

# **Monitoramento do Deslocamento no Desmonte de Rochas para Redução da Perda de Minério e Diluição**

Darren Thornton, Pesquisador Sênior, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, Indooroopilly, Australia

David Sprott, Engenheiro de Minas, Research and Technology, Placer Dome Technical Services Limited, Vancouver, Canada

Ian Brunton, Pesquisador Sênior, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, Indooroopilly, Australia

## **Resumo**

O desmonte de rochas causa o movimento dos maciços rochosos e pode ser prejudicial para o delineamento preciso das regiões de minério e estéril na pilha desmontada resultante. As consequências podem ser perda e diluição do minério. No entanto, a perda e diluição de minério podem ser minimizadas e aumentos significativos nos lucros podem ser realizados se esse deslocamento for medido com precisão.

Vários métodos têm sido utilizados para medir o movimento da pilha desmontada, incluindo tubos polímeros, correntes e sacos de areia, mas estes são imprecisos ou pouco práticos. O Centro de Pesquisa Mineral “Julius Kruttschnitt – JKMRC”, desenvolveu um monitor eletrônico do deslocamento que fornece vetores de movimento tridimensionais precisos após o desmonte. A partir dessas informações, os novos limites dos corpos de minério na bancada desmontada podem ser ajustados para traduzir o deslocamento medido e, em seguida, a recuperação do minério pode ser otimizada. Após o desenvolvimento inicial e prototipagem da tecnologia, a JKMRC demonstrou o sistema em planos de fogo de produção reais em uma mina de ouro a céu aberto operada pela Placer Dome Inc. na Austrália

Este artigo apresenta a tecnologia de detecção do movimento, seu uso no desmonte de rochas e os resultados de testes em campo. Os resultados primários são resumidos abaixo:

- Componente Horizontal do Deslocamento:
  - Média de 4,7 m (15 pés) no corte superior (de 46 transmissores);
  - Média de 9,4 m (30 pés) no corte inferior (de 22 transmissores);
  - Deslocamento máximo de até 15,4 m (50 pés).
- Reuniu informações suficientes para fornecer aos geólogos modelos de movimento, ou diretrizes, para futuros desmontes.
- Custo potencial total estimado a partir das oito malhas monitoradas:
  - Perda de ouro: superior a US\$ 1,5 milhões.
  - Diluição (processamento do estéril): cerca de US\$ 0,5 milhão.
  - A perda de minério custa cerca de três vezes mais do que a diluição.

## Introdução

As minas a céu aberto normalmente lavram depósitos que são altamente heterogêneos, disseminados em mineralizações com variações de teor. Um teor de corte econômico é determinado para cada operação e qualquer material com menor concentração desse mineral de valor é designado como estéril. Um modelo geológico é desenvolvido e fornece um mapa tridimensional das regiões de minério e estéril. O minério é escavado e transportado para a planta de beneficiamento.

O desmonte desses corpos de minério é necessário para fragmentar e desprender o maciço rochoso, propiciando uma escavação eficiente. No entanto, o desmonte também causa movimento da rocha e isso é prejudicial para o delineamento preciso das regiões de minério e estéril na pilha desmontada resultante. As consequências podem ser perda de minério (o minério segue para a pilha de estéril, como material sem valor econômico) e diluição (o estéril é categorizado erroneamente como minério e encaminhado para o concentrador). Por outro lado, se o movimento puder ser medido com precisão, a perda e diluição do minério podem ser minimizadas e economias significativas podem ser alcançadas. Se o movimento da pilha desmontada for medido e/ou previsto, a perda de minério e a diluição devido ao movimento podem ser controladas. Isso é particularmente importante para depósitos onde o minério tem alto valor e onde veios estreitos de minério (*'narrow vein'*) estão sendo extraídos, como nas operações de ouro.

Este artigo apresenta um sistema inovador que pode fornecer vetores de movimento tridimensionais precisos em cerca de uma hora após o desmonte. A partir dessas informações, os novos limites das liberações de minério podem ser ajustados para levar em conta o movimento medido e então a escavação pode ser otimizada. A ferramenta também é excelente para a compreensão da dinâmica do movimento das rochas no espaço tridimensional.

O benefício do sistema é realizar com precisão a translação pós-desmonte dos corpos de minério, minimizando a perda e diluição do minério. A redução da perda de minério resulta em aumento da receita operacional. A Figura 1 mostra o valor (em dólares australianos) do ouro perdido por várias combinações de grau de movimento e teor (corpos de minério de 50 m de largura; em cortes de 5 m de altura). Por exemplo, se houver um erro de 6 m entre a posição demarcada no modelo geológico e a localização real do minério em uma bancada, temos as seguintes consequências:

- Se o teor do corpo de minério é de 4 g/t e cerca de AUD 300.000 (US\$ 200.000) são perdidos;
- Se o teor é de 8 g/t, a perda é de mais de AUD 500.000 (US\$ 350.000);
- Um erro na definição do limite do minério em apenas 1 m, pode resultar em perdas de ouro equivalentes à até AUD 100.000 (US\$ 70.000).

## Estado da Arte

Uma variedade de técnicas diferentes tem sido usada para medir o movimento da pilha desmontada pós-desmonte, mas elas têm demonstrado sucesso variável. Os métodos variam de marcadores passivos (como sacos de areia, correntes e tubos polímeros) até sensores eletrônicos mais caros, mas todos esses sistemas sofrem de precisão insuficiente ou pouca praticidade. Uma técnica comum usada na indústria de ouro australiana é perfurar furos adicionais dentro de um plano de fogo e inserir tubos polímeros de grande comprimento. A malha é então escavada em camadas horizontais denominadas cortes (em inglês utiliza-se o termo *"flitches"*) e a localização dos tubos pode ser monitorada em relação às localizações das liberações de minério.

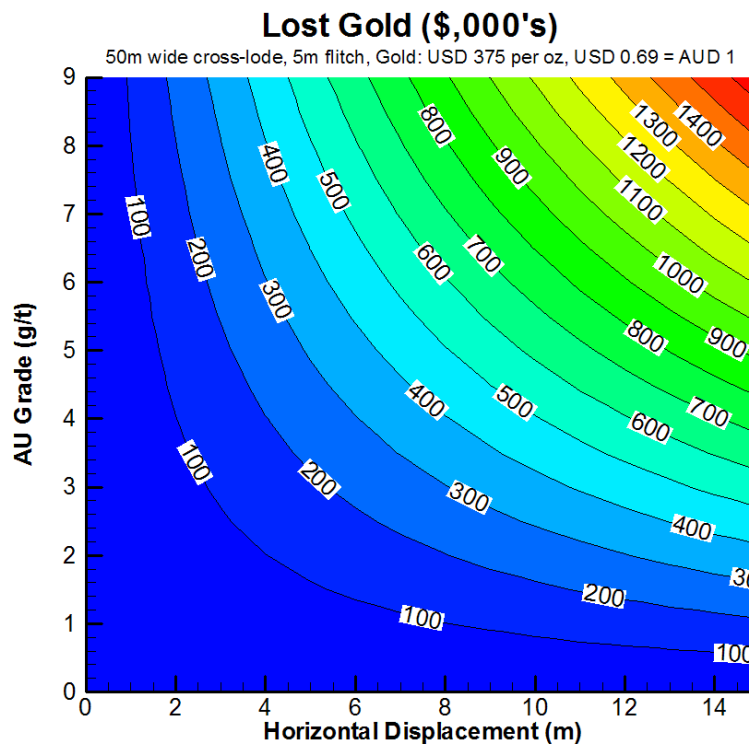


Figura 1. Diagrama de contornos de perda de valor para diferentes combinações de teores de ouro e deslocamentos horizontais

Gilbride *et al.* (1995) e Taylor (1995) relatam que a questão da diluição do minério devido ao movimento da pilha desmontada induzida pelo desmonte foi examinada pela primeira vez em 1992 e 1993. As pesquisas demonstraram que a diluição teórica do minério varia de menos de 10% a quase 100% por peso, dependendo de vários fatores, incluindo a concepção do plano de fogo, condições da face livre, propriedades mecânicas do maciço e parâmetros da geologia local. Gilbride e Taylor também testaram e compararam dois métodos de medição em três minas no estado americano de Nevada. Esses testes se concentraram no uso de “sacos marcadores” (17 desmontes) que eram localizados quando escavados, mas a detecção de marcadores magnéticos com a partir da utilização de magnetometria também foi tentada. A metodologia utilizada com os sacos marcadores era simples, barata e precisa, entretanto, normalmente, menos de 50% dos sacos foram localizados (30% para sacos alocados em bancadas inferiores) e levou vários dias até que todas os sacos fossem escavados. O movimento tridimensional medido variou de 3 m a 7,7 m. A tentativa com o magnetômetro visou confirmar o potencial da tecnologia. Os marcadores foram detectados em profundidades razoáveis, mas entre as desvantagens podemos incluir:

- Restrito a operações não suscetíveis a danos aos equipamentos devido aos marcadores metálicos (por exemplo, travamento na abertura do britador) ou interferência com os processos de separação metálica do minério.
- Ao contrário dos sacos marcadores visuais, apenas um marcador magnético pode ser alocado em cada furo.

É necessária uma distância horizontal adequada entre os marcadores para evitar interferência. A pesquisa inicial de Gilbride *et al.* foi evidentemente continuada e Harris *et al.* (1999 e 2001) relatam um sistema usando um gradiômetro de césio (Cs) à vapor e um receptor GPS para localizar os marcadores magnéticos pré e pós-desmonte. Eles relatam que o movimento horizontal da rocha pode ser medido com uma precisão de  $\pm 1$  m e o movimento vertical com uma precisão de  $\pm 1,2$  m, a uma profundidade de 15 m abaixo da superfície.

## Descrição do Sistema BMM de Monitoramento do Desmonte de Rochas

O sistema consiste em um transmissor de plástico de 150 mm de diâmetro, Figura 2, que é alocado em um furo dedicado de monitoramento na malha de perfuração para o plano de fogo. Para os testes apresentados aqui, as unidades estavam normalmente localizadas entre os furos carregados, cerca de 3 m de distância do furo carregado mais próximo, mas foram localizadas a menos de 1,4 m em alguns casos. De 10 a 15 transmissores foram instalados para cada plano de fogo cerca de duas horas antes do desmonte o desmonte, instalação ilustrada na Figura 3. A posição inicial do transmissor é determinada a partir da localização do 'collar' (boca) do furo, que é realizada pela equipe de topografia e da profundidade medida.



*Figura 2. Projeção interna do transmissor BMM e seu encapsulamento plástico*

Imediatamente após o desmonte, cada transmissor é localizado usando um detector especialmente desenvolvido (Figura 4). A localização do transmissor, na superfície da pilha desmontada, é determinada de forma direta e não requer processamento de dados, enquanto a profundidade é determinada a partir de uma calibração de atenuação do sinal de detecção. Uma marca é pintada na superfície da pilha desmontada, e esse ponto é levantado pela topografia posteriormente. Uma vez que as coordenadas inicial e final são conhecidas, um cálculo é feito para determinar os vetores de movimento horizontal e tridimensional (onde o vetor horizontal é a projeção do vetor tridimensional no plano cartesiano). Dependendo da disponibilidade de pessoal da operação, esses vetores de movimento tridimensional para cada transmissor podem estar disponíveis em cerca de duas horas após a detonação.

Para avaliar a precisão do sistema, vários transmissores foram recuperados em campo e suas posições levantadas. Uma comparação entre a localização estimada e a localização de fato levantada fornece uma medida da precisão do sistema. O erro é estimado entre  $\pm 0,1$  m e  $\pm 0,5$  m, dependendo da profundidade (o erro aumenta com a profundidade).



*Figura 3. Instalação do monitor de movimento BMM (cilindro branco na boca do furo)*



*Figura 4. Detecção dos monitores BMM na pilha desmontada logo após o fogo*

## Metodologia

### Definição das novas liberações de minério

Conforme descrito acima, uma vez que as coordenadas inicial e final são conhecidas. Calcula-se os vetores de movimento horizontal e tridimensional. A determinação dos vetores de movimentação é apenas o primeiro passo para reduzir a perda e a diluição do minério. A próxima etapa é traduzir a localização original das liberações de minério para sua localização pós-desmonte. Existem duas maneiras de fazê-lo:

- (A) Utilizar vetores que foram medidos para o desmonte específico e então calcular uma média ponderada da distância (ou outro método adequado) para determinar o vetor de movimento em cada vértice do polígono que define o corpo de minério, ou;
- (B) Estimar os vetores de movimento médio para várias regiões da malha a partir de dados e experiência obtidos de planos de fogo semelhantes e, em seguida, utilizar os dados para construir um modelo de movimento do desmonte.

Embora existam medições diretas para cada um dos fogos apresentados neste relatório, elas não foram usadas para translação direta do corpo de minério. O procedimento utilizado aqui foi tomar a direção média medida para o desmonte (qualquer lado da linha central, se apropriado) e combiná-la com a distância média derivada de todas as medições (dentro de um mesmo corte). Essa abordagem foi usada pelos seguintes motivos:

- Um dos objetivos dos testes era usar os resultados para fornecer diretrizes (um modelo de movimento) para estimar vetores de movimento, reduzindo a necessidade de monitorar continuamente futuros desmontes. Portanto, a análise apresentada aqui é equivalente ao que as operações de mina provavelmente fariam no futuro;
- Existe uma relação direta entre a distância do movimento e a profundidade (consulte a Figura 8). Ou seja, o movimento horizontal aumenta à medida que a profundidade aumenta (até pelo menos 7 m) e não é válido usar um vetor de movimento de, digamos, 2 m de profundidade para traduzir o movimento no fundo da bancada.

## Definição da Perda e Diluição de Minério

A perda ocorre quando o minério é classificado incorretamente como estéril, por qualquer motivo, e enviado para a pilha de estéril. Da mesma forma, a diluição ocorre quando o estéril é enviado para a planta de processamento. A Figura 5 ilustra um esboço simplificado das regiões em que ocorrem a perda e diluição quando um corpo de minério se move durante a detonação, mas é extraído no local definido originalmente. O retângulo grande, em rosa, representa o limite efetivo da malha e os pequenos círculos dentro do retângulo são os furos do plano de fogo. A localização original do corpo de minério é representada pelo retângulo sólido sombreado em verde. Uma seta grossa indica a direção do movimento e, neste caso, é perpendicular ao corpo de minério. As linhas tracejadas representam a localização do corpo de minério após ser deslocado pelo desmorte. A perda de minério é o material dentro do limite pós-desmorte, mas não dentro do limite pré-desmorte (hachura em azul). Diluição é o material dentro do limite pré-desmorte, mas não dentro do limite pós-desmorte (hachura horizontal tracejada em verde). Em termos práticos, se o corpo de minério foi marcado em seu local original e escavado, então a área designada como diluição é na verdade estéril e é enviada para a planta de beneficiamento. Da mesma forma, a área que é designada como estéril, mas que na verdade é minério, seria lavrada como estéril e então descartada.

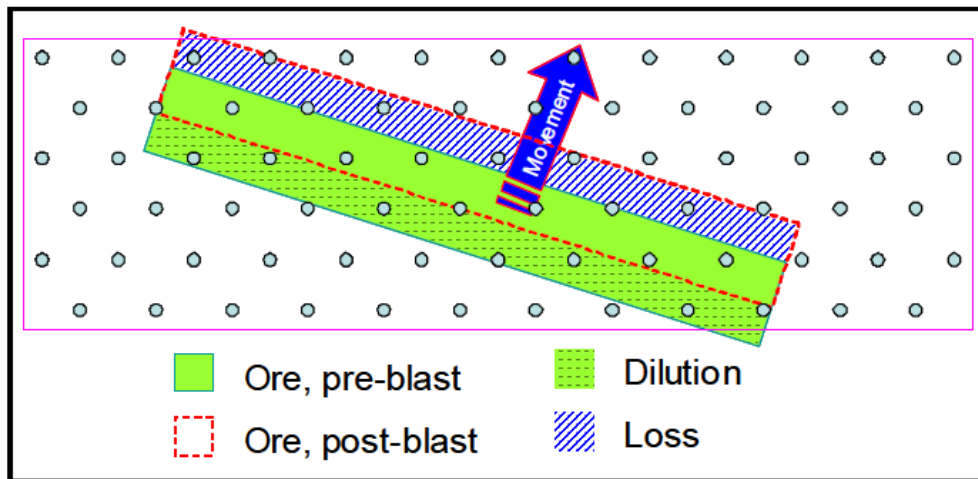


Figura 5. Como a diluição ('dilution') e perda de minério ('loss') ocorrem devido ao movimento do corpo de minério

## Efeito dos Limites da Malha

O maciço rochoso não se move para fora do limite "efetivo" do desmorte. Ou seja, o material detonado se afasta do limite. Portanto, se um corpo de minério interceptar um limite de uma malha, apenas a parte do polígono dentro do limite do plano é transladada (Figura 6 (a)). Finalmente, as regiões de perda e diluição são marcadas (Figura 6 (b)). Se o minério que se move além do limite do desmorte ainda estiver dentro de um corpo de minério, ele não é considerado perdido, uma vez que se espera que seja lavrado com o corpo de minério do desmorte adjacente.

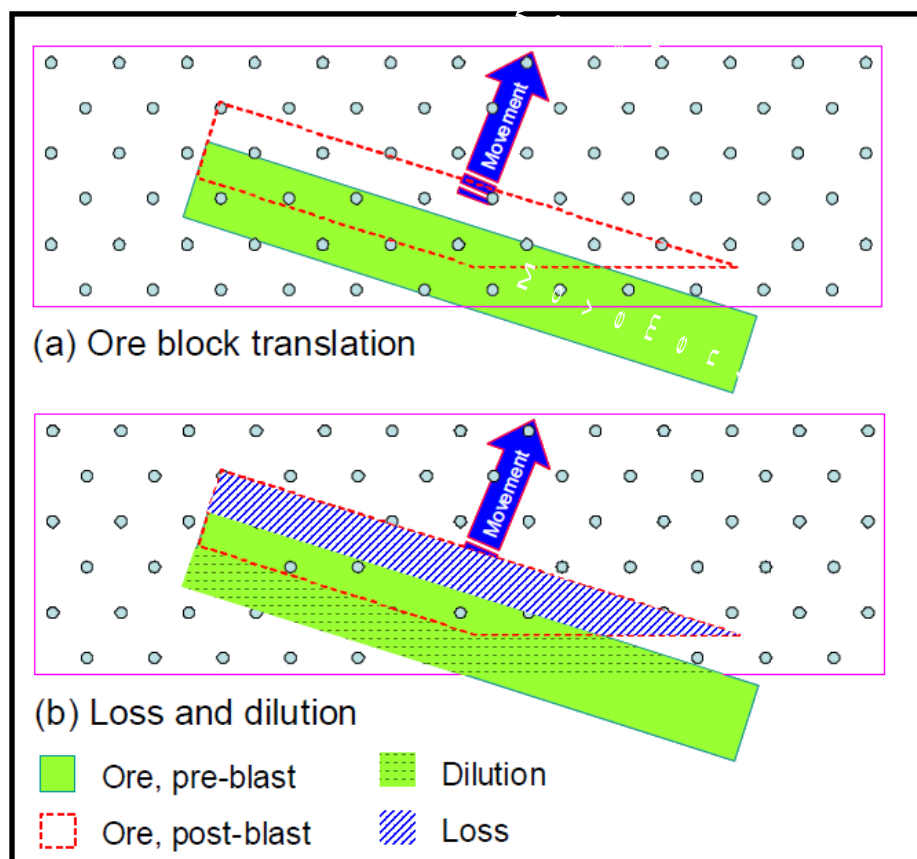


Figura 6. Movimento só é computado dentro dos limites do plano de fogo

## Resultados

Os seguintes resultados do trabalho realizado em campo são de uma mina de ouro a céu aberto operada pela Placer Dome Inc. Os parâmetros do plano de fogo utilizado na mina durante o estudo estão resumidos na Tabela 1. A razão de carga é relativamente alta em 0,43 kg/t, mas isso se deve a um conglomerado de minério “cimentado” que é tradicionalmente difícil de quebrar. O plano foi ajustado para uma área menor em um esforço para auxiliar os problemas de fragmentação pobre que ocorriam. Além disso, a sub-perfuração foi aumentada e a altura do tampão diminuída durante o processo de otimização desse fogo. Infelizmente, razões de carga mais altas frequentemente significam um maior deslocamento de minério. A solução de usar mais energia explosiva para melhorar a fragmentação agravou o delineamento preciso das regiões de minério e estéril dentro das pilhas desmontadas resultantes nesta operação.

Tabela 1. Parâmetros do Plano de Fogo

Afastamento, m	5.5
Espaçamento, m	6.5
Diâmetro do Furo, mm	229
Sub-Perfuração, m	1.8
Tampão, m	4
Malha Estagiada	Sim
Coluna de Explosivos, m	7.8
Densidade Explosivo	1.25
Massa Explosivo, kg	400
Razão de Carga, kg/t	0.43



## Detecção dos Transmissores

O número total de transmissores instalados em 12 planos de fogo foi de 81, sendo que 68 foram detectados (84%). Suspeita-se que a maioria dos transmissores “perdidos” se encontravam em grandes profundidades, como evidenciado na maior perda para os cortes inferiores (Tabela 2). Isso era particularmente verdadeiro para os desmontes menores e mais confinados que resultavam em maior empolamento. Além disso, alguns transmissores provavelmente foram lançados além da borda da bancada.

Tabela 2. Resumo Detecção dos Transmissores BMM

	Corte Superior	Corte Inferior	Total
Número	51	30	81
Detectados	46	22	68
Porcentagem (%)	90%	73%	84%

## Vetores de Deslocamento

O movimento horizontal médio do corte inferior foi aproximadamente duas vezes maior do que o do corte superior, 9,3 m e 4,7 m, respectivamente (Tabela 3). Isso é esperado, uma vez que a maior parte da carga explosiva está no fundo da bancada e a energia da carga explosiva e, portanto, sua influência sobre a massa rochosa circundante, reduz-se muito rapidamente com o aumento da distância. A Figura 7 é um histograma do movimento horizontal de todos os testes separados por corte superior e inferior. O movimento diferente de várias regiões no desmonte (limite frontal, limite traseiro, bordas e corpo da malha) causa a natureza multimodal dos histogramas.

Tabela 3. Resumo do Deslocamento Horizontal para todos os resultados ‘confiáveis’

	Deslocamento Horizontal (m)	
	Corte Superior	Corte Inferior
Média	4.7	9.3
Máximo	11.7	15.4
Mínimo	1.0	4.9

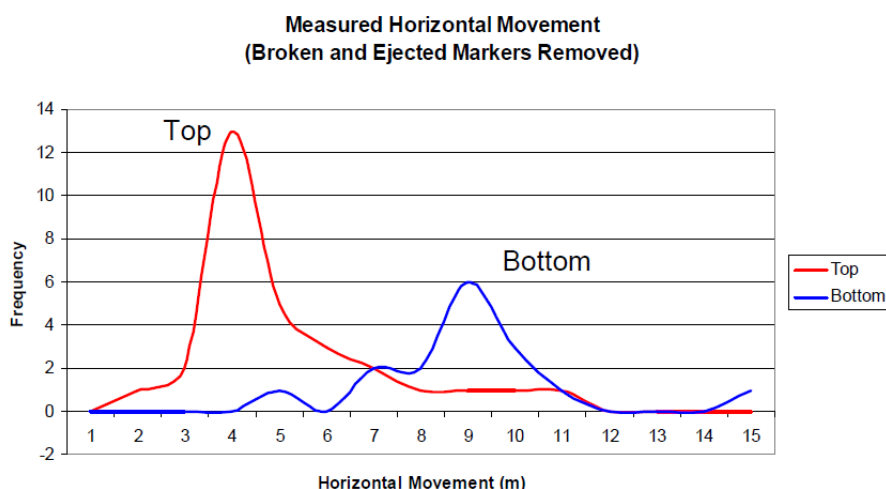


Figura 7. Histograma de Deslocamento Horizontal para os dois cortes (superior – “top” e inferior – “bottom”) na bancada.

A Figura 8 é um gráfico do movimento horizontal traçado contra a profundidade inicial de instalação do transmissor. Embora haja muita dispersão nesses dados, há claramente uma relação direta, com o movimento aumentando com a profundidade. Os dados foram subdivididos em quatro regiões (limite frontal – ‘front’, limite traseiro – ‘back’, bordas – ‘edge’ e corpo da malha – ‘body’). Por exemplo, a borda da cava parece ter uma influência significativa na distância e direção do movimento no corte superior, mas pouca influência no corte inferior. Isso não é surpreendente, pois a “carga da borda” é muito maior na parte inferior da bancada do que na parte superior. Em segundo lugar, próximo à linha traseira, o movimento no corte inferior é maior do que a média, mas menor no corte superior. Na verdade, o movimento horizontal mínimo para toda o desmonte ocorre no limite traseiro, perto da superfície, enquanto o movimento máximo ocorre em profundidade também no limite traseiro. Este resultado confirma as evidências de vídeo com câmeras de alta-velocidade coletadas pelos pesquisadores de outra mina que mostraram a superfície na parte de trás do desmonte “caindo” na cratera gerada, o que damos o nome de “zona de trincheira”.

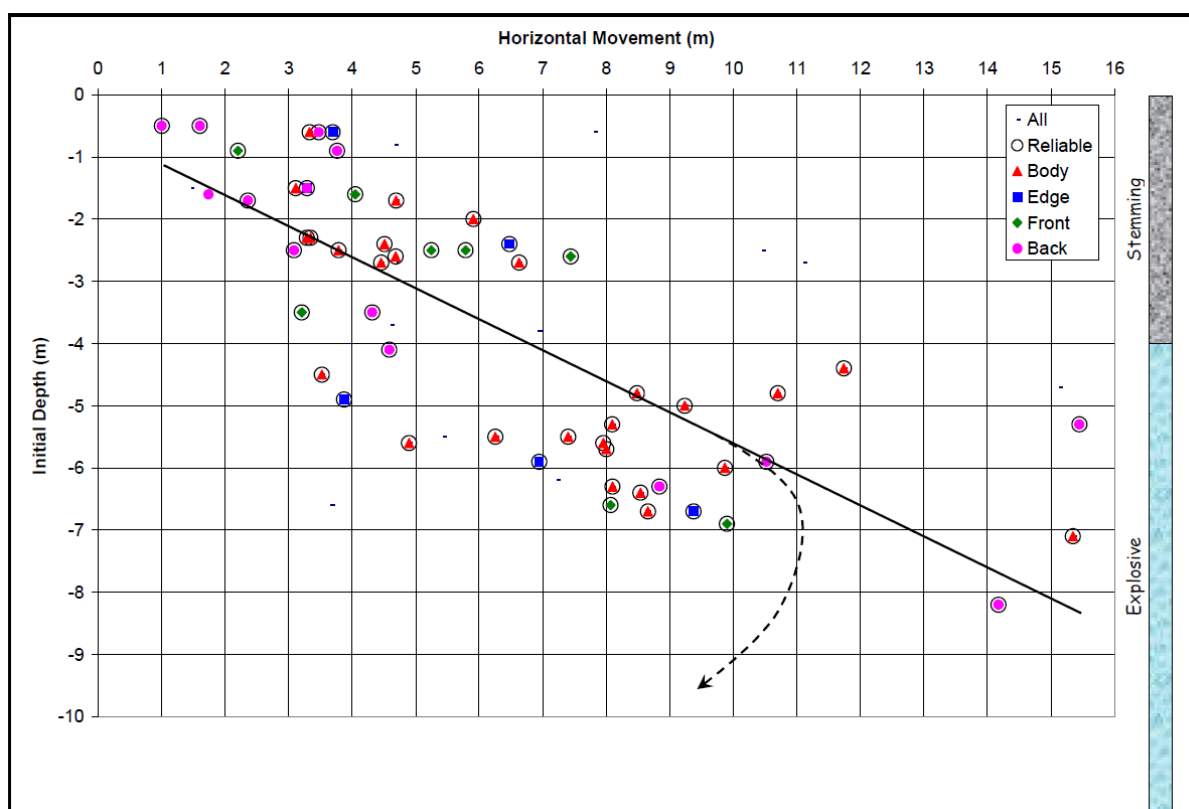


Figura 8. Gráfico de Deslocamento Horizontal x Profundidade Inicial. Representação do Perfil vertical à direita.

A Figura 9 mostra um plano de fogo típico, onde os furos carregados de explosivos são os pequenos círculos com os retardos entre eles. Os contornos do tempo de iniciação são as linhas onduladas. Setas ligando as localizações inicial e final dos monitores de movimento de explosão indicam os vetores de movimento. A direção do movimento é normalmente perpendicular aos contornos de tempo, conforme esperado da teoria de detonação.

A Figura 10 mostra o movimento de um corpo de minério de alto teor dentro do corte inferior de uma das malhas monitoradas (consulte a Figura 6 para uma explicação completa do diagrama). Se o minério for extraído de sua localização original, aproximadamente 50% do corpo de minério seria perdido ou cerca de 1200 onças de ouro. Houve casos em que corpos de minério estreitos foram orientados perpendicularmente à direção do movimento, resultando em perda potencialmente completa das liberações de minério se esta fosse extraído em seu local original.

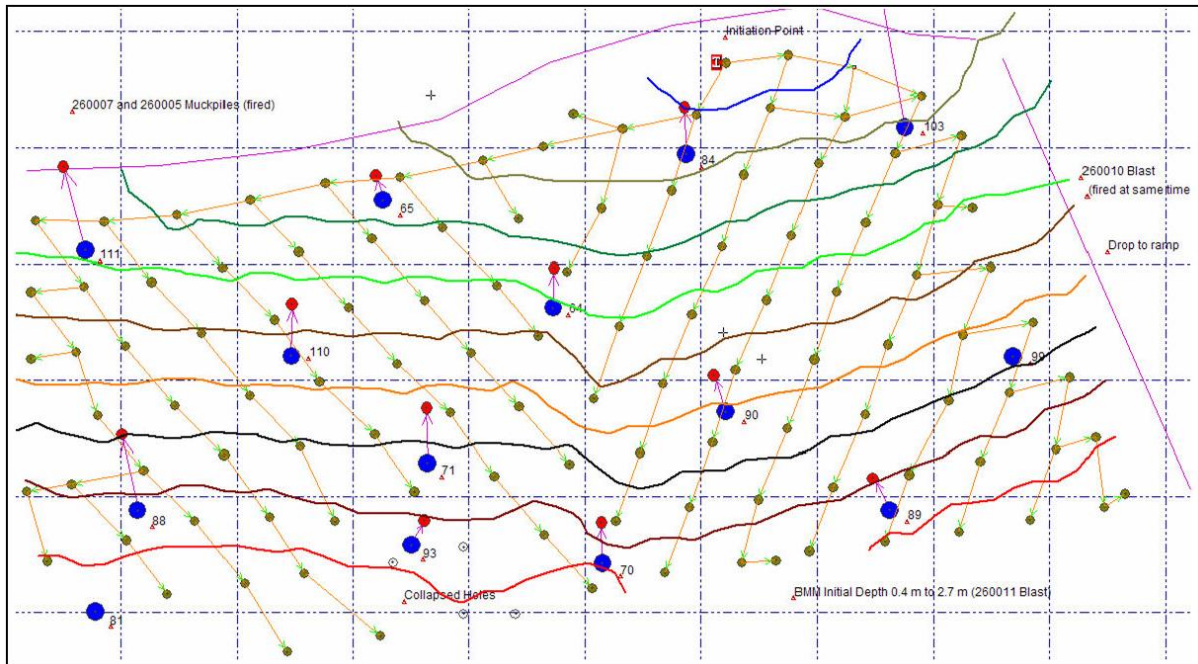


Figura 9. Plano de Fogo com contornos de tempo e vetores de deslocamento horizontal

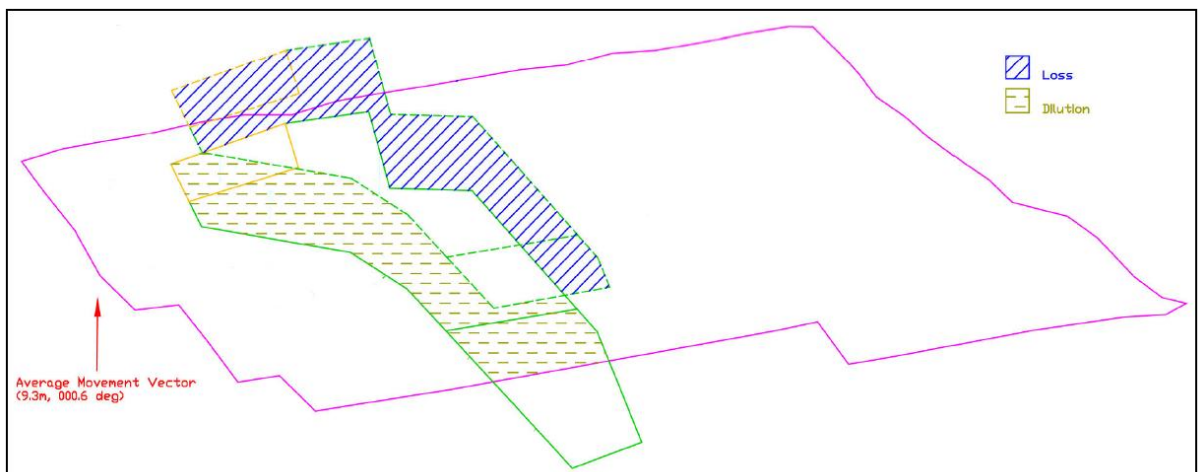


Figura 10. Representação do deslocamento real da liberação de minério (corte inferior – potencialmente 1200 onças de ouro perdidas)

## Conclusões

O objetivo do trabalho de campo foi desenvolver um modelo de movimento para o padrão de detonação atual visando aplicação para futuras detonações semelhantes. A direção do movimento era tipicamente perpendicular aos contornos do tempo de iniciação, confirmando o que se espera da teoria. O movimento médio do minério no corte superior foi de 4,7 m. A média no corte inferior foi de 9,3 m. Com o movimento horizontal máximo medido de 15,4 m. Para os corpos de minério nos respectivos cortes, esses valores de deslocamento foram utilizados para estimar o custo de perda e diluição do minério para os fogos monitorados. O valor potencial de ouro perdido nas oito malhas de minério monitoradas foi estimado em mais de US\$ 1,5 milhão, enquanto o custo de diluição (processamento do estéril) foi de cerca de US\$ 0,5 milhão. A perda de minério custa cerca de três vezes mais do que a diluição.

O movimento durante um desmonte era geralmente consistente em termos de direção e distância, com algumas exceções que geralmente podiam ser explicadas. As medições demonstraram que a distância de deslocamento aumenta à medida que a profundidade aumenta (pelo menos a uma profundidade de 7 m) e é para cima, exceto na zona de trincheira, em que temos o movimento descendente do material na bancada superior. Há evidências de que a borda da cava "atrai" material do topo da bancada, mas esse efeito diminui com a profundidade. Isso se deve à redução da carga na parte superior da bancada ao longo da borda. A consistência e previsibilidade com que o movimento foi medido é muito encorajadora e permitirá modelos mais precisos no futuro.

### Vantagens do Sistema

Em comparação com os métodos existentes para medir o movimento do desmonte, o sistema descrito tem as seguintes vantagens:

- Baixo impacto na operação (pouca interferência nas operações de detonação);
- Disponibilidade de resultados logo após o desmonte e antes do início da escavação;
- Vetores de movimento tridimensionais precisos;
- Alta sobrevivência dos detectores e boas taxas de detecção;
- Custo relativamente baixo

### Trabalhos Futuros

Com base nos resultados positivos dos novos transmissores de movimentação de minério, as pesquisas continuam nesta área crítica da engenharia de minas e extremamente benéfica para o controle de teor. Existem certos aspectos do sistema que não foram totalmente quantificados e existem outras melhorias que tornarão o sistema mais prático para o uso rotineiro da mina. Os tópicos de pesquisa a serem investigados provavelmente incluirão:

- Prolongamento da vida útil da bateria de oito horas para vários meses;
- Redução do diâmetro dos transmissores para caber em furos com menos de 100 mm de diâmetro;
- Melhoria da taxa de sobrevivência do transmissor eletrônico;
- Desenvolvimento de identificação única para cada transmissor para permitir várias unidades por furo;
- Melhoria da transmissão do sinal através de mais de 10 m de rocha;
- Desenvolvimento de modelos e software para vinculação a pacotes de modelagem de corpos de minério.

## Referências

Gilbride, L, Taylor, S and Zhang, S, 1995, "Blast-Induced Rock Movement Modelling for Nevada Gold Mines", Mineral Resources Engineering, Vol. 4, No. 2, pp 175-193.

Harris, G W, Mousset-Jones, P and Daemen, J, 1999, "Measurement of Blast-induced Rock Movement in Surface Mines by Application of Magnetic Geophysics", Trans. Institution of Mining and Metallurgy (Sect. A: Min. industry), 108, September-December 1999.

Harris, G W, Mousset-Jones, P and Daemen, J, 2001, "Blast Movement Measurement to Control Dilution in Surface Mines", CIM Bulletin, Vol 94, No. 1047, pp 52-55.

Taylor, S L, 1995, "Blast-induced Movement and Its Effect on Grade Dilution at the Coeur Rochester Mine", M.Eng. Sc. thesis, Mackay School of Mines, University of Nevada.