the understanding of movement dynamics is quite complex. This study summarizes commercial application of a technology for monitoring the movement in the dismantling of rocks. The main parameters related to the dynamics of movement in the different regions of a blast are also investigated.

### **KEYWORDS:**

Rock Blasting; Blast Movement Dynamics; Grade Control

## INTRODUÇÃO

Os geólogos de mina, suportados por uma grande quantidade de dados obtidos desde as fases de exploração do depósito, dependem tempo com a modelagem da distribuição das mineralizações ao longo de todo o maciço rochoso. Os investimentos nas etapas de perfuração, análise e controle de qualidade (QA/QC) são realizados para que uma maior quantidade de dados reais em uma malha seja interpolada com a aplicação das mais sofisticadas técnicas da Geoestatística. Posteriormente, esses dados são inseridos em um modelo de blocos desenhado para os corpos de minério presentes no depósito. Esse modelo deve refletir de forma razoavelmente precisa a presença dos minerais que de fato se encontram no maciço rochoso. Após todo esse procedimento, os engenheiros de minas, trabalham com a mesma diligência para desmontar o maciço rochoso *in situ* em fragmentos menores que possam ser transportados da mina até a usina de beneficiamento [1].

Nas minas a céu aberto, principalmente quando o minério está associado a rochas hospedeiras competentes, esse processo requer energia explosiva para fragmentar a rocha em uma granulometria que seja adequada aos equipamentos de carregamento e transporte.

O impacto do desmonte de rochas na qualidade da fragmentação, vibração, ruído entre outros aspectos principalmente relacionados à segurança da operação já são compreendidos. Entretanto, essa atividade também tem um impacto significativo no controle de teor. O desmonte de rochas invariavelmente acarreta o deslocamento dos maciços rochosos e pode ser prejudicial para uma definição precisa das liberações de minério e os contatos minério-estéril que foram definidos anteriormente. O deslocamento da pilha desmontada e a dinâmica no desmonte em geral não são bem compreendidos na mineração [2].

Se o deslocamento ocasionado pelo Desmonte de Rochas não for levado em conta pela equipe de planejamento da lavra, haverá consequências para todo o trabalho de controle de qualidade do minério, seja com a classificação de um material de baixo teor que se deslocou para uma faixa de alto teor, um minério rico em sulfetos sendo classificado como rico em óxidos, ou mesmo um material estéril sendo classificado como minério; coletivamente utilizam-se os termos perda e diluição de minério.

Esses eventos podem ser minimizados e aumentos significativos nos lucros em cada plano de fogo podem ser alcançados se o deslocamento e a dinâmica do deslocamento forem levados em conta com exatidão. Um conhecimento mais sólido acerca da dinâmica do deslocamento também permite a otimização do design do plano de fogo utilizado, por exemplo quanto ao tipo de amarração ideal a ser utilizado.

Este artigo discute a dinâmica do deslocamento no desmonte de rochas e as tecnologias utilizadas para medir tal deslocamento pós-desmonte. Vários métodos visuais foram investigados para medição do deslocamento da pilha desmontada, incluindo utilização de tubos polímeros, correntes entre outros marcadores, que se mostraram impraticáveis e imprecisos para o controle de teor. Em relação a modelagem desse deslocamento, apesar dos avanços significativos nos últimos anos, pesquisas demonstraram que o deslocamento no desmonte é sempre altamente variável, com a existência de componentes não determinísticos significativos. Consequentemente a modelagem a partir de uma abordagem puramente teórica se mostra imprecisa em um contexto de controle de teor para produção mineral e, portanto, práticas de controle ideal do minério só podem ser alcançadas via medição direta do deslocamento da liberação de minério após cada plano de fogo [3].

Em geral, o objetivo da operação em uma mina consiste em separar eficientemente os diferentes materiais (minério/estéril) provenientes de cada bancada lavrada na cava. Desconsiderar o deslocamento no desmonte de rochas, pode ocasionar em perdas de minério, diluição e classificação errônea de material, representando um gargalo para a operação em minas com corpos de minério associados à depósitos de estrutura bem definida, como veios estreitos (*'narrow-vein'*), ou mesmo para corpos de minério maciços ou

disseminados, como os depósitos de cobre-pórfiro ou as formações ferríferas bandadas (BIFs).

## **DINÂMICA DO DESLOCAMENTO NO DESMONTE DE ROCHAS**

### **Mecanismos**

A finalidade do desmonte de rochas por explosivos é a fragmentação adequada do material para que esse possa ser carregado e transportado pelos equipamentos disponíveis. Além da questão da granulometria das partículas, um desmonte bem sucedido deve acarretar o deslocamento da pilha desmontada, deve ser executado com mínimo dano ao maciço remanescente e ainda contemplar controle dos possíveis impactos ambientais, como vibração e ruídos [4].

Em relação ao deslocamento, existem alguns conceitos básicos que devem ser abordados para o entendimento da dinâmica de deslocamento em um desmonte e a possibilidade de otimização do design de um plano de fogo a partir desse conhecimento. Uma abordagem simplista da detonação, especialmente em áreas críticas, como detonações em limites confinados, conduz a elaboração de planos de fogo mal concebidos.

As cargas explosivas são fontes de energia distribuídas no espaço-tempo — não pontuais. Cada um dos furos carregados em uma malha corresponde a fontes lineares. Geralmente as cargas são alocadas na metade inferior da bancada e a iniciação se dá no fundo do furo. Na escala de toda a explosão, os furos liberam sua energia em momentos discretos.

A física básica por trás dos mecanismos de ruptura da rocha é abordada abaixo:

- Com a detonação e transmissão da energia, cada elemento discreto da coluna explosiva exerce uma força igual em todas as direções na rocha circundante. As rochas que oferecem menor resistência começarão a se mover. Por propagação dessa onda de choque, essas rochas atuam nas rochas vizinhas, o que resulta no deslocamento de todo o maciço rochoso.
- A rocha se move na direção da face livre dinâmica em sua área de influência — o caminho de menor resistência. Por conhecimento empírico isso é aproximadamente perpendicular aos contornos de tempo de iniciação.
- A rocha no topo da bancada não é empurrada diretamente pelo explosivo, mas movida indiretamente por colisões de outras rochas ou arrastada pelo atrito das rochas que se movimentam logo abaixo. Quanto mais acima na coluna explosiva estiver uma rocha, menos energia ela receberá e, portanto, percorrerá uma menor distância de deslocamento. Dessa forma, o deslocamento é expresso pelo perfil vertical em 'forma de D', ilustrado na Figura 1, com máximo deslocamento no nível médio-inferior da bancada, virtualmente ao centro da coluna explosiva. Aproximando-se do fundo da bancada, o deslocamento é reduzido devido à força de atrito com o piso não-desmontado.

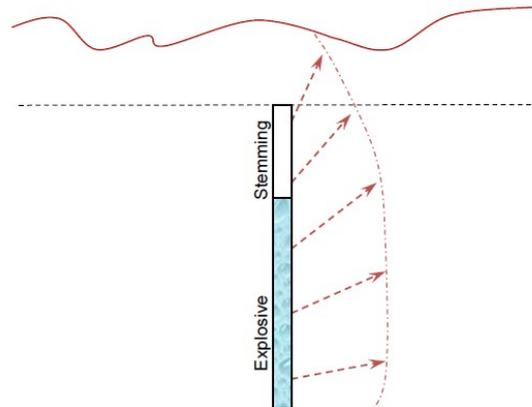


Figura 1. Deslocamento típico em forma de D ao longo da extensão vertical do furo [2]

### As diferentes zonas de deslocamento e os seus efeitos no controle de teor

Em um desmonte de rochas, o deslocamento do maciço sofre alterações nas diferentes regiões do plano de fogo. Considera-se como deslocamento 'normal', aquele associado às regiões da malha que não estão condicionadas aos limites; frontal (face livre ou confinada por parede), limite traseiro (zona de trincheira, em inglês utiliza-se o termo '*power trough*'), seguidos pela região da linha central da amarração.

### Corpo

O corpo da malha é definido como a porção que não é influenciada por nenhum efeito das regiões limítrofes ou de convergência, o deslocamento do maciço nessa região do plano de fogo é dado como "normal" e consistente para o desmonte em particular. A componente do deslocamento horizontal está diretamente relacionado à razão de carga utilizada no desmonte, alcances de até 40 m já foram identificados anteriormente, desconsiderando a projeção da face livre desmontada [2]. As seguintes características do deslocamento no corpo da malha foram observadas:

- O deslocamento horizontal sofre variação com a profundidade, conforme a referência ilustrada no perfil em 'forma de D';
- A direção do deslocamento é aproximadamente perpendicular aos contornos de tempo;
- O deslocamento horizontal médio está fortemente associado à quantidade de energia disponível no fogo (razão de carga);
- A inclinação é positiva (para cima). Apresenta angulação próxima da horizontal na parte inferior da bancada e aumenta progressivamente ao longo do furo, conforme ilustrado na Figura 1.

Essas são observações empíricas obtidas pela medição e mapeamento de diversos desmontes, todavia, mesmo a uma profundidade constante, espera-se grande variação de deslocamento ( $\pm 50\%$  de variação sob a média de deslocamento). Cada malha se move de maneira diferente e uma grande variação pode ocorrer no mesmo fogo [5].

## Limite Frontal

Definido como o limite adjacente ao ponto de iniciação do fogo na direção do deslocamento – a depender do plano de fogo, trata-se de uma face livre ou uma face confinada.

A Figura 2 e a Figura 3 ilustram conceitualmente os vetores de deslocamento para os planos de fogo com face livre e face confinada, respectivamente. Os pontos 3 e 4 representam deslocamentos típicos do corpo da malha nas bancadas inferior e superior do furo. Esses pontos são comparados ao deslocamento nas bancadas inferior e superior no limite frontal, representado pelos pontos 1 e 2 respectivamente. Conforme ilustrado, as componentes de deslocamento no corpo da malha (3 e 4) não sofrem grande variação para um desmonte em face livre ou face confinada.

O deslocamento na bancada inferior de um limite frontal para uma face livre é acentuado e consideravelmente maior do que o correspondente no corpo da malha (pontos 1 e 3, figura 2), por se tratar de uma face livre, existe essa inclinação negativa. Na bancada superior, a magnitude de deslocamento é ligeiramente maior quando comparada à sua correspondente no corpo da malha (pontos 2 e 4, figura 2), esse material da parte superior é lançado a uma distância horizontal menor que da porção inferior, corroborando novamente com o perfil em ‘forma de D’. A inclinação permanece negativa, visto que não há anteparos que exerçam força contrária ao deslocamento de ‘queda livre’ para o material desmontado nessa face.

Para a face confinada, o deslocamento na bancada inferior é limitado pela rocha adjacente, a inclinação é acentuada — para cima, visto que o material tende a seguir um caminho que ofereça menor resistência ao deslocamento — superfície. A distância 3D percorrida (componente horizontal e vertical) é menor do que sua correspondente no corpo da malha (pontos 1 e 3, figura 3), porém a inclinação positiva é maior. Na bancada superior, a magnitude de deslocamento é notadamente maior quando comparada à sua correspondente no corpo da malha (pontos 2 e 4, figura 3), isso ocorre devido a formação de uma face livre parcial originada pela zona de trincheira do desmonte anterior.

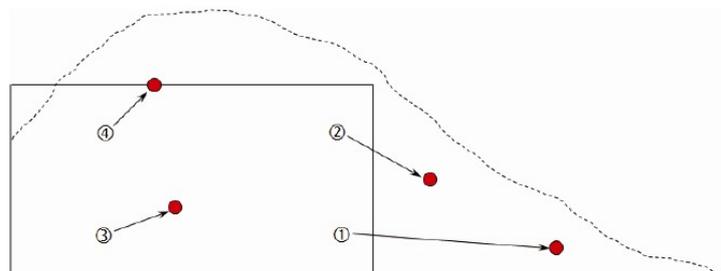


Figura 2. Deslocamento no limite frontal da malha para uma face livre [2]

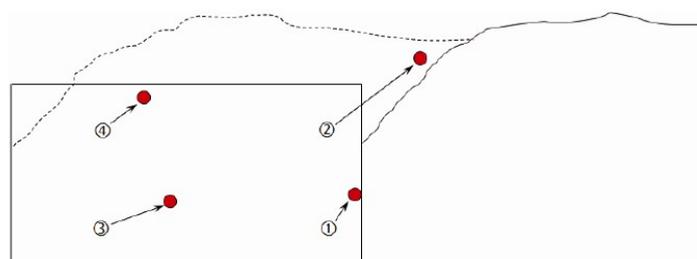


Figura 3. Deslocamento no limite frontal da malha para uma face confinada [2]

### Limite Traseiro (Zona de Trincheira - 'Power Trough')

Definido como a borda oposta à direção do deslocamento, tipicamente caracterizada por uma face vertical ao longo da borda traseira, onde a superfície da pilha desmontada se encontra abaixo da altura inicial da bancada — região essa comumente denotada zona de trincheira ('Power Trough'). A Figura 4 auxilia o entendimento da dinâmica do deslocamento nessa região do plano de fogo, que pode ser facilmente identificada em campo após o desmonte.

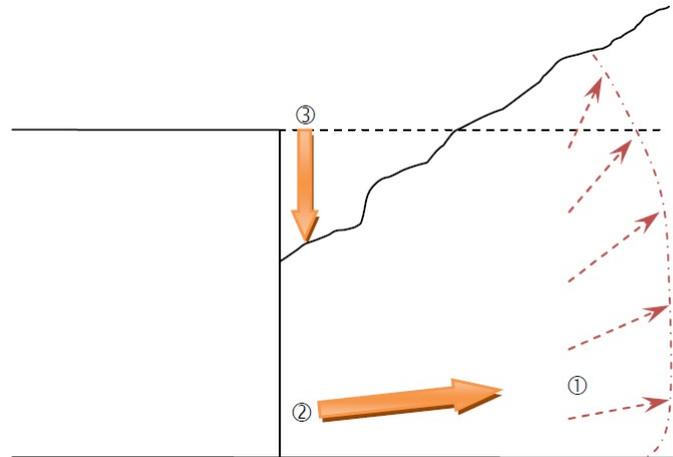


Figura 4. A dinâmica de formação das zonas de trincheira [2]

Região 1 - O deslocamento segue o perfil em 'forma de D' em grande parte da pilha desmontada até cerca de 2 a 3 furos de afastamento antes do limite traseiro. Nas regiões do corpo da malha e no limite frontal, a porção superior da bancada se move para frente e para cima, conforme abordado anteriormente.

Região 2 - Quando a carga explosiva dos furos na última linha detona, a rocha adjacente na parte inferior da bancada é empurrada para frente, exatamente como ocorre no corpo da malha;

Região 3 – Todavia, não há deslocamento de rochas atrás dessa última linha para apoiar o material desmontado da bancada superior, dessa forma esse material se deposita sob a 'cratera' gerada com o avanço da porção inferior da bancada, isto é, ocorre deslocamento vertical negativo.

### Linhas Centrais (Zonas de Convergência)

A sequência de iniciação é um parâmetro do plano de fogo de muita importância para a dinâmica de deslocamento do desmonte de rochas. Existem três principais configurações praticadas quanto à sequência de iniciação – Echelon, 'V' e Diamante (ou "Caixão" no jargão de linguagem) ilustradas na Figura 5. Essencialmente, uma configuração 'V' representa duas malhas iniciadas em Echelon e a configuração Diamante, quatro malhas em Echelon.

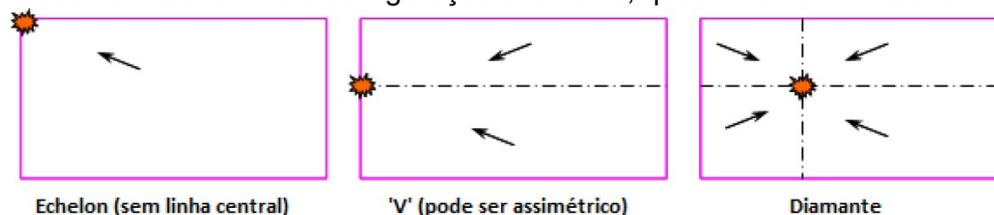


Figura 5. Diferentes tipos de configuração para o plano de fogo em bancadas.

A pilha desmontada típica de uma iniciação em 'V' é caracterizada por uma crista ao longo da porção central. Um desmonte com parâmetros geométricos, razão de carga e tamponamento

adequados, resultarão no deslocamento do maciço rochoso. Para entender a dinâmica desse deslocamento na região da linha central, podemos enumerar os eventos que sucedem o fogo.

- A iniciação começa em uma extremidade da linha central e progride ao longo dela, em uma sequência determinada pelos contornos de tempo de iniciação;
- Quando o primeiro furo é iniciado, a única rocha desmontada está à frente dele, então a rocha avança, isto se aplica a todos os furos ao longo da linha central. Existe um confinamento, visto que a rocha se movimenta na linha central antes que o próximo furo se inicie.
- Sob essas condições confinadas, o deslocamento normal para a frente é restrito e há uma tendência que a energia busque um caminho menos restritivo - para cima.
- Como as rochas desmontadas próximas à linha central se movem para cima, isso cria um caminho para a rocha vizinha que vem de um deslocamento ascendente a partir da iniciação da carga explosiva no fundo do furo e então empurra a rocha desmontada, levantando-a ainda mais.
- Existe um deslocamento de colisão devido ao deslocamento das rochas nos dois quadrantes em direção à linha central e em sentidos opostos, isso também auxilia na formação de uma região de convergência de massas rochosas e grande empolamento ao longo da linha central.

A Figura 6 ilustra como o ângulo de amarração das linhas também tem grande influência no deslocamento. As linhas tracejadas azuis representam os contornos de tempo e as setas tracejadas são os vetores de deslocamento típicos resultantes no corpo da malha. Em uma angulação mais plana, o deslocamento se apresenta de forma mais fluida e consistente no corpo da malha. O efeito de um ângulo 'V' mais agudo, favorece a colisão entre as rochas, a componente vertical do deslocamento é mais proeminente se comparado ao deslocamento do corpo da malha. De forma geral, o deslocamento próximo às linhas centrais é errático e imprevisível, isso se acentua para ângulos mais agudos, em que o deslocamento nessa região torna-se caótico.

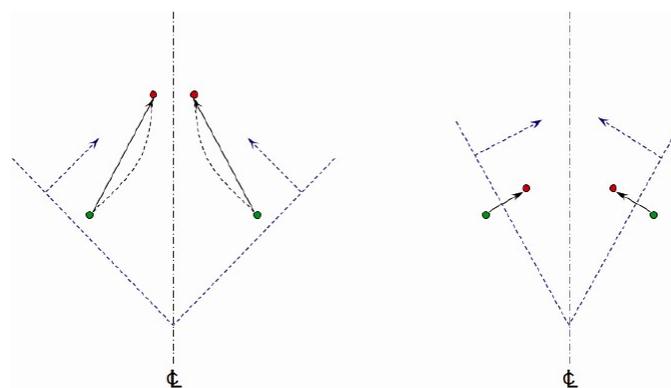


Figura 6. Influência do ângulo de iniciação no deslocamento próximo à linha central

Sob a ótica do controle de teor, a melhor configuração para a iniciação seria a Echelon, em que não existe uma linha central, dessa forma, maximiza-se a porção do maciço rochoso movendo consistentemente sob uma dinâmica de deslocamento 'normal' do corpo da malha.

As detonações são limitadas por diversos fatores, como controle geotécnico das paredes e taludes, e minimização de vibração e ruídos, nesse caso, nem sempre é possível priorizar o controle de teor no design do plano de fogo. Em um evento de inviabilidade da configuração Echelon, devemos trabalhar com uma (configuração 'V') ou mais linhas centrais (configuração Diamante), nesse caso, os contornos de tempo com ângulos mais abertos em relação à linha central representam uma maior parte do material se movendo sob uma

dinâmica de deslocamento do corpo da malha, portanto, são preferenciais para controle de perda de minério e diluição. Nessa configuração com ângulos mais abertos, não se favorece as colisões entre porções de rochas que acarretam uma maior diluição vertical aproximando-se da linha central, devido ao deslocamento variável de material em diferentes profundidades.

As seguintes malhas representadas na Figura 7 ilustram com clareza como as diferentes zonas de deslocamento são formadas para uma configuração de plano de fogo em Diamante e uma em 'V'.

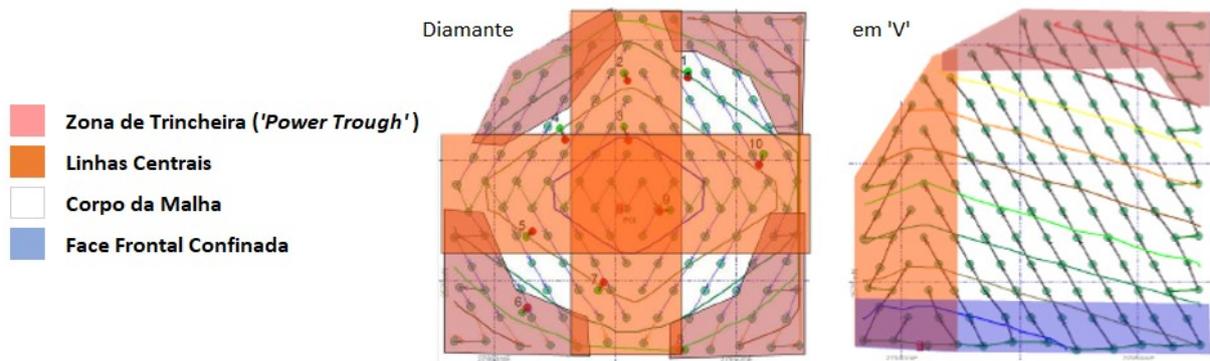


Figura 7. Diagramas com identificação das diferentes zonas de deslocamento para uma configuração Diamante ou em 'V' do plano de fogo.

A Figura 7 representa as várias regiões de deslocamento sobrepostas. Um "V" são dois Echelons consecutivos e um Diamante são essencialmente quatro Echelons, conforme a Figura 5. Cada um desses 'sub-Echelons' é menor e, portanto, há menos espaço para que o deslocamento se ajuste ao "normal", além do número de linhas centrais e zonas de convergência dobrar.

O ponto de iniciação de uma malha em Diamante, é cercado por rocha intacta, desse modo existe o confinamento de todo o desmonte. Pode-se observar que em grande parte, o deslocamento está relacionado às zonas de trincheira ou zonas de convergência (linhas centrais). A sequência em 'V' ilustrada apresenta uma configuração alternativa, em que há uma assimetria quanto aos domínios divididos pela linha central. Nessa configuração o disparo ocorre quase todo contra o material confinado, o resultado é visivelmente diferente comparado à configuração em Diamante, com boa parte da malha sob deslocamento consistente e benéfico para o controle de teor. Se o fogo tivesse duas faces livres, ele poderia ser iniciado como um Echelon e não haveria regiões de linha central – cenário ideal.

### Direção do Deslocamento

Para certos tipos de mineralizações, a direção do deslocamento também é um fator crítico. Por exemplo, a direção do deslocamento deve estar alinhada com o eixo longo ('strike') das liberações de minério para minimizar os erros associados à definição dos limites de lavra após o desmonte.

A Figura 8 ilustra que o deslocamento na mesma direção do *strike* de um bloco de minério minimizará a perda e a diluição. O vetor de deslocamento (seta azul) tem o mesmo comprimento nos três casos, mas a 0°, 45° e 90° do bloco retangular de minério. Portanto, para uma determinada quantidade de deslocamento, o erro é proporcional ao comprimento do limite na direção do deslocamento.

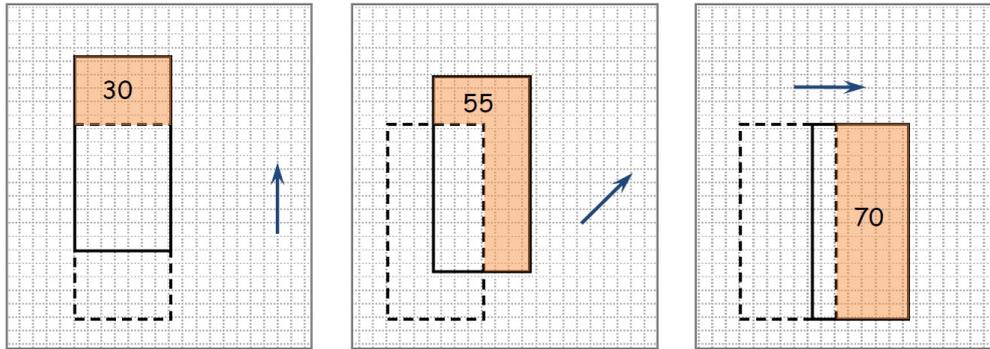


Figura 8. Relação da direção de deslocamento do desmonte e impacto no controle de teor.

### Empolamento da Pilha Desmontada

O empolamento ocorre sempre que a rocha é desmontada de sua posição *in-situ*. Representa o aumento aparente de volume que a rocha apresenta após sua fragmentação. A uniformidade do empolamento em diferentes profundidades, traz implicações importantes para a reconciliação em minas que realizam a lavra em bancada por múltiplos cortes. Se não houver uniformidade do empolamento e este não for considerado, pode haver uma alteração na profundidade originalmente estabelecida para os diferentes subníveis da bancada (cortes). Acarretando me perdas e diluição de minério caso a mineralização não se apresente de forma homogênea ao longo de todos os cortes previamente definidos.

De forma geral, argumenta-se um maior empolamento próximo à superfície, visto que há uma menor compactação do maciço e conseqüentemente um maior volume de vazios. Todavia, o conceito de maior empolamento próximo ao fundo da bancada também é aceito, visto que há uma maior fragmentação das rochas adjacente à coluna de explosivos. Na realidade, o empolamento ocorre por uma combinação dos dois fatores. Como discutido, existem três cenários possíveis para o empolamento, representados na Figura 9.

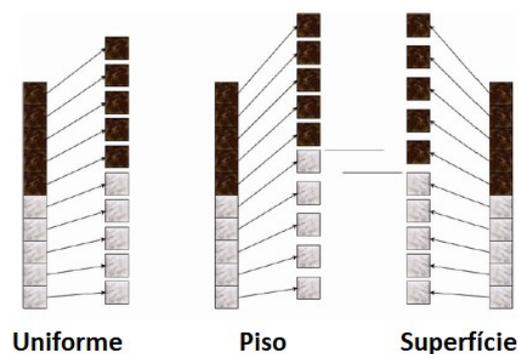


Figura 9. Possíveis cenários de empolamento das rochas. Uniforme, maior empolamento próximo ao fundo da bancada, ou próximo à superfície

## MONITORAMENTO DO DESLOCAMENTO NO DESMONTE DE ROCHAS

Um número considerável de pesquisas no setor mineral investigaram métodos para medir o deslocamento no desmonte de rochas. Podemos destacar a utilização de marcadores visuais e sistemas remotos de detecção [1].

Entre os marcadores visuais (e.g. tubos, correntes, sacos de areia), a técnica mais comum consiste em alocar furos adicionais na malha de perfuração e posteriormente inserir longos tubos polímeros nesses furos. Após o desmonte, esses tubos são identificados pela equipe de topografia, e as novas coordenadas são comparadas à localização inicial dos marcadores. O método requer que os marcadores sejam escavados para que sua localização seja repassada à equipe de despacho, essa 'reatividade' do método traz uma grande limitação quanto à predição das novas liberações de minério. A taxa de recuperação desses marcadores é muito baixa, em diversas ocasiões, o próprio empolamento da pilha desmontada recobre os dispositivos. Ademais, os marcadores são instalados próximos à superfície da bancada, e esse deslocamento medido próximo a superfície, não é representativo para a parte inferior do furo, conforme abordado anteriormente nesse artigo.

Em relação aos sistemas remotos de detecção, os marcadores magnéticos para medição do deslocamento foram investigados por [6] e [7]. Diversas restrições operacionais foram reportadas, principalmente com o dano que os marcadores, construídos em material metálico, poderiam causar nos processos subsequentes à lavra, principalmente ao passar pelos britadores e moinhos. Analogamente, a utilização das tags de rádio frequência (RFID) se mostrou ineficiente quanto à predição dos novos contornos de liberação de minério visando controle do teor, visto que, as tags devem ser escavadas in-situ, tratando-se de um dispositivo passivo – distância de detecção limitada em cerca de 1 metro, em que a detecção só ocorre já na saída do britador primário, onde os dispositivos detectores são acoplados. Além disso, as tags são alocadas na coluna de tampão dos furos, e como já discutido anteriormente, o deslocamento próximo a superfície não é representativo e não deve ser inferido para toda a bancada.

### O Sistema BMM®

Uma pesquisa iniciada no instituto "*Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre – JKMRC*", parte integrante da Universidade de Queensland na Austrália resultou no desenvolvimento de um sistema de detecção remota ativa para o deslocamento no desmonte de rochas [8]. Após a prototipagem inicial da tecnologia, sua viabilidade foi demonstrada em planos de fogo reais em uma mina de ouro a céu aberto operada pela Placer Dome Inc. na Austrália [9]. O sistema posteriormente passou a ser comercializado sob licença da Blast Movement Technologies (BMT).

O sistema BMM consiste em sensores direcionais – BMMs colocados dentro da malha de perfuração antes do desmonte em furos cativos de monitoramento, que são localizados após o fogo com um detector especial capaz de localizar os BMMs após o desmonte e calcular suas profundidades. As informações coletadas são então processadas com um software projetado especificamente para tal.

Os sensores fornecem vetores de deslocamento tridimensionais após o desmonte da malha em questão. A partir dessas informações, os novos limites das liberações de minério na bancada podem ser ajustados e repassados à equipe responsável pelo carregamento de minério, reduzindo dessa forma a perda e diluição de minério.

## MODELAGEM DO DESLOCAMENTO PÓS-DESMONTE

Conforme abordado, a aplicação de energia explosiva no desmonte das rochas, processo vital para as lavras de minas a céu aberto, invariavelmente acarreta o deslocamento do maciço rochoso. Em certas operações, esse deslocamento é visto como um fenômeno prejudicial às práticas de controle de teor. Todavia, esse deslocamento só é de fato deletério ao controle de teor, caso não seja contabilizado no planejamento de lavra ocasionando em perdas, diluição e classificação incorreta de minério. Diversos modelos já foram elaborados para o desmonte de rochas, com foco sobretudo na previsão da fragmentação e do deslocamento do maciço rochoso, esse artigo foca apenas no deslocamento, e suas implicações no controle de teor. As propriedades do explosivo, da rocha, os parâmetros do plano de fogo e as condições do maciço rochoso nos limites adjacentes à malha a ser desmontada devem ser bem compreendidos e serão entradas na construção de um modelo para o desmonte de rochas, conforme Figura 10.

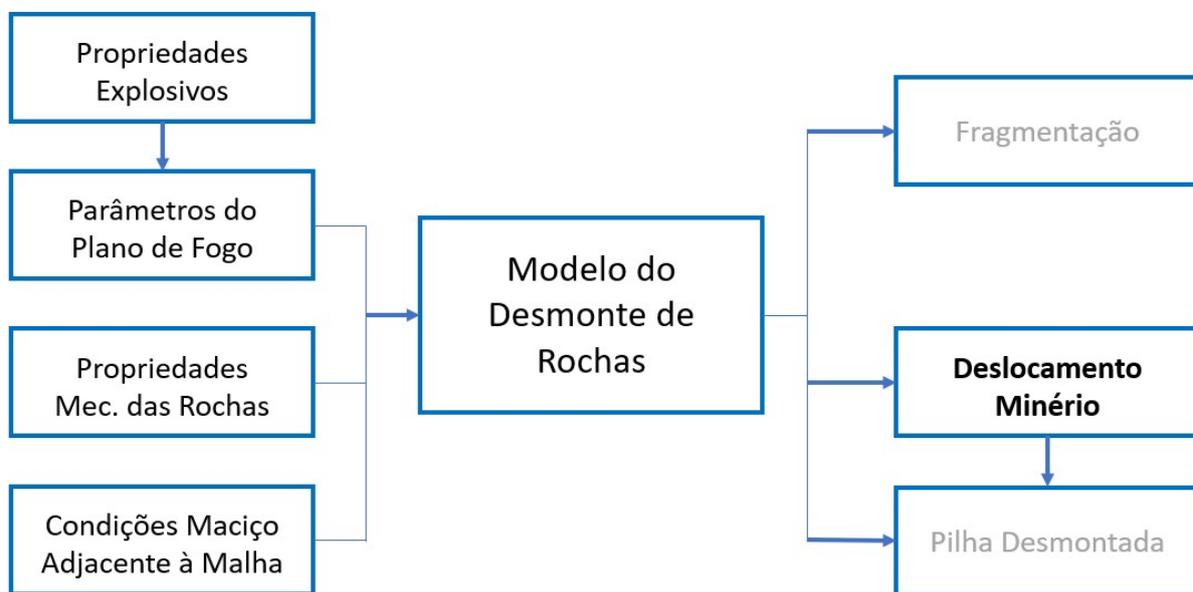


Figura 10. Entradas e Saídas de um Modelo típico para o Desmonte de Rochas

### As Entradas do Modelo

Com relação aos explosivos, a energia liberada pode ser dividida em duas componentes: as ondas de choque e a expansão dos gases. As ondas de choque, geradas nos primeiros instantes pós-detonação, são transmitidas pelo maciço à uma velocidade supersônica e uma força que supera a resistência dinâmica à compressão da rocha. A propagação dessa onda induz um faturamento radial do maciço adjacente. Quando a onda encontra a superfície livre, é refletida de volta ao maciço, estendendo as fissuras deixadas anteriormente com auxílio dos gases em expansão que também penetram nas fissuras [4]. Esse ciclo segue por toda a detonação e os furos interagem com furos vizinhos, desmontando a rocha e colocando-a em movimento.

A capacidade de modelar a contribuição da energia explosiva para os resultados do desmonte, envolve um preciso conhecimento das componentes e como a energia se divide precisamente entre onda de choque e energia de expansão. Diversos fatores contribuem para a eficiência dessa reação, e sobretudo para os explosivos granulados, contaminantes na mistura e a própria presença de água podem afetar a performance dos explosivos e consequentemente de todo o desmonte.

O plano de fogo utilizado governa como a energia explosiva é distribuída espacial e temporalmente, controladas pelas variáveis geométricas (por exemplo, altura da bancada, espaçamento, afastamento, diâmetro do furo etc.) e os intervalos de tempo de iniciação entre furos, respectivamente. Existe uma complexa interação entre esses dois fatores, e conforme abordado nesse artigo, a dinâmica do deslocamento no desmonte de rochas é influenciada pelas diferentes regiões da malha.

Uma variável de difícil quantificação para a implementação de um modelo seria o confinamento dos gases exercidos pela coluna de tamponamento. Existe uma proporcionalidade entre a extensão do tampão e a capacidade de confinamento dos gases, todavia, quando de forma arbitrária ocorre alguma ejeção do tampão, o tempo de atuação dos gases para o faturamento do maciço rochoso é reduzido, impactando a predição do deslocamento da pilha desmontada.

O maciço rochoso é definido por seus aspectos estruturais (por exemplo, tamanho do bloco e a presença de descontinuidades geológicas) e propriedades físico-mecânicas (por exemplo, coesão, resistência à compressão e tração, módulo de Young e coeficiente de Poisson). Devido à aleatoriedade intrínseca a qualquer mineralização, estes nunca podem ser medidos precisamente, sendo apenas descritos nos modelos como distribuições estatísticas com base nas limitadas observações que podem ser feitas.

Finalmente, as condições das rochas adjacentes à malha do plano de fogo constituem uma das entradas em um modelo de desmonte de rochas. Como abordado no capítulo da dinâmica do deslocamento, os limites da malha influenciam no deslocamento da pilha desmontada. Em um desmonte com presença de uma face livre e configuração de iniciação apropriada por exemplo, o deslocamento será consistente e predominantemente horizontal. Para um desmonte com face adjacente parcialmente confinada, o deslocamento da parte inferior da bancada será limitado pelo material à sua frente, enquanto a rocha na bancada superior estará livre para deslocar-se sobre o topo da pilha desmontada do furo adjacente.

Mesmo que um modelo numérico incorpore todas essas variáveis, a precisão de sua previsão do deslocamento de um maciço rochoso após a detonação será atrelada aos dados de entrada. Sabendo que por muitas vezes, existe uma imprecisão dos parâmetros ou mesmo uma inferência em relação às diversas incógnitas, esses modelos numéricos se tornam basicamente modelos empíricos. Os erros associados ao algoritmo do modelo juntamente às incertezas nas entradas serão refletidos na saída do modelo e mesmo pequenas discrepâncias na tradução do deslocamento resultarão em valores significativos devido à perda e diluição do minério [1].

## **Modelagem vs Monitoramento**

As pesquisas conduzidas na Universidade de Queensland e posterior comercialização do sistema BMM desde então [9], resultaram em um robusto banco de dados composto por vetores de deslocamento obtidos após a instalação dos sensores em milhares de planos de fogo nos diversos tipos de depósito e commodities ao longo dos últimos quinze anos. A principal conclusão é que o deslocamento no desmonte de rochas não pode ser modelado de forma eficiente tendo em vista o controle de teor.

O deslocamento é proporcional à razão de carga praticada no desmonte, todavia existe uma variabilidade significativa tanto na magnitude quanto na direção do vetor de deslocamento em qualquer desmonte. Algumas das principais observações acerca da magnitude de deslocamento são destacadas a seguir [10]:

- Uma variação entre 0,5 até 30 metros já foi observada para o deslocamento horizontal do maciço rochoso (desconsiderando face livre);
- Uma variação de  $\pm 50\%$  da média é esperada para o deslocamento horizontal do maciço em um mesmo desmonte;

- O deslocamento varia dentro de uma mesma bancada; ou seja, o deslocamento próximo à superfície é muito menor do que o deslocamento observado no centro da bancada, próximo ao topo da coluna de carga explosiva.

A Figura 11 é resultado de um dos primeiros estudos de caso da utilização do sistema BMM para medição do deslocamento no desmonte de rochas [9]. Esta ilustra como o deslocamento é altamente variável, mesmo para planos de fogo designados para deslocamento consistente, iniciados em Echelon, em uma mesma região da cava e com os sensores posicionados de forma estratégica visando minimizar influência de variações do plano de fogo.

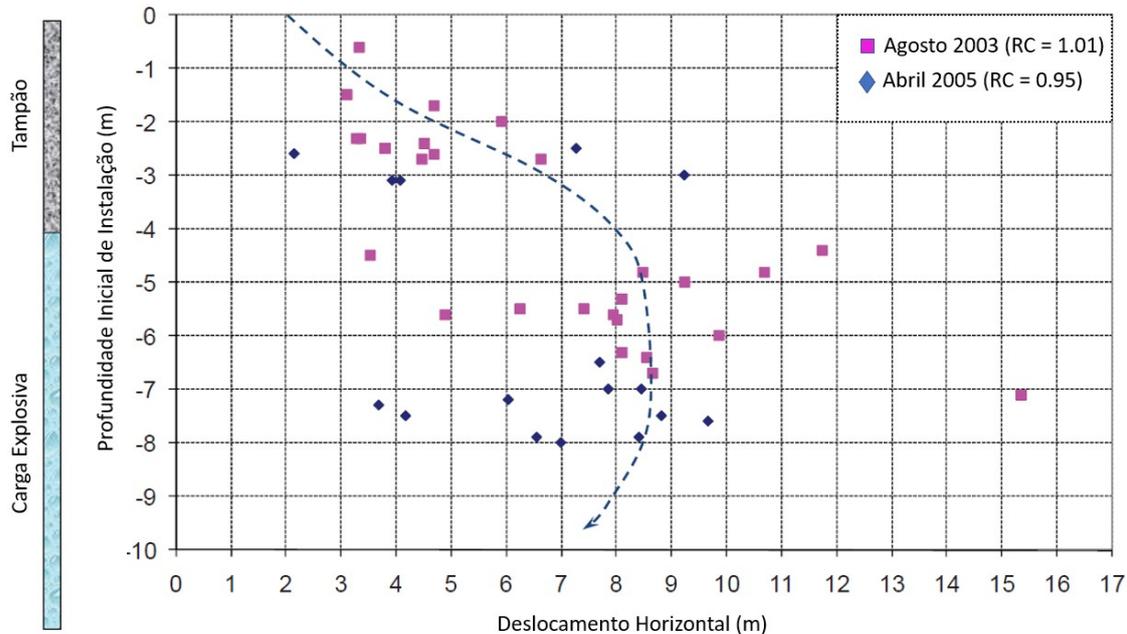


Figura 11. Exemplo da grande variação do deslocamento horizontal para desmontes com alta razão de carga (RC) [9]

Em cada desmonte de rochas, as condições são únicas - o design do plano de fogo, o tipo de explosivo ou a sequência de iniciação utilizada, a estrutura do maciço rochoso, a divisão das componentes de energia da detonação, entre outros. Todos têm efeitos significativos e inter-relacionados ao deslocamento final do maciço.

Embora tenha havido avanços na capacidade de modelagem do deslocamento no desmonte de rochas, a imprevisibilidade da magnitude e direção desse limita a utilização de um modelo no controle de teor de minério. Os menores erros na tradução do deslocamento, resultarão em perda e diluição do minério financeiramente significativas, favorecendo o monitoramento efetivo do deslocamento em cada desmonte.

## APLICAÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA BMM

O controle de teor reconhecidamente não é completo sem que o deslocamento no desmonte seja contabilizado [2]. O seguinte estudo de caso [11] resume os resultados obtidos em três minas de cobre no Peru e no Chile que mediram o deslocamento no desmonte de rochas:

- Mina A - Cobre Pórfiro-Skarn - Depósito de Cobre-Molibdênio no Peru.
- Mina B – Cobre Pórfiro-Skarn - Depósito de Ouro-Zinco no Peru.
- Mina C - Depósito do tipo Cobre-Manto no Chile.

Vários BMMs – sensores de deslocamento foram alocados nos desmontes realizados. As liberações de minério, ou linhas de escavação, foram traduzidas com base na medição do movimento em cada desmonte. Os locais dos polígonos traduzidos foram comparados aos polígonos in situ e as áreas de perda, diluição e classificação incorreta do minério foram definidas, com a suposição de que o minério teria sido lavrado até os limites dos polígonos pré-desmonte. Utilizando os parâmetros de entrada fornecidos por cada mina, as tonelagens e, quando possível, as perdas financeiras, foram calculadas para avaliar o efeito do movimento do desmonte na recuperação do minério

Um resumo dos parâmetros típicos dos planos de fogo e resultados de deslocamento obtidos para cada mina são apresentados na Tabela 1.

*Tabela 1. Parâmetros dos Planos de Fogo e resultados dos deslocamentos para cada mina:*

<b>Mina</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Planos de Fogo Monitorados	3	6	4
BMMs instalados	36	37	34
Altura da Bancada (m)	15	15	10
Diâmetro Furo (mm)	311	311	270
Razão de Carga (kg/m <sup>3</sup> )	1.6	1.34	1.1
Espaçamento (m)	8.0	7.5	7.0
Afastamento (m)	7.0	6.0	6.0
<b>Alcance do Movimento Horizontal (m)</b>	<b>1.2-26.0</b>	<b>1.5-22.0</b>	<b>0.7-40.0</b>

A Figura 12 ilustra a componente horizontal do movimento tridimensional para todos os desmontes monitorados em cada mina plotado contra a profundidade de instalação dos BMMs. Uma vista em corte dos furos (à esquerda) mostra a profundidade de instalação dos sensores BMM em relação à coluna explosiva. A dinâmica de movimento em um desmonte estabelece que o movimento horizontal é mínimo na superfície, atinge sua magnitude máxima no topo ou logo abaixo do topo da coluna explosiva antes de diminuir novamente próximo ao fundo da bancada, conforme discutido nesse artigo. Conforme discutido nesse artigo, a variação nas medições do movimento horizontal pode exceder 50% de cada lado da média, então uma grande variação em todos os desmontes monitorados não é incomum.

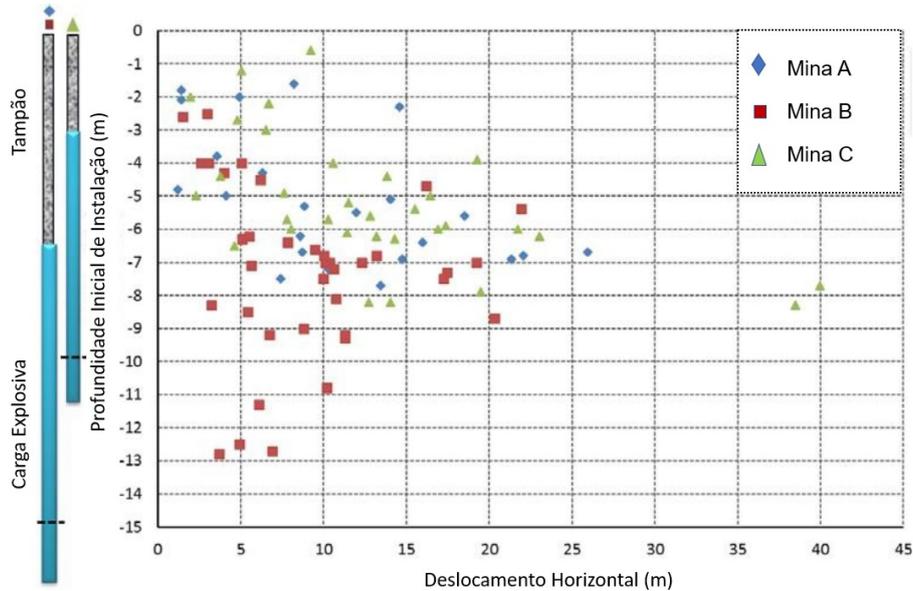


Figura 12. Deslocamento Horizontal vs Profundidade de Instalação para todos os desmontes em cada uma das minas

Se os polígonos de minério e estéril forem escavados em sua localização *in situ*, ocorrerão perda de minério, diluição e classificação incorreta, pois a rocha sempre se move durante o desmonte. Para os fins desta análise:

1. A perda de minério é definida como minério enviado para a pilha de estéril;
2. Diluição é definida como material estéril sendo enviado para a planta e processado como minério, e
3. Classificação Incorreta é definida como material com uma classificação de minério sendo tratado com uma classificação diferente, exemplo: minério de baixo e alto teor

Um resumo da perda total, diluição e classificação incorreta de minério calculada em cada mina está resumido na Tabela 2.

Tabela 2. Perda, Diluição e Classificação Incorreta em cada mina

Mina	# Planos de Fogo	Material	Minério		Metal Recuperável		Diluição		Classificação Incorreta	
			In situ	Perda	Perda					
		(t)	(t)	%	(t)	(USD)	(t)	%	(t)	%
A	3	368.541	6.527	2%	27,9	\$160,672	11.007	3%	46.789	13%
B	5	955.716	96.300	10%	Não Calculado		101.332	11%	Não Calculado	
C	1	88.007	17.529	20%	Não Calculado		10.935	12%	9.666	11%

Um exemplo dessas análises é fornecido para um plano de fogo selecionado da mina A. O fogo nesse desmante foi iniciado a partir da borda leste em uma configuração em “V” em direção à face confinada. A borda sul do perímetro era uma face livre e as bordas norte e oeste eram confinadas por material não-desmontado. A Figura 13 ilustra a malha de um desmante com o ponto de iniciação, a identificação das bordas da malha e os contornos de tempo que foram definidos nesse plano de fogo. Os vetores de movimento obtidos com os sensores BMMs também são visualizados.

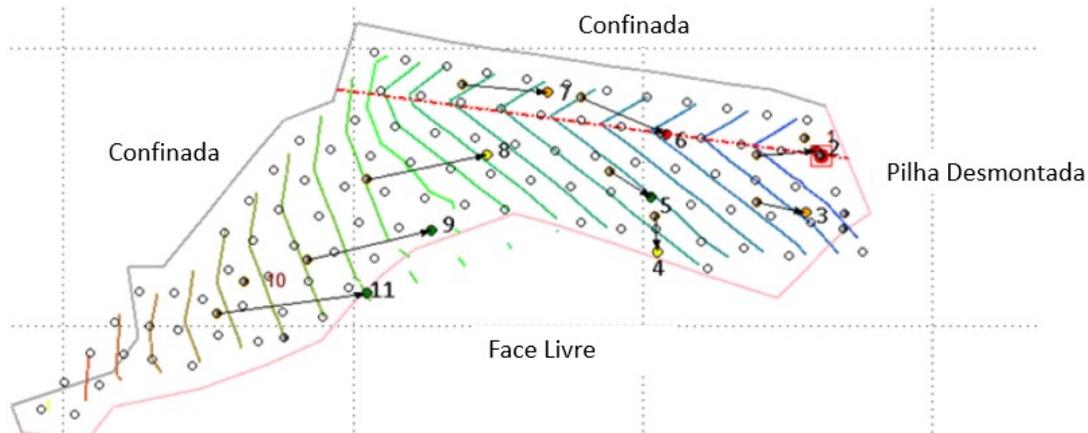


Figura 13. Os vetores de movimento a partir dos BMMs são exibidos.

Para cada desmante, as liberações in-situ são ajustadas a partir dos vetores de movimento obtidos. Essas novas liberações de minério são definidas e repassadas à equipe de despacho da mina. A Figura 14 mostra a liberação de minério pré-desmante (linhas pontilhadas) e as delimitações das novas liberações de minério (linhas contínuas) obtidas com a utilização dos vetores de movimento a partir dos sensores BMM.

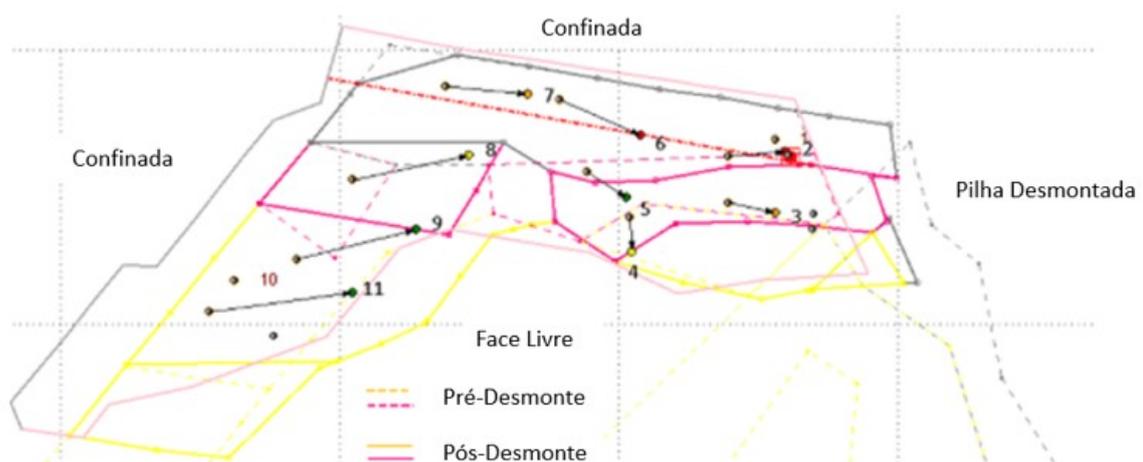


Figura 14. Liberações de Minério obtidas para a malha exemplo que foi monitorada na mina A utilizando vetores a partir do movimento dos sensores BMM

As áreas entre as liberações de minério pré-desmante e as liberações de minério pós-desmante são definidas como perda, diluição ou classificação incorreta de minério, usando a suposição de que as liberações teriam sido lavradas in situ, caso o deslocamento não fosse contabilizado. Essas áreas e as tonelagens correspondentes, percentagens e,

perdas financeiras, são mostradas na Figura 15 para o exemplo de desmonte monitorado na mina A. As seguintes premissas foram usadas para calcular esses valores:

- Preço do Cobre = US\$ 5750/t;
- Recuperação da usina = 85%;
- Teor médio do minério = 0,6%;
- Densidade = 2,63 t/m<sup>3</sup>.

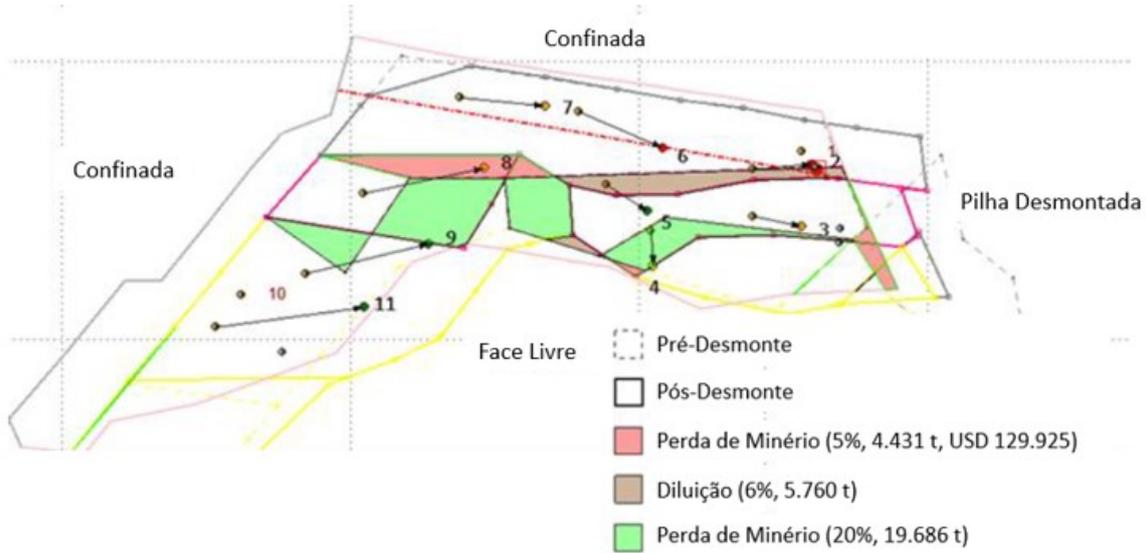


Figura 15. Perda, Diluição e Classificação Incorreta de minério para o desmonte monitorado na mina A

Como mostrado na Figura 15, ao levar-se em conta o movimento do desmonte para esse exemplo de malha monitorada na mina A, um valor adicional de US\$ 130000 foi obtido, mais de 5700 toneladas de estéril foram desviadas da planta, reduzindo a diluição em 6% e quase 20.000 t (20%) de classificação incorreta de minério foram evitados com a utilização do sistema BMM de monitoramento do deslocamento no desmonte de rochas.

## CONCLUSÕES

O Desmonte de Rochas invariavelmente acarreta o deslocamento das massas rochosas e pode ser prejudicial para uma definição precisa das liberações de minério e os contatos minério-estéril na pilha desmontada resultante.

As consequências podem ser a perda e diluição de minério. No entanto, esses eventos podem ser minimizados e resultados significativos podem ser alcançados caso o deslocamento seja levado em conta com exatidão. As relações da dinâmica do deslocamento em desmonte de rochas e o seu monitoramento, discutidas nesse artigo, baseiam-se na experiência de diversos estudos de deslocamento realizados pela empresa Blast Movement Technologies - BMT, que comercializa o sistema BMM.

A compreensão da dinâmica do deslocamento no Desmonte de Rochas propicia a otimização dos planos de fogo visando o controle de teor do minério. Existem diferentes zonas de deslocamento em uma malha; o corpo da malha, limite frontal (face livre ou confinada), o limite traseiro (zona de trincheira) e a região das linhas centrais de iniciação (zonas de convergência). O deslocamento no corpo da malha é dado como “normal” para o plano de fogo e estudos anteriores indicam que um perfil de deslocamento da bancada nessa região em forma de “D” é esperado. Isto é, deslocamento horizontal é máximo próximo ao centro da coluna explosiva e sofre um decréscimo em sua magnitude ao se aproximar do piso e da superfície da bancada.

Apesar do perfil de deslocamento esperado, existe uma variação significativa nos dados de deslocamento em cada desmonte ( $\pm 50\%$  da média). Essa variação ocorre em todos os desmontes, devido a alterações nos parâmetros da malha de furos e do plano de fogo, as propriedades mecânicas do maciço rochoso, eventuais vazios e efeitos das regiões externas à malha (cada desmonte é único). Tal variabilidade traz implicações para a aplicação de um modelo que possa prever os deslocamentos. A precisão de qualquer modelo é definida por essa variação e, se for usado para inferir o deslocamento de todas as liberações de minério, haverá uma penalidade financeira em comparação com o monitoramento do deslocamento de cada liberação de minério. O monitoramento e a medição do deslocamento dos maciços no desmonte de rochas é a única metodologia realmente precisa de incorporá-lo como procedimento operacional para o controle de teor.

De um modo geral, a prioridade de uma operação de mina é minimizar as perdas de minério, diluição, contaminação ou maximizar aderência aos critérios de blendagem. Portanto, o objetivo é separar eficientemente os diferentes materiais provenientes da cava (minério/estéril). Dessa forma, caso o deslocamento no desmonte de rochas não seja levado em conta, pode tornar-se um enorme gargalo financeiro para a operação.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. La Rosa e D. Thornton, “Blast Movement Modelling and Measurement,” em *Proceedings of 35th APCOM Symposium*, Wollongong, Australia, 2011.
- [2] D. Thornton, “The Application of Electronic Monitors to Understand Blast Movement Dynamics and Improve Blast Designs,” em *Proceedings Ninth International Symposium on Rock Fragmentation*, Brisbane, 2009.
- [3] W. Hunt e D. Thornton, “Modeling Vs. Monitoring Blast Movement: The Cost of Variation,” em *Proceedings 40th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique*, Denver, 2014.
- [4] V. C. Silva, *Desmonte de Rochas*, São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- [5] D. Thornton, “The Implications of Blast-Induced Movement to Grade Control,” em *Proceedings of Seventh International Mining Geology Conference*, Melbourne, 2009.
- [6] L. T. S. Gilbride e S. Zhang, “Blast-Induced Rock Movement Modelling for Nevada Gold Mines,” *Mineral Resources Engineering*, pp. 175-193, 1995.
- [7] G. W. Harris e P. a. D. J. Mousset-Jones, “Measurement of Blast-induced Rock Movement in Surface Mines by Application of Magnetic Geophysics”,,” *Trans. Institution of Mining and Metallurgy (Sect. A: Min. industry)*,, 1999.
- [8] M. Adam e D. Thornton, “A New Technology for Measuring Blast Movement,” JKMRRC, University of Queensland, Brisbane, 2004.
- [9] D. Thornton, D. Sprott e I. Brunton, “Measuring Blast Movement to Reduce Ore Loss and Dilution,” *Proc. 31st Annual Conference on Explosives & Blasting Technique*, 22 Fevereiro 2005.
- [10] Blast Movement Technologies, “Maximising Ore Recovery and Minimising Dilution in Open Pit Mines,” Setembro 2018. [Online]. Available: <https://blastmovement.com>.
- [11] J. Loeb e M. Silveira, “Minimizing Mining Dilution, Ore Loss, and Misclassification by Accounting for Blast Movement in South American Porphyry-Skarn and Manto Copper Mines,” em *PerúMin - 33th Convención Minera*, Arequipa, 2018.

