

Aplicação da Metodologia de Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos Utilizando Filmagem de Furos

Arthur Resende Matos

MecRoc Engenharia, Belo Horizonte - MG, Brasil, arthur.matos@mecroc.com.br

João Pedro Barbosa Amaral

AngloGold Ashanti, Crixás - GO, Brasil, jbamara@AngloGoldAshanti.com.br

Alexandre Assunção Gontijo

MecRoc Engenharia, Belo Horizonte - MG, Brasil, alexandre.gontijo@mecroc.com.br

Lucas Martins da Costa do Nascimento

Vale, Corumbá - MS, Brasil, lucas.nascimento1@vale.com

Leonardo Pereira da Silva

Vale, Corumbá - MS, Brasil, leonardo.silva2@vale.com

RESUMO: Esse trabalho visa apresentar um método de monitoramento para a investigação de problemas geomecânicos, utilizando câmera de filmagem de furos em ambientes subterrâneos. A metodologia apresentada é baseada na utilização de imagens geradas por uma microcâmera de alta resolução de modo a promover investigação e caracterização de maciços rochosos. Este método está sendo implementado a um novo equipamento denominado *HoleCam*. Serão apresentados, desde as características do equipamento, à resultados das filmagens em dois estudos de caso realizados. Por fim, será apresentada uma interpretação dos dados onde foi possível observar que o equipamento, devido a qualidade das imagens geradas, possibilita caracterizar de forma detalhada os aspectos geomecânicos do maciço rochoso como principais descontinuidades, grau de fraturamento, condição de água, contatos litológicos e condição do maciço anterior e posterior aos desmontes de rochas.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento Subterrâneo, Filmagem, Microcâmera, Caracterização geotécnica.

ABSTRACT: This work aims to present a monitoring method for the investigation of geomechanical problems, using a camera to record holes in underground environments. The presented methodology is based on the use of images generated by a high resolution microcamera in order to promote investigation and characterization of rock masses. This method is being implemented in a new equipment called *HoleCam*. It will be presented the equipment features as long with the results of this monitoring by two study cases. Due to the quality of the images generated by the *HoleCam*, it was possible to characterize the rock mass in terms of the main discontinuities, fracturing degree, water condition, lithological contacts and rock mass condition changing after blasting.

KEYWORDS: Underground Monitoring, Filming, Microcamera, Geotechnical characterization.

1 Introdução

Uma variedade de equipamentos e métodos de monitoramento são usados rotineiramente durante a investigação de problemas geomecânicos. Uma ferramenta adicional que pode ser adicionada à caixa de ferramentas é a câmera de investigação de furos. Embora não seja exatamente uma tecnologia nova, a câmera de investigação de furos se tornou nos últimos anos mais razoável em preço e mais portátil, tornando-se mais acessível a um número maior de profissionais em mineração. Uma grande quantidade de informações geotécnicas pode ser obtida e documentada pelo uso de uma câmera acoplada a um gravador de vídeo.

O uso de uma câmera de furos em uma investigação qualitativa de perfurações pode produzir informações que de outra forma não seriam obtidas. A câmera permite a confirmação dos locais de estratigrafia, fratura e separação do plano das camadas, zonas de entrada de águas subterrâneas, acentuação da fratura devido à subsidência da mina, desmonte e outras operações unitárias. Combinada com outros instrumentos, a câmera de investigação de furos pode melhorar bastante as informações derivadas individualmente. Se as circunstâncias impedirem o uso de dois instrumentos ao mesmo tempo (por exemplo, o diâmetro do furo é muito pequeno), o vídeo da filmagem do furo também pode ser colocado lado a lado com dados de vários outros instrumentos de monitoramento, para poder vincular as características do furo aos parâmetros medidos. (Hawkings & Evans, 2004).

Muitas minas estão utilizando a câmera de furo com sucesso. Um exemplo é a Mina de Louvicourt, onde a câmera foi utilizada para fornecer informações valiosas sobre o comportamento do maciço rochoso durante o estágio inicial de projeto da mina (Germain, 1995). Antes que a lavra de um dos primeiros blocos do realce fosse iniciada, foi realizada uma pesquisa básica durante a qual o furo foi fotografado em intervalos de 0,3 metros. À medida que a lavra progrediu, as pesquisas de câmera de furo foram conduzidas em base regular, permitindo observação de desenvolvimento e abertura das fraturas e juntas dentro do maciço rochoso (Hutchinson e Diederichs, 1996).

Outro exemplo está nas pesquisas utilizando câmera de furo conduzidas na mina de Ansil (Hutchinson, 1992), as quais forneceram algumas das informações mais importantes coletadas durante o programa de instrumentação, pelo fato de terem fornecido a visualização da localização das fraturas e juntas abertas. Além disso, os horizontes dentro do maciço rochoso onde as paredes do furo fraturaram devido a altos níveis de tensão foram observados com a câmera (Hutchinson e Diederichs, 1996).

Segundo Hutchinson e Diederichs (1996), sempre que possível, devem ser feitos registros de microcâmera nos furos onde outros instrumentos de monitoramento são instalados. O registro da microcâmera fornecerá informações sobre a localização de estruturas preexistentes na extensão do furo. A localização do movimento dentro do maciço rochoso pode ser melhor entendida quando as informações da microcâmera de furo estiverem disponíveis, desde a pesquisa inicial até os furos adjacentes que são registrados regularmente. (Cota, 2011).

2 Objetivo

O objetivo principal dessa investigação é entender o comportamento do maciço rochoso perante os desmontes do sequenciamento da mina de maneira a estimar a extensão da zona plastificada do maciço. Além disso, objetiva-se caracterizar o maciço rochoso ao longo do furo quanto aos seguintes aspectos: grau de faturamento; presença de discontinuidades persistentes; água subterrânea; quebras ao longo do furo (profundidade e tamanho). Por último, deseja-se entender o motivo das quebras existentes nas paredes do furo tendo em vista que podem ser causadas por detonações próximas ou pela própria perfuração.

O sistema de monitoramento foi realizado na Mina Urucum, de propriedade da VALE, localizada na cidade de Corumbá – MS, e em uma mina subterrânea *hard rock* de ouro no Quadrilátero Ferrífero (QF); neste trabalho serão apresentados os resultados das filmagens, além de uma interpretação dos dados.

3 Estudos de Caso

3.1 Mineração Subterrânea Câmaras e Pilares

O primeiro estudo de caso foi desenvolvido na Mina de Urucum, uma operação subterrânea da Vale, que utiliza o método de câmaras e pilares para recuperação de Manganês. Nesse método demonstrado na Figura 1, o minério consiste em camadas horizontalizadas sendo escavado deixando-se pilares verticais como suporte para teto e piso.

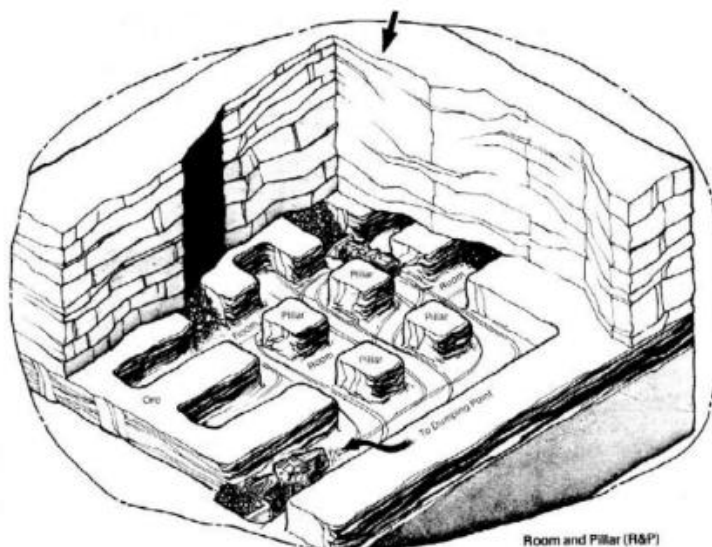


Figura 1: Ilustração do método câmaras e pilares (Harraz, 2014 – Underground Mining Methods)

O maciço rochoso da mina Urucum é formado por um depósito sedimentar. Acima da camada de Manganês, estão presentes as litologias Arcósio e Jaspilito. Assim as filmagens foram realizadas em furos investigando características do maciço presente nessas configurações.

A campanha de filmagens foi dividida em duas etapas no monitoramento de tetos e pilares das escavações, sendo que primeiramente realizou-se a filmagem em furos antes e após detonações, com intuito de estimar a zona de dano causada pelo desmonte. A segunda campanha foi em pontos selecionados pela equipe de mecânica de rochas da Vale para caracterização do maciço rochoso.

3.2 Mineração Subterrânea *Sublevel Open Stopping*

O segundo estudo de caso foi desenvolvido em uma Mina *hard rock*, uma operação subterrânea, que utiliza o método de *Sublevel Open Stopping* para exploração de Ouro.

Devido a uma desarticulação ocorrida no *hanging wall* de um painel de lavra, posterior à desmontes de leques em recuo do mesmo painel, foi realizada uma campanha de investigação qualitativa, utilizando a câmera de filmagem (*HoleCam*).

O principal objetivo dessa investigação é conhecer o grau de fraturamento do maciço rochoso para entender se o dimensionamento de cabos, desde malhas e comprimentos, será efetivo para a continuidade da lavra nesse mesmo painel. Além disso, essa investigação visa entender o comportamento das perfurações de *cable bolt* antes da injeção da argamassa, ou seja, avaliar se existem pontos de fuga de *grout* (argamassa), devido a rupturas prematuras no maciço rochoso.

4 Metodologia

4.1 Instrumento Utilizado

A câmera utilizada na obtenção das imagens é denominada de *HoleCam*, ela é adequada para furos de mineração e seu cabeçote *CCD Sony* de 1/3 polegada, com ângulo de visão de 120° permite visualizar e fotografar e/ou televisar as paredes ao longo da extensão do furo (Figura 2).



Figura 2. Detalhe da *Hole Cam* e suas funções

4.2 Caracterização do Maciço Rochoso

Caracterizou-se o maciço adjacente dos furos monitorados¹ com o uso de uma ficha de descrição para cada furo. O furo foi dividido em trechos conforme os domínios geotécnicos constatados, geralmente diferenciados pela litologia. A cada trecho, atribui-se o intervalo em metros (a partir colar da perfuração), configurando a potencia de cada camada e foram realizadas capturas de telas na mesma profundidade da filmagem antes e após as detonações para verificar ocorrência de danos. Com análise qualitativa, identificou-se propriedades do maciço rochoso de cada trecho usando aspectos geomecânicos como grau de fraturamento² (Figura 3), presença de gua subterrânea, além da localização e determinação do tamanho de quebras ao longo do furo. Um exemplo de ficha de descrição com as informações mencionadas acima está na Figura 4. Atribuiu-se 3 condições para presença de água: seco, úmido e ocorrência de fluxo.

GRAU 3	GRAU 2	GRAU 1
Fraturamento centimétrico	Fraturamento milimétrico	Ausência de fraturamento
0.53m / 2.0ft	1.43m / 4.69ft	4.88m / 16.0ft

Figura 3: Classificação do grau de fraturamento com exemplos

¹ Para a análise preliminar, foram selecionados alguns furos como representantes de cada região da mina.

² O grau de fraturamento foi classificado de acordo com padrão criado em três diferentes níveis.







Trecho	1	2	3
Início (m)	0	0.8	1.8
Fim (m)	0.8	1.8	5.6
Potencia (m)	0.8	1	3.8
Litologia	Jaspelito	Arcosio	Jaspelito
Água subterrânea	seco	seco	seco
Fraturamento	Grau 3	Grau 2	Grau 3
Descrição e Imagem 22/05	fraturamento grau 3 ao longo do furo Fraturas por tração/tensão (Stress fracturing)	Maciço sem fraturamento significante Abertura no contato com jaspelito Planos de descontinuidade interceptando entre 1.4 e 1.7	Fraturas por tração/tensão (Stress fracturing) Descontinuidade marcante ao longo do eixo do furo
			
Descrição e Imagem 23/05	Sem alteração considerável após ultima filmagem	Sem alteração considerável após ultima filmagem	Sem alteração considerável após ultima filmagem
			

Figura 4: Exemplo de Ficha de Descrição de furo

5 Resultados

5.1 Estudo de Caso 1

Não foram identificadas alterações no maciço adjacente aos furos a ponto de constatar dano devido ao desmonte de rochas. Esse fato pode ser atribuído à formação de famílias de fraturas (*stress fracturing*³) oriundas da manobra de perfuração roto-percussiva. Esse fraturamento induzido ao longo do eixo do furo, principalmente no Jaspelito, dificulta a identificação de novas fraturas, mesmo que pequenas, após a detonação. Esse fato é constatado comparando imagens dos furos realizados com essas diferentes técnicas: perfuração rotativa (furos de sondagem) e perfuração roto-percussiva como ilustra a Figura 5.

³Família de fraturas semelhantes ao fraturamento induzido pela perfuração e desmonte ao abrir uma escavação (Padula, 2016).



Figura 5: Influência da técnica de perfuração no fraturamento.

Foram observadas quebras consideráveis nos contatos entre as litologias principalmente Jaspilito/Arcósio, provocando aberturas variando de 60 mm a 120 mm. Além disso, as imagens evidenciaram a presença de uma descontinuidade marcante com plano semiparalelo a direção do eixo do furo no Jaspilito. A Figura 6 ilustra essas situações na filmagem de furo localizado no teto:

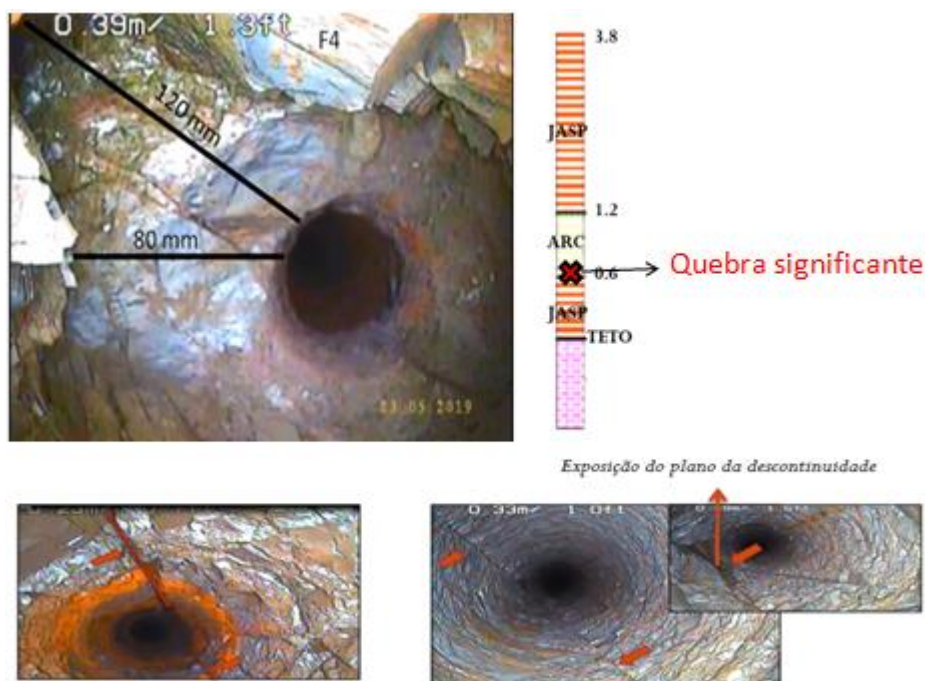


Figura 6: Quebra significativas no contato litológico e descontinuidade marcante observada no Jaspilito

Identificou-se fraturamento grau 3 próximo ao colar dos furos monitorados nos pilares constituídos por Manganês. Quanto a presença de água, constatou-se fluxo em poucos furos, sendo a maioria classificados como secos, conforme ilustra Figura 7.

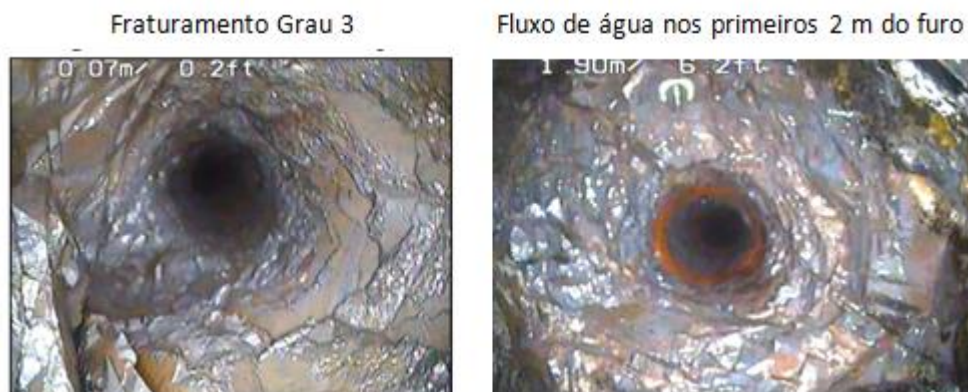





Figura 7: Classificação quanto ao fraturamento e presença de água

5.2 Estudo de Caso 2

Definiu-se executar a filmagem em uma linha de furos para cabeamento no *hanging wall*, à 21m da desarticulação, com perfurações de 10m de profundidade. Na quadro 1 abaixo são apresentadas, em formato fotográfico, as quebras identificadas em função da profundidade dessa perfuração.

Quadro 1: Classificação quanto ao fraturamento e presença de água

Zona de plastificação / descontinuidades abertas.		Zona de plastificação / descontinuidades abertas (mecanismo de ruptura: estrutural).	
Início de zona elástica / maciço competente.		Descontinuidade sem aberturas, com um preenchimento de cor escura.	

A análise das filmagens investigativas do furo, permite afirmar que ela apresenta uma zona plastificada de aproximadamente 1,5 m, com mecanismo de ruptura controlados estruturalmente. A Zona elástica inicia-se com 1,5 m e persiste até o final da perfuração, com algumas descontinuidades que merecem atenção. Sem indícios de quebras por esforços derivados de tensão.

Considerando que as filmagens foram realizadas em perfurações paralelas as perfurações de cabeamento, é possível concluir que o maciço, na zona elástica, apresenta uma vantagem para transferência de carga do sistema de cabeamento, porém, na zona plástica, que apresenta descontinuidades abertas, a operação de injeção de argamassa ascendente deve iniciar após a zona de plastificação, para minimizar “fuga” de argamassa.

6 Considerações Finais

Embora não seja a única ferramenta que uma equipe geomecânica possa ou deve usar durante um monitoramento, a câmera de investigação de furos é uma ferramenta extremamente útil. Ela oferece a capacidade de observar e registrar aspectos da subsuperfície por furos que, de outra forma, seriam desconhecidos.

Utilizada em conjunto com outros instrumentos e dispositivos, a câmera de investigação de furos maximiza significativamente a capacidade de adquirir informações e dados específicos. As informações obtidas com a câmera podem ser cruciais para tirar as conclusões corretas. A capacidade de documentar graficamente as observações feitas pela câmera (filmagens e fotos tiradas) ajuda na ilustração e, finalmente, na comprovação do caso, independentemente da fonte final do problema.

No estudo de caso 1, apesar de não mostrar com clareza a extensão da zona plastificada, foi possível detectar diversos aspectos do maciço rochoso como quebras significantes geradas em contatos litológicos. Essa informação é bastante importante no auxílio para dimensionar comprimento de reforço para o maciço. No estudo de caso 2, foi possível estimar a zona de plastificação. Esse dado pode ser usado tanto para aspectos operacionais como profundidade para inserção de argamassa quanto para calibrar modelos numéricos.

A partir desse trabalho algumas sugestões de futuros estudos são relevantes aos estudos, dito isso, sugere-se executar filmagens comparativas, após o avanço da lavra, para entender se a zona interna de plastificação se aprofunda, ou se mantém, além de entender se ocorrerá fenômenos acarretados por esforços induzidos pela dimensão da escavação.

Recomendamos também correlacionar as profundidades das quebras com testemunhos existentes, buscando entender se as rupturas são derivadas de esforços estruturais, ou devido a desmonte.

Além disso, é importante iniciar estudos de vibração induzidos por desmonte, buscando entender com qual carga máxima por espera (CME), o maciço rochoso se rompe por tração e/ou abre as descontinuidades existentes, para entender se as aberturas das descontinuidades estão relacionadas ao desmonte.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a VALE Urucum por dispor os dados para realização do trabalho e o apoio prestado que possibilitou a realização dessa investigação geotécnica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cota, R. F. (2011). Utilização de extensômetros e televisionamento de furos para estudo de estabilidade do Hanging Wall - realce 10.2 fonte grande sul, mina Cuiabá – Sabará/MG. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.183p.
- Golder Associates Brasil (2016) *Modelo Geomecânico Preliminar para a Mina de Manganês do Morro do Urucum*. Relatório interno da UrucumMineração SA, 23p.
- Hawkings, J. W., & Evans, R. S. (2004). *Uses of the Borehole Camera in Hydrologic Investigations Related to Coal Mining*. National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 25th West Virginia Surface Mine drainage Task Force, April 18-24, 2004. Published by ASMR, 3134 Montavesta Rd., Lexington, KY 40502.
- Hutchinson, D.J, Diederichs, M.S. (1996). *Cablebolting in Underground Mines*, Bitech Publishers Ltd, British Columbia, Canadá, 406p.
- Medida de abertura na parede dos furos: Software PicSure (Basrock-Softwares for Geotechs). Disponível em: <https://www.basrock.net/picture>.
- Padula, R. C. (2016). *Determinação de fatores de correlação a partir da caracterização do maciço rochoso na mina de Cuiabá - Sabará/MG*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.138p.