Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR 2018
Engenharia de Rochas no Desenvolvimento Urbano
Conferência Especializada ISRM 28 de Agosto a 01 de Setembro, Salvador, Bahia, Brasil
© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

Sistema de Monitoramento Contínuo de Convergência em Escavações Subterrâneas

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

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

Leandro Roque da Fonseca
MecRoc Engenharia, Belo Horizonte - MG, Brasil, leandro.fonseca@mecroc.com.br

Gustavo A. Batista
AngloGold Ashanti, Crixás – GO, Brasil, GABatista@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: Este estudo apresenta o desenvolvimento de um novo conjunto denominado Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rochas – SMDR, no qual é capaz de monitorar de forma contínua e simultânea deslocamento de rochas em ambientes subterrâneos. O sistema baseia-se na utilização de um módulo principal que processa e armazena os dados coletados pelos sensores ópticos de deslocamento de última geração. Esses elementos juntos compõem o monitoramento de convergência em tempo real. Será apresentada uma descrição detalhada do sistema, depois disso, um estudo de caso de uma mina subterrânea no qual teve o sistema de monitoramento "*online*" implementado. Os resultados mostraram que a tecnologia proposta foi capaz de caracterizar de forma muito mais detalhada, segura e abrangente, os deslocamentos que ocorreram em um ambiente subterrâneo, e consequentemente podem ajudar profissionais envolvidos na engenharia subterrânea a melhorar a capacidade de tomada de decisão rápida em escavações subterrâneas.

PALAVRAS-CHAVE: Convergência, Monitoramento, Mineração Subterrânea, Sistema Remoto

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de uma vigilância ou monitoramento de obras geotécnicas em tempo real faz-se necessário no cenário atual brasileiro, pois otimiza o processo e facilita tomadas de decisão rápida.

Em muitos casos o monitoramento, sendo remoto, pode controlar riscos constantes e qualquer dessas variações de resultados, ultrapassando limites já definidos, alarmes e sinais de emergência podem ser configurados e quando acionados, o local em estudo pode ser isolado até uma avaliação mais criteriosa com detalhes.

O objetivo deste sistema é caracterizar o comportamento das escavações no maciço rochoso dependente do tempo e determinar o quanto as vibrações induzidas pelas detonações o afetam. Com os dados adquiridos, é possível especificar o momento exato dos deslocamentos do maciço rochoso, bem como o momento exato das vibrações induzidas por desmonte, determinando, portanto, o comportamento de deslocamento espontâneo do maciço rochoso em relação ao tempo. Ao quantificar esses comportamentos, é possível prever, com precisão os deslocamentos, uma vez que a taxa de aquisição é continua, e dessa forma tomar decisões de modo mais assertivo.

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

A metodologia apresentada visa inovar os procedimentos de controle de convergência existentes, proporcionando maior segurança na coleta de dados e redução da exposição humana em ambientes de alto risco geotécnico.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

Quando uma abertura ou escavação subterrânea é executada em um maciço rochoso, as tensões *in situ* existentes (tensões tanto verticais como horizontais) são perturbadas e novas tensões são induzidas imediatamente em torno da escavação. Uma forma que se utiliza para representar este novo campo de esforços são linhas imaginárias em torno de um corpo elástico solicitado, ao longo do qual agem as tensões principais (Hoek e Brown, 1997).

Segundo Bieniawski, Z.T. (1974), as tensões induzidas têm uma influência direta na geometria e na forma das escavações. Em uma abertura circular e regular, a redistribuição dos esforços possibilita a ocorrência de um deslocamento radial na escavação, que pode assim levá-la ao colapso. De acordo com o campo de tensões a qual está submetida à escavação, pode-se, analiticamente, analisar quais são as tensões e os deslocamentos que agem em torno do raio da escavação[1].

A Figura 1 (*a* e *b*) detalha desde as linhas imaginárias que apresentam as trajetórias das tensões *in situ* principais, a redistribuição das mesmas, após a execução de uma abertura circular, juntamente com os deslocamentos radiais mobilizados. Com o objetivo de estabilizar a escavação, evitando uma possível ruptura do maciço rochoso, aplica-se uma pressão interna na abertura, por meio de estruturas de suporte/reforço, ou seja, aplica-se uma força no sentido contrário ao dos esforços impostos pelo maciço rochoso, buscando uma estabilização da escavação, que por sua vez, deve ser entendido, como um processo dinâmico.

[1] Para facilitar estas análises, considera-se um meio homogêneo, isotrópico e com comportamento elástico.

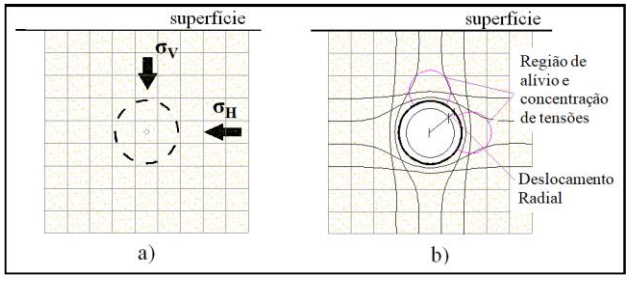

Figura 1. Comportamento das tensões verticais e horizontais antes e após a abertura de uma escavação e deslocamentos radiais associados. (Silva, 2015, adaptado)

Para melhor apresentar e entender a estabilização da escavação, o maciço rochoso pode ser subdividido em três regiões, sendo, uma zona sem danos, uma zona fraturada e uma zona plastificada (Figura 2).

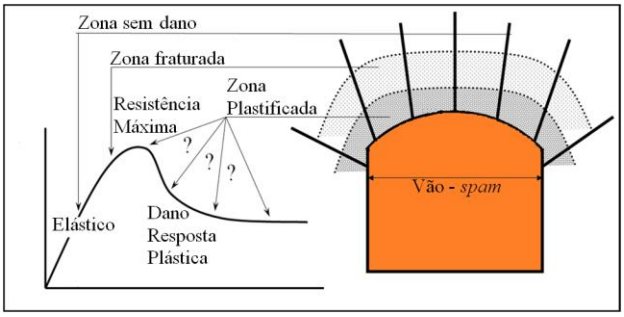

Figura 2. Distribuição das zonas do maciço rochoso: sem danos, fraturada e plastificada. (Lopez, 2012).

Segundo Silva (2015), a determinação do carregamento transferido ao suporte requer uma análise da interação das características carga-deformação dos elementos compreendidos no sistema, sendo, a seção da escavação, o suporte instalado em cada seção e o avanço do túnel.

O comportamento da seção da escavação é definido pela Curva de Reação do Maciço - GRC (*Ground Reaction Curve*), representada na Figura 3 pela curva ABC, iniciando no ponto A – onde a pressão interna é igual à tensão in situ, e terminando no ponto C, que corresponde a uma pressão interna igual a zero, e a máxima convergência possível. O ponto B define o encontro entre o comportamento elástico e o início da plastificação. Detalhes dos modelos constitutivos (elásticos ou elasto-plásticos)

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

podem ser melhor entendidos em livros tais como Duncan-Fama (1993) e Carranza-Torres (2004).

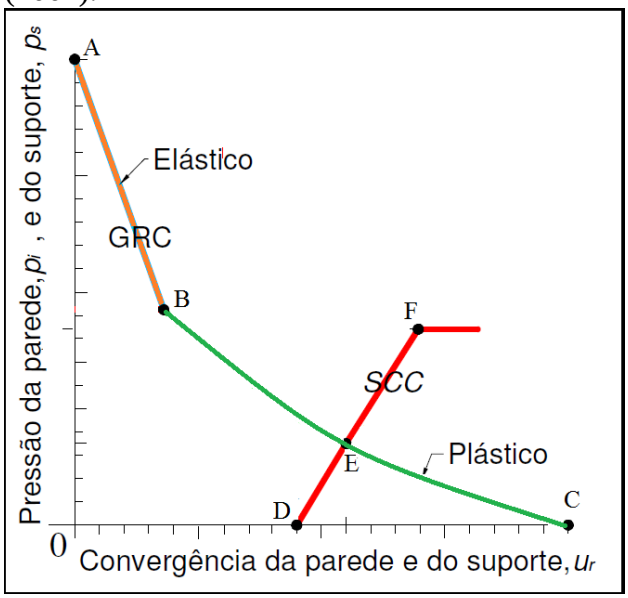

Figura 3. Curva de Reação do Maciço e Curva Característica do Suporte. (Silva, 2015, adaptado).

O suporte a ser instalado em cada seção é representado pelo elemento Curva Característica do Suporte – SCC (*Support Characteristic Curve*), que pode ser definido como sendo a relação entre a crescente pressão no suporte e o crescente deslocamento radial. Na mesma Figura 3, a SCC é representada pela curva DF, sendo o ponto D correspondente ao momento da instalação do suporte e o ponto F à capacidade máxima de suporte. Como informação adicional o ponto E é o momento adequado de instalar o sistema de fortificação, pois se instalado antes, será antecipado e necessários sistemas de maior rigidez, enquanto que posteriormente ao mesmo ponto, pode ser tardio o momento de instalação.

A Figura 4 detalha o comportamento de uma escavação em construção, em que a convergência se inicia aproximadamente a uma distância duas vezes o diâmetro da escavação, antes da face e a paralisação desse deslocamento radial tende a estabilizar cerca de duas vezes o diâmetro da escavação, após a face.

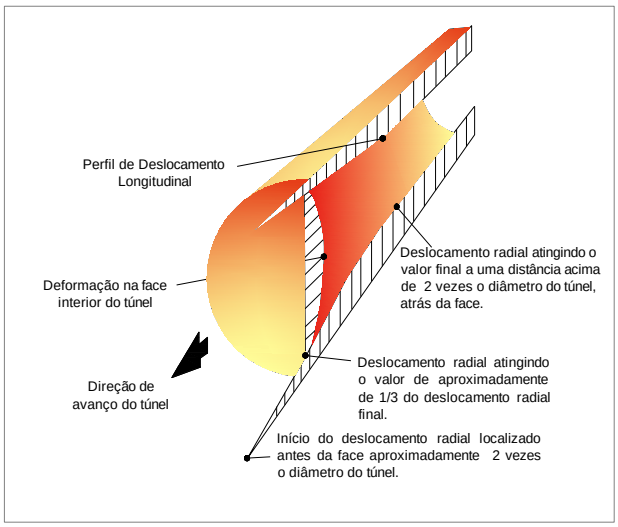

Figura 4. Comportamento da deformação/deslocamento em torno, no maciço rochoso, da construção de um túnel. (Carranza-Torres, 2004).

Apesar de, teoricamente, se concluir que a escavação se estabiliza, ou seja, tem sua convergência final no momento que esta abertura entra em equilíbrio (deslocamento radial e a capacidade de suporte), a uma distância conhecida da frente de escavação onde não existe mais influência da face, porém, em operações mineiras algumas particularidades são de comum acontecimento, onde é considerada uma atividade dinâmica, e devem ser analisados outros detalhes e teorias.

Segundo Gontijo, A. et al (2014), para melhor entender sobre a necessidade de se instrumentar com técnicas de convergência, em pontos distantes da face, devem-se conhecer conceitos sobre:

a) Danos no maciço rochoso em escavações próximas e derivados de desmonte de rocha com uso de explosivo.

b) Vibrações induzidas por desmonte de rocha em escavações próximas. Essas podem causar danos, tais como, a propagação de abertura das descontinuidades, ou até mesmo a quebra por tração do maciço rochoso. Tais danos podem ser medidos de

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

acordo com metodologias já consagradas de análises de danos de campo próximo ou campo distante, além de possibilitar a elaboração de uma curva/equação de atenuação. Porém, a calibração em campo dessas informações, é de extrema importância para otimizar a precisão da conclusão, ou seja, podem ser mensuradas utilizando o controle de convergência da abertura, ou medidores de trinca nas descontinuidades.

c) Tensões induzidas, redistribuídas após aberturas de grandes vãos, ocasionando sobreposição de tensão em escavações próximas.

Em áreas de realce de minerações subterrâneas (Figura 5), quanto mais próximo esse for de uma escavação de acesso, menor custo terá de escavação (desenvolvimento), menor tempo demandará até se concluir essa abertura, mas, após a abertura deste realce, a redistribuição de tensão se dará imediatamente, onde poderá ocorrer uma sobrecarga de esforços nessas escavações, que neste momento podem ser consideradas menores.

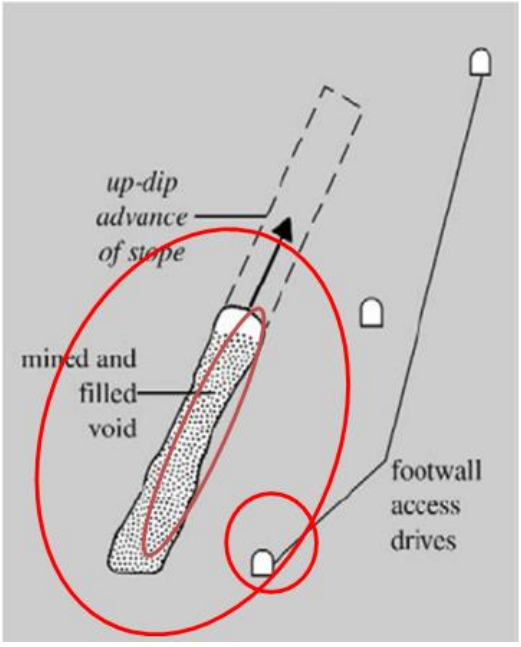

Figura 5. Realces de mina próximos a escavações permanentes. (Gontijo, A., 2017).

Controles de instrumentação, tais como, medidas de convergência, nestes casos devem ocorrer para garantir o conhecimento do comportamento da escavação para uma tomada de decisão em curto prazo, se necessário. Uma descrição detalhada dos fundamentos da análise de tensão pode ser entendida com mais detalhe em livros de Timoshenko e Goodier (1970).

d) Interseções em minerações subterrâneas.

Por se considerar grandes vãos (spam), e acesso de pessoas e equipamentos, monitoramento geomecânico de convergência deve ser executado com uma frequência pré-definida para se ter o controle da abertura e tomar decisão, se necessário, em curto prazo.

e) Escavações subterrâneas em grandes profundidades

Em profundidades consideráveis de escavações, é sabido que as tensões variam suas direções, ou seja, a tensão principal pode alterar de vertical para horizontal ou vice-versa. Controles de instrumentação são recomendáveis para acompanhar e entender o comportamento de deformação do maciço rochoso (escavação).

Em resumo, é de extrema importância realizar um monitoramento de convergência em minerações subterrâneas.

3 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O SMDR é um sistema que permite monitorar simultaneamente, com precisão, de forma continua e em tempo real, variações de deslocamento de rochas e/ou estruturas, níveis de vibração, temperatura e a umidade relativa do ar no local de instalação. Acompanha o sistema um *software* de tratamento de dados que fornece informações detalhadas dos dados coletados bem como relatórios automáticos.

Neste *software* é possível visualizar ao mesmo tempo os deslocamentos medidos por cada sensor bem como as vibrações medidas. Desta forma, é possível avaliar se as vibrações

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

são responsáveis pelos deslocamentos medidos. Pode ser operado à distância ou localmente, permitindo tomadas de decisões rápidas e oportunas.

Utilizando uma central de aquisição (Figura 6), com uma alta capacidade de processamento e armazenamento (*datalogger*), foi desenvolvido para operar em ambientes de condições adversas, por ser compacto, robusto e resistente às intempéries. Os cabos que interligam o sistema são blindados e emborrachados.

Figura 6. Central de aquisição. (MecRoc, 2016).

3.1 Aplicação do sensor ótico: Monitoramento de convergência contínuo em ambientes subterrâneos (escavações e cavidades naturais).

Para detectar a variação de deslocamento da superfície do ambiente subterrâneo ou variação de convergência em galerias, é utilizado um sensor óptico. A medição da distância é realizada por um feixe de laser emitido, refletido, e captado de volta pelo sensor. A distância é calculada pelo tempo gasto pelo feixe de laser para realizar o trajeto. Esta medição depende das propriedades óticas do ar na região da instalação sendo influenciada pela temperatura do ar, umidade relativa, quantidade de poeira e nebulosidade.

O feixe de laser deverá estar apontado na direção de um refletor, que pode ter uma superfície prismática ou opaca, dependendo do modelo do sensor. A distância capaz de ser medida pelo sensor pode chegar até 100m. Para cada central de aquisição e processamento do SMDR, pode-se utilizar 03 sensores de deslocamento simultaneamente.

Para a fixação do sensor ótico (Figura 7) e do refletor usa-se um suporte que é aparafusado ao sensor. Esses suportes deverão ser fixados na parede/teto do maciço rochoso de uma das duas formas, a saber:

a) Fixação com resinas ou calda de cimento em um furo de um pino roscado;
b) Fixação por uma barra telescópica (sem interferências locais).

Figura 7. Sensor Ótico. (MecRoc, 2016).

3.2 Aplicação do geofone: Controle de vibrações.

O Monitoramento de vibrações induzidas por detonação é realizado com sismógrafos que operam com geofones ou acelerômetros. A leitura básica deste instrumento é a medição da Velocidade de vibração ou Aceleração de partícula do maciço rochoso no ponto em estudo.

A versão padrão com Geofones[2], do tipo tri axial (Figura 8), opera em conformidade com a Norma NBR 9653/2005, dispondo também da auto checagem da calibração dos sensores (*self test*).

Seguindo recomendações de Normas internacionais, o *case* do sensor de vibração pode ser acoplado ao local de monitoramento utilizando gesso ou parafusos, onde estes são

[2] A faixa de medição do geofone é de 0,5 à 250 mm/s de 4 à 250Hz, com resolução de 0.122 mm/s.

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

definidos de acordo com a superfície a ser instalado.

Figura 8. Sensor de vibração triaxial (Geofone). (MecRoc, 2016).

3.3 Aplicação do sensor de temperatura e umidade: Monitoramento contínuo climático do ambiente.

Um sensor de temperatura e umidade (Figura 9) registra a variação de temperatura e umidade relativa do ar, ao longo do tempo, no local de instalação. Esse sensor é um Termo Higrômetro, o mesmo apresenta precisão de ±0.5ºC para a temperatura e ±2% para a umidade relativa do ar.

Como não precisa de fixação, este sensor poderá ser apoiado em qualquer local, nas proximidades do equipamento.

Figura 9. Sensor de temperatura e umidade. (MecRoc, 2016).

3.4 Interface Gráfica

Juntamente com o sistema, foi desenvolvido um *software* que constitui parte integrante do equipamento (Figura 9), para configuração, análise, interpretação dos dados e elaboração de relatórios.

Figura 10. Interface Gráfica – *software* SMDR. (MecRoc, 2016).

Através do *software* é possível ver o acumulado das medições, escolha de limites de tempo para análise, possibilidade de impressão dos gráficos, aplicação de filtros digitais, além da funcionalidade de exportar os dados em formatos compatíveis em programas de análise de planilha de dados, como o Excel®.

Além disso, os gráficos são disponibilizados separadamente por eventos em formas de ondas para análise de vibração, possibilitando a aplicação de filtros digitais, manipulação matemática – FFT (*Fast Fourrier Transformer*), além de sua impressão, dos dados em formato de texto, e emissão automática de relatórios de vibração (PPV x frequência) atendendo à norma NBR 9653:2005.

4 METODOLOGIA

Com o objetivo de validar a metodologia proposta neste trabalho, o equipamento SMDR foi instalado em outubro de 2016 na Mineração Serra Grande, de propriedade da empresa AngloGold Ashanti, em uma área para retomada do sequenciamento da recuperação de pilares do CP 152C e *Sill Pillar* do CP 202C. As atividades estavam paralisadas desde agosto de 2016 após fechamento do primeiro ciclo devido à queda de uma placa (*fall of ground*) de cerca

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

de 450 toneladas no interior do realce, ocasionada pela detonação no dia 22 do mesmo mês. A Figura 11-a e 11-b mostra respectivamente o local do monitoramento e o local de recuperação dos pilares.

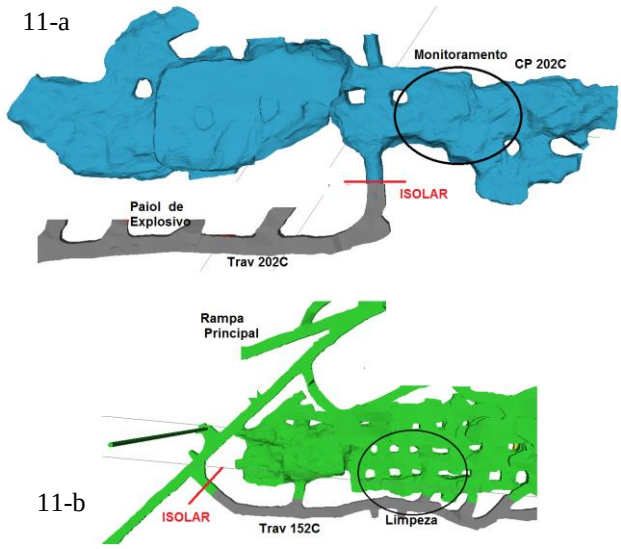

Figura 11-a Localização do monitoramento e 11-b Local de recuperação dos pilares.

A retomada da atividade ocorreu com reabilitação da área e implantação do Sistema de Monitoramento Dinâmico de Rochas (SMDR) de forma contínua (*online*) na sala de controle localizada na superfície da mina de modo a maximizar a segurança das atividades no CP 152C e CP 202C em tempo real.

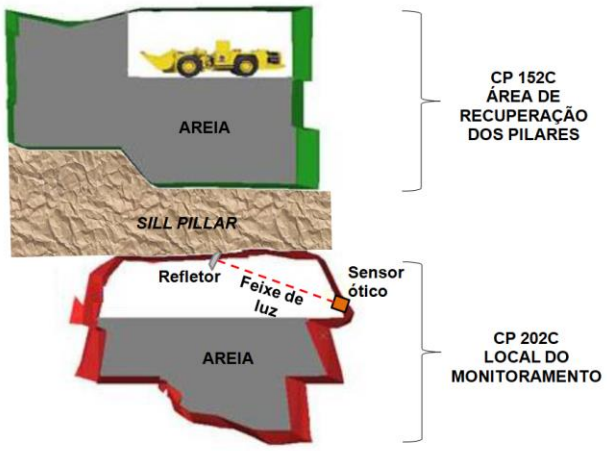

Figura 12. Detalhe do modo do monitoramento.

O monitoramento ocorreu da seguinte forma: sensores óticos foram instalados na lateral e nos pilares do CP 202C com intuito de monitorar qualquer deslocamento do teto. Para a instalação dos sensores óticos, foram feitos furos na rocha utilizando uma furadeira roto percussiva e em seguida foi inserido calda de cimento dentro dos furos. Então o parafuso de suporte do sensor ótico é inserido dentro do furo. Após o período de cura do cimento e fixação dos lasers, os mesmos são energizados para que o feixe de luz seja emitido no teto ou lado oposto da parede da galeria e, então é fixado o refletor da mesma forma que é fixado os sensores óticos. A Figura 13 ilustra a fixação do sensor ótico no maciço rochoso.

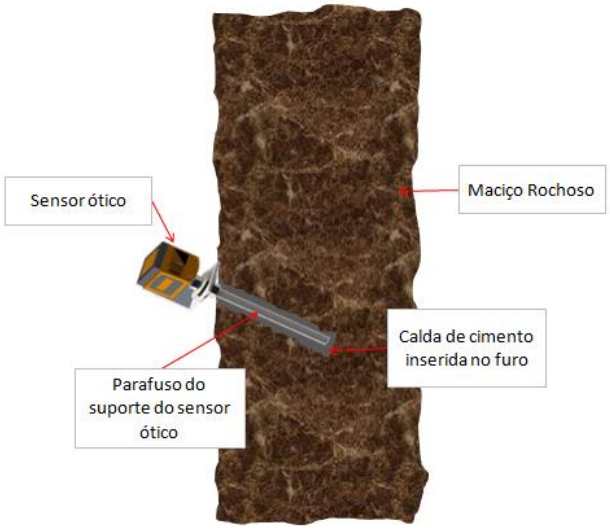

Figura 13. Detalhe da fixação do sensor ótico.

Os dados dos sensores óticos eram coletados a cada 10 segundos e processados pela central de aquisição instalada na travessa próximo ao local de monitoramento, e por meio de fibra ótica, as informações eram reproduzidas no computador que fica na sala de controle da mina.

A equipe de Mecânica de Rochas da AngloGold definiu um alarme (*trigger*) de 12 mm de convergência/divergência para disparo de um alarme, que tem como objetivo paralisar as atividades na região. Caso ocorre-se algum

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

deslocamento no teto do CP 202C acima desse *trigger* um apito soaria na sala de controle e na tela do computador aparecia um aviso de atenção (Figura 14). A equipe da sala de controle da mina foi treinada, para que caso ocorra um apito sonoro, os mesmos comunicassem para que a área e os acessos fossem evacuados. Em seguida a equipe de mecânica de rochas era acionada para posterior avaliação e caso julgassem necessário liberação das atividades.

Figura 14. Ilustração do aviso de atenção.

5 RESULTADOS

Durante o período de monitoramento entre outubro de 2016 e junho 2017, considerando os resultados obtidos pelos sensores óticos no CP 202C foi possível concluir que nas posições onde estavam sendo efetuadas as medições não existia nenhum indício de instabilidade. A Figura 15 mostra os resultados de convergência obtidos no período de 05 de junho a 06 de junho de 2017, dados estes característicos de uma região estável.

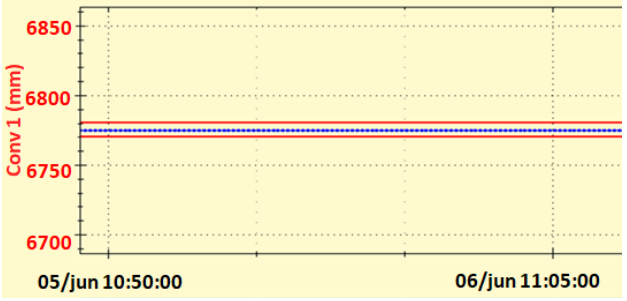

Figura 15. Resultado de Convergência obtido pelo sensor ótico no CP 220C (05 de junho a 06 de junho).

Contudo, em alguns momentos, os resultados obtidos pelos sensores de convergência ficavam muito fora do valor de *trigger* de 12 mm. Esse tipo de comportamento é tipicamente observado quando algo obstrui o feixe de luz entre o sensor ótico e o refletor.

Como exemplo, no dia 02 de junho, após uma detonação com um total de 200 toneladas de explosivos, o monitoramento no CP152C apresentou uma oscilação de até 8 cm por um período de 45 minutos (Figura 16). Foi realizada inspeção tanto no CP 152C quanto no CP 202C e não foram identificados indícios de movimentação ou ativação de estruturas. Como existe varação entre os níveis CP152 e 202C, sendo a exaustão feita pelo fundo da mina, foi concluído que a interferência ocorreu devido a fumaça do desmonte.

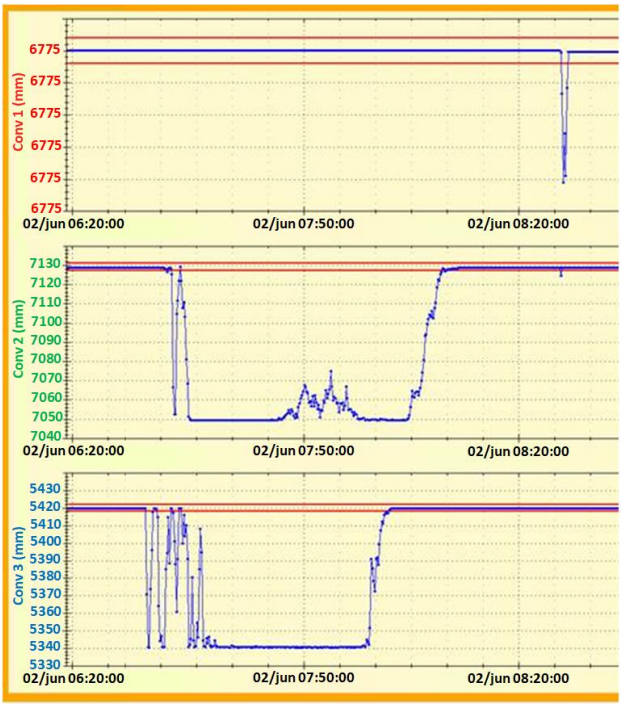

Figura 16. Resultados de Convergência obtidos pelos 3 sensores óticos no CP 220C (02 de junho).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma nova abordagem para a medição de convergência de ambientes subterrâneos, tais como em escavações e em cavidades naturais. Esta nova forma de medição foi implementada por um equipamento de

© CBMR/ABMS e ISRM, 2018

monitoramento de dinâmica de rochas, o SMDR, e testado em uma galeria da Mineração Serra Grande da AngloGold Ashanti por mais de 9 meses.

Mesmo que a curva de reação do terreno nos apresente que, teoricamente, após a instalação dos sistemas de ancoragens, teremos uma estabilização da escavação, em minerações, outras variáveis, tais como detonações em outras galerias próximas ou tensões induzidas de outras aberturas, podem induzir a ocorrência de convergência em uma escavação próxima já existente.

O uso de monitoramento contínuo de convergência se faz de extrema necessidade devido à enorme relevância de se entender o comportamento da escavação no decorrer do tempo.

Neste contexto, os resultados dos estudos de caso de minerações subterrâneas, apresentados e discutidos neste trabalho, comprovaram a eficiência do sistema em controlar riscos geomecânicos continuamente, voltados à variação de deslocamentos ou de convergência durante uma operação mineira, que tem o seu monitoramento em tempo integral, ou seja, durante vinte e quatro horas por dia e sete dias por semana.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos a toda equipe da empresa AngloGold Ashanti pela oportunidade de aprendizado compartilhado, em especial à equipe de Mecânica das Rochas.

REFERÊNCIAS

Bieniawski, Z.T. (1974). *Geomechanics Classification of Rock Masses and its application in Tunnelling*, Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech., Denver 2, Part A, 27-32.

Carranza-Torres, C. (2004). *Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Proceedings of the ISRM SINOROCK 2004 Symposium, edited by J.A. Hudson and Xia-Ting Feng, Volume 41, Issue 3.

Duncan Fama, M.E. (1993). *Numerical modeling of yield zones in weak rocks. In Comprehensive rock engineering*, (ed. J.A. Hudson) 2, 49-75. Pergamon, Oxford.

Gontijo, A. *et. al*. (2014). *Utilização de Sensor Ótico para Monitoramento Contínuo de Convergência em Ambientes Subterrâneos*. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, COBRAMSEG 2014, Goiânia, Anais.

Gontijo, A. (2017). *Proposta e desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo de convergência em ambientes subterrâneos*. Mestrado Profissional. Núcleo de Geotécnica da Escola de Minas/UFOP.

Hoek, E. e Brown, E.T. (1997). *Practical Estimates of Rock mass Strenght, Int. Jr. Rock Mech. and Min. Sci. And Geomech. Abstr*., Vol 34, No. 8: 1165-1186.

Lopez, J. (2012). *Workshop PRODIMIN*. Lima, Peru.

MecRoc Engenharia. (2016). Disponível em: < http://www.mecroc.com.br/>. Acesso em 06 de maio de 2018.

NBR 9653/2005. (2005). *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas.* Procedimento. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Silva, B. C. (2015). *Aplicabilidade e Limitações do Método de Convergência-Confinamento em Projetos de escavações Subterrâneas*. Mestrado Profissional. NUGEO.

Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N. (1970). *Theory of Elasticity*, 3rd edn. Wiley: New York.