

Utilização de Sensor Ótico para Monitoramento Contínuo de Convergência em Ambientes Subterrâneos

Alexandre Assunção Gontijo

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

Antonio Rafael da Silva Filho

AERON, Belo Horizonte, Brasil, antonio@aeron-eng.com.br

Francisco Ribeiro Fonseca Reis

AERON, Belo Horizonte, Brasil, francisco@aeron-eng.com.br

Igor Machado Malaquias

AERON, Belo Horizonte, Brasil, igor@aeron-eng.com.br

Paula de Mello Martins

MecRoc Engenharia Ltda, Belo Horizonte, Brasil, mello.paula@gmail.com

Romero Cesar Gomes

Escola de Minas - NUGEO, Ouro Preto, Brasil, romero@em.ufop.br

RESUMO: Esse trabalho visa apresentar um método para a medição de convergência, utilizando sensor ótico, em ambientes subterrâneos dentre os quais cavidades naturais, mineração e túneis. A metodologia apresentada é baseada na utilização de um sensor ótico de deslocamento, conectado a um sistema de aquisição de dados, de forma a permitir o monitoramento da convergência em tempo real sem a necessidade de intervenção humana. Este método está sendo implementado a um novo equipamento, o Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rocha (SMDR). Serão apresentados, desde o sistema, à resultados de testes realizados para validação em locais onde o SMDR foi testado, bem como uma comparação com o método convencional, onde foi possível observar que o novo método possibilita caracterizar de forma detalhada os deslocamentos ocorridos pontualmente no ambiente subterrâneo.

PALAVRAS-CHAVE: Convergência, Monitoramento, Mineração

1 INTRODUÇÃO

Conhecer e entender geotecnicaamente os ambientes subterrâneos tem sido um grande desafio mundial. Subdividido em escavações (túneis e minerações) e em cavidades naturais, estes ambientes requerem estudos e análises distintas.

Em túneis, a necessidade de construí-los se torna fundamental para otimizar os espaços urbanos e rodoviários, enquanto que nas minerações, o foco é reduzir passivos ambientais e buscar minerais que se tornam mais escassos na superfície, propiciando um

desenvolvimento de atividades subterrâneas com profundidades consideráveis.

Nas escavações, garantir a estabilidade requer uma investigação geomecânica detalhada sobre o maciço rochoso (contínuo/descontínuo), desde qualidade, resistência mecânica das rochas, direção das tensões, performance do desmonte, tipo de fortificação, definição de estruturas geotécnicas e o monitoramento geomecânico das aberturas/vãos (Gama, C. D., 2006).

Em relação às cavidades naturais subterrâneas, existe pouca informação disponível na literatura sobre análise de

estabilidade; e um dos principais métodos de acompanhar e controlar quaisquer danos ocasionados pelas operações mineiras nas proximidades, além de um mapeamento geológico-geotécnico e uma caracterização morfológica e geométrica da cavidade, é a utilização de sismógrafos de engenharia, realizando o controle de influências sismográficas proveniente do desmonte de rocha.

Desde 15 de junho de 1990, minerações com operações nas proximidades de cavernas naturais devem seguir a Portaria do IBAMA Nº 887, ou seja, são proibidos desmatamentos, queimadas, uso de solo e subsolo ou ações de quaisquer natureza que coloquem em risco as cavidades naturais subterrâneas e sua área de influência, a qual compreenda os recursos ambientais, superficiais e subterrâneos, dos quais dependam sua integridade física ou seu equilíbrio ecológico.

A Resolução CONAMA Nº 347/2004, estabelece que na ausência de estudos específicos que delimitem a área de influência no entorno das cavidades, pelo princípio de precaução, fica definido que o raio mínimo de proteção em torno da cavidade será de 250 metros.

Buscando ampliar e facilitar o monitoramento em ambientes subterrâneos, é proposto o uso de uma nova tecnologia baseado na aquisição contínua de sinais de sensores instalados na cavidade.

Neste trabalho será apresentado um método para monitoramento de ambientes subterrâneos, o desenvolvimento de um sistema para tal e resultados de testes em campo deste sistema.

2 OBJETIVO

Neste trabalho será detalhada a nova metodologia para a medição de convergência baseada em sensores óticos conectados a um sistema de aquisição de dados contínuo, com armazenamento local das informações e possibilidade de envio remoto.

Serão apresentados resultados obtidos em testes realizados com o sistema desenvolvido, a saber, SMDR (Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rocha), em escavações

subterrâneas, utilizando processos tradicionais para validação/comparação dos resultados, e em cavernas naturais, assim como discutir as vantagens de um monitoramento contínuo perante técnicas convencionais.

O sistema foi testado na Mina Cuiabá, de propriedade da AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração, localizada na cidade de Sabará – MG, e em uma cavidade natural subterrânea nas proximidades de uma operação de Mina da VALE no Quadrilátero Ferrífero (QF); onde neste trabalho serão apresentados os resultados dos testes, além de uma interpretação dos dados.

3 SISTEMAS DE MONITORAMENTO CONVENCIONAIS

Nas escavações subterrâneas em maciço rochoso, alguns desafios especiais são comuns de se enfrentar. A fim de compreender questões envolvidas no processo de concepção de monitoramento, que é a principal ferramenta de controle para avaliar a estabilidade das galerias e/ou realces na fase de construção e serviço, é importante ressaltar a necessidade de investigar e conhecer detalhadamente o maciço rochoso (Vlachopoulos e Diederichs, 2009).

A Figura 1 demonstra um diagrama para definição de áreas geotécnicas em um maciço rochoso.

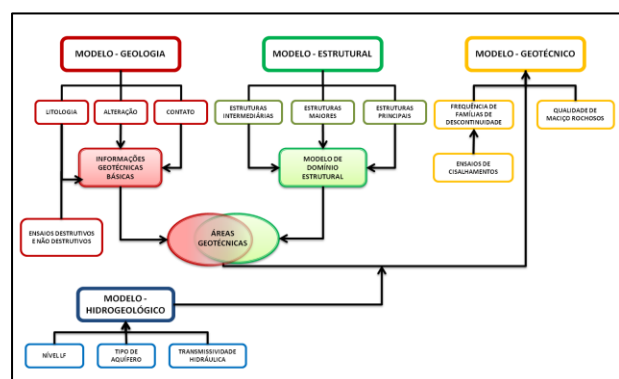


Figura 1. Diagrama proposto para definição de áreas geotécnicas em Ambientes Subterrâneos (Díaz, J. e Lledó, P., 2009, modificado)

Devido a não existir Norma ABNT para monitoramento de escavações subterrâneas, foi seguido a ASTM D 4403 (*Standard Practice for Extensometers Used in Rock*); que mesmo

validando vários métodos de monitoramento, enfatizaremos dois principais métodos de monitoramento de deslocamento em escavações subterrâneas, que são os deslocamentos da superfície da galeria, e os deslocamentos internos que ocorrem no maciço rochoso. A seguir será descrito brevemente cada um desses sistemas:

3.1 Deslocamento da Superfície da Escavação

Segundo Barbosa et al. (2009), um dos principais métodos de se medir o deslocamento na superfície de uma escavação é utilizando técnicas de convergência, que consiste em um sistema de monitoramento pontual do qual podemos realizar leituras sistemáticas ao longo da seção de uma escavação para monitorar a deformação desta (abertura ou fechamento). As medidas são realizadas, com equipamentos analógicos ou digitais, com uma periodicidade de leituras pre-definida, sendo que o valor lido é comparado em um período de tempo.

3.2 Deslocamento interno no maciço rochoso

Diversos equipamentos são utilizados para verificar a variação dos deslocamentos internos no maciço rochoso, sendo que os mais tradicionais são os extensômetros. O princípio de funcionamento desses equipamentos podem variar de acordo com cada fabricante, porém, para um simples entendimento, consiste em ancorar dentro de um furo no maciço uma haste que seja capaz de mensurar, por meios de potenciômetros o deslocamento. Utilizados para se monitorar os diversos níveis de deslocamento em várias profundidades no maciço rochoso, variados extensômetros estão disponíveis, com materiais diferentes de hastes, de tipos e/ou número de ancoragens distintas, além de possibilitar leituras mecânicas e automáticas.

4 O SMDR

Acompanhando a evolução tecnológica, e atendendo as necessidades de monitoramento geomecânico em ambientes subterrâneos, foi desenvolvido o SMDR. Valendo da sua alta capacidade de processamento e armazenamento,

é possível coletar dados de forma contínua e automática, com possibilidade de coleta remota de dados para facilitar e agilizar a operação. Sendo que a natureza dos dados coletados dependem apenas da escolha dos sensores conectados ao sistema, por exemplo, sensor de vibração, sensores de distância, umidade e temperatura.

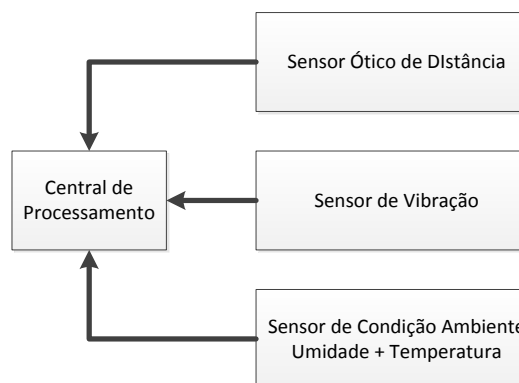


Figura 2. Esquema de funcionamento do SMDR

Um sistema eletrônico central é responsável pelo processamento e armazenamento dos sinais de todos os sensores. Essa central é própria e desenvolvida exclusivamente para o SMDR.

O SMDR, no presente trabalho, foi configurado para a instrumentação geomecânica, de deslocamento da superfície, e das condições climáticas (umidade e temperatura) nos ambientes subterrâneos.

A convergência local é avaliada através de sensores eletrônicos óticos capazes de mensurar distâncias entre 1 e 100 m, com intervalos de 0,1 m, com resolução de 0,03 mm, e uma alta taxa de aquisição sendo tomadas várias medidas ao longo de um dia. Esse valor de distância pode então ser avaliado ao longo do tempo para verificar se existe qualquer pequeno deslocamento entre tetos/laterais de uma escavação subterrânea ou um conduto de uma cavidade.

Um sensor de temperatura e umidade registra as condições climáticas no local de sua instalação. Apesar de não ser um parâmetro geomecânico, monitorar o ambiente de trabalho dos operadores, é uma informação relevante para Saúde e Segurança, enquanto em cavidades, tais informações são essenciais para estudos bioespeleológico do interior da caverna, sendo um dos parâmetros utilizado para definir o

grau de relevância da mesma (Trajano, E e Bichuette, M. E., 2010). Por esse motivo optou-se por incluir esses sensores no sistema de monitoramento proposto.

Os dados coletados são armazenados em uma memória interna do sistema, e podem ser descarregados frequentemente através de um computador, ou quando se desejar o sistema pode ser conectado a uma central através de um sistema de rádios, enviando informações em tempo real sobre as grandezas medidas.

5 ENSAIOS DE CAMPO

5.1 Mineração Subterrânea

Com o objetivo de validar a metodologia proposta foram realizados testes na Mina Cuiabá, AngloGold Ashanti, em uma galeria (*drive*), que tem como dimensão 5,5 x 5,5 m, sobrejacente à área da lavra no nível 09, à 670 m de profundidade, conforme ilustra a Figura 3.

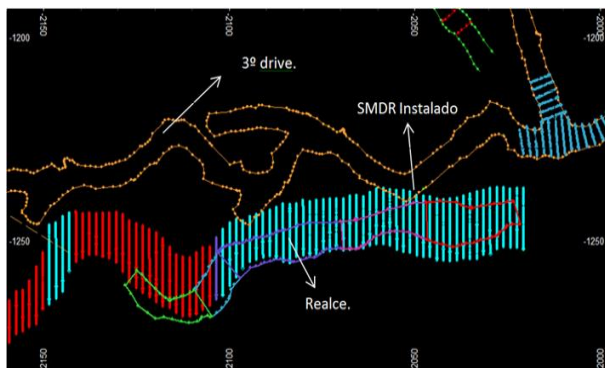


Figura 3. Localização da instalação do SMDR na Mina Cuiabá.

De maneira simplificada, a sequência litológica presente na região das atividades compreendem de Sericita Clorita Xisto no *Hanging Wall*, BIF's (*Banded Iron Formation*) como minério e Xisto Carbonoso no *Foot wall*; e de acordo com o mergulho e potência do corpo de minério o método de lavra definido foi corte e enchimento (*cut and fill*), porém em suas etapas finais, foram desenvolvidas galerias sobrejacentes (*drives*) no contato do minério com o *Foot Wall*, para a realização de perfuração longa.

Detonações do realce, associados com a curvatura da Galeria (*drive*), permitiram que

ambas escavações se aproximassem, chegando a uma distância mínima vertical de 1,6 m, conforme Figura 4.

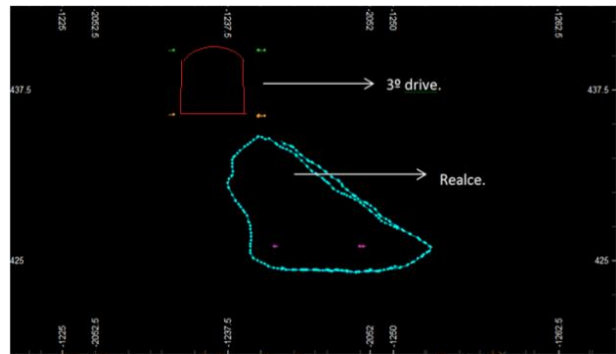


Figura 4. Pilar entre Realce e galeria onde foi instalado o SMDR

Para a validação dos resultados do sensor de distância ótico conectado ao SMDR, a equipe Geomecânica - AngloGold instalou 03 seções de convergência espaçadas em aproximadamente 2 metros, conforme Figura 5.



Figura 5. Galeria de instalação do SMDR juntamente com 03 seções de convergência convencionais utilizadas pela Mina Cuiabá

As leituras de convergenciometria da AngloGold são realizadas periodicamente através de convergenciômetros analógicos medidos através da utilização de fios invar, por possuírem uma propriedade de baixo coeficiente de dilatação térmica.

5.1.1 Resultados

Serão apresentados os resultados obtidos com o SMDR durante o período em que o mesmo ficou instalado na Mina Cuiabá. A Figura 6 apresenta uma comparação entre os dados não tratados obtidos pelo SMDR e as medições

realizadas, convencionalmente, pela equipe da AngloGold na seção mais próxima do local de instalação do sensor ótico.

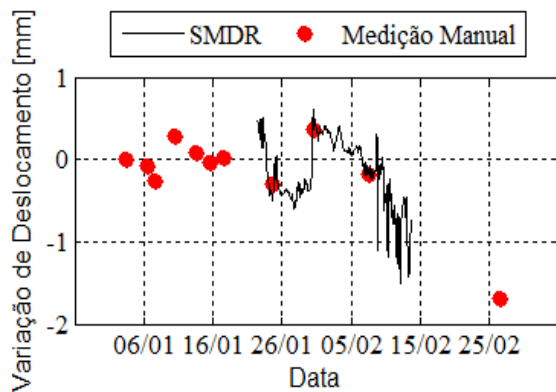


Figura 6. Dados de variação do deslocamento

Primeiramente observa-se que os pontos medidos pela equipe da AngloGold estão coerentes com os medidos pelo SMDR e indicam uma tendência de fechamento da galeria monitorada.

Também é possível observar que a quantidade de pontos medidos manualmente é muito inferior à quantidade medida pelo SMDR como mostrado na Tabela 1, devido que, operacionalmente, é necessário um desprendimento de equipe para a realização das leituras, fato esse que dificulta uma sequência intensa de dados.

Tabela 1. Comparação da Taxa de Aquisição do SMDR e da medição da AngloGold.

Tipo de Medição	Taxa de Aquisição Média (pontos/dia)
SMDR	46000
Medição Manual	0.1

A maior capacidade de aquisição de dados do equipamento proposto permite uma melhor caracterização do comportamento da escavação. Por exemplo, na medição manual não se observa o pico de deslocamento entre os dias 16/01 e 26/01. Também há um deslocamento acentuado de 1.5 mm de amplitude entre os dias 07/02 e 26/02 que necessita de 19 dias para ser percebido devido à ausência de medições no período.

A partir do dia 07/02, iniciou-se um transito constante de equipamentos pesados (caminhões e carregadeiras) próximo ao SMDR.

E é possível notar que após este dia os dados do SMDR se tornam mais ruidosos devido à presença de máquinas em operação e detonações nas proximidades com um raio mínimo de 30 m.

Como a convergência medirá deslocamentos de superfície, acredita-se que pequenas amplitudes de vibrações, detonações e trânsito de equipamentos pesados possam movimentar levemente tais blocos, já discretizados da qual instalamos as seções de leituras. Por esta razão, chama-se a atenção para a qualidade de instalação das seções, conforme recomenda a ASTM D4403 (2005).

Para facilitar a análise de convergência da galeria o sistema permite também gerar os dados eliminando ruídos presentes no sinal como mostrado na Figura 7.

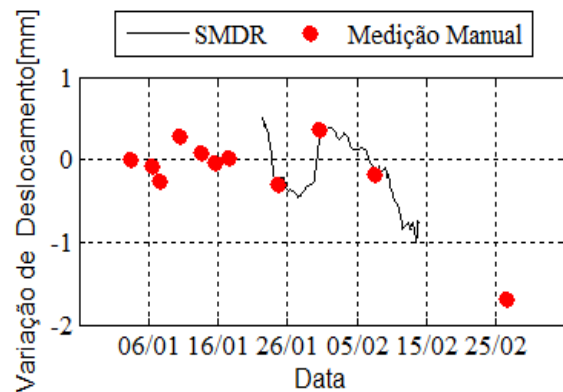


Figura 7. Dados Filtrados do Deslocamento da Seção

A Tabela 2 apresenta o erro relativo da medição do SMDR em relação aos dados obtidos pela AngloGold.

Tabela 2. Erro Relativo dos dados do SMDR em relação aos fornecidos pela Anglo Gold.

Dia	Erro Relativo [%]	Deslocamento SMDR [mm]	Deslocamento AngloGold [mm]
24/01	2.7	-0.292	-0.30
30/01	-4.3	0.354	0.37
07/02	3.9	-0.173	-0.18

Para os dados disponíveis, o erro relativo do SMDR em relação aos da AngloGold são inferiores a 4.3%.

Como dados adicionais, são apresentados na Figura 8 os dados de temperatura da galeria durante o período do ensaio e na Figura 9 os dados de umidade relativa.

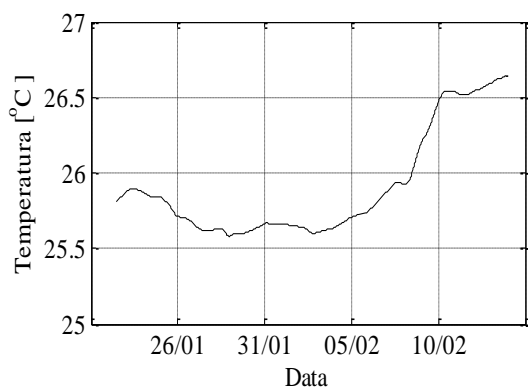


Figura 8. Dados de temperatura da Seção

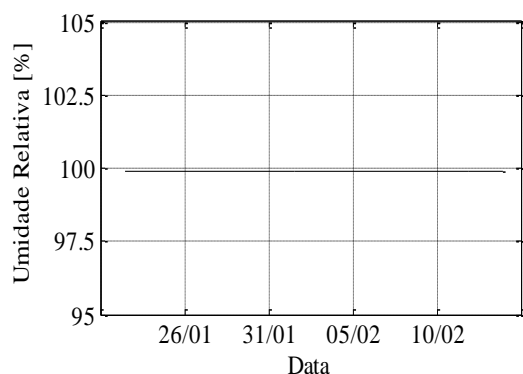


Figura 9. Dados umidade da Seção

Considerando a Figura 8 verifica-se que o aumento da temperatura coincide com o início das atividades no local, onde o trânsito de máquinas e pessoas promoveu a elevação da temperatura em, aproximadamente, 1°C, o que não ultrapassa as temperaturas máximas recomendadas pela NR-22. Esta informação é importante para caracterizar a qualidade do ambiente de trabalho.

Em relação a umidade verifica-se que a mesma se manteve constante em todo período, Figura 9.

5.2 Cavernas Naturais

O grande número de cavernas descobertas em rochas ferríferas, está associado as novas regras jurídicas para a espeleologia no Brasil, ou seja, devido ao crescimento e desenvolvimento mineral no Brasil, esforços foram direcionados à indústria mineral para a prospecção espeleológica e estudos de relevância, visando atender a legislação em vigor e diminuir os

riscos e impactos econômicos das suas atividades (Oliveira et al., 2011).

Reservas Minerais de milhões de toneladas de minério de ferro estão se tornando recursos bloqueados, devido a cavernas naturais localizadas no sequenciamento programado da operação mineira.

Resumidamente, Oliveira et al. (2011) descreve que a maioria das cavernas em rochas ferríferas/canga hospedam-se em coberturas cenozóicas, e são constituídas por sedimentos fluviais e lacustres. Estão sempre situadas próximas à superfície, o que justifica a frequência de clarabóias, e tem dimensões médias de 26 metros de projeção horizontal e 2 metros de desnível, normalmente com tetos baixos.

Atualmente, tais cavernas naturais que fazem parte do sequenciamento do empreendimento mineiro, são monitoradas constantemente e principalmente, nos momentos de detonação, por sismógrafos de engenharia; porém, apenas parâmetros de vibração são coletados por sismógrafos (3 eixos), medindo danos ocorridos no interior da caverna. A Norma para avaliação dos limites de Velocidades de Partículas e Aceleração específica para cavidades naturais subterrâneas inexistente no Brasil, entretanto vem sendo utilizado parâmetros de comparação com os da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 9653/2005 destinado a avaliações de vibrações geradas por detonações com explosivos em minerações próximas a áreas urbanas. Segundo Dias et al (2012), um estudo piloto permitiu determinar as equações de atenuação das vibrações para as litologias canga, hematita friável e rochas máficas; tornando-se possível determinar quais as cargas máximas por espera podem ser utilizadas para uma determinada distância, dentro dos limites de vibração pré-estabelecidos.

Considerando que monitoramentos internos em cavernas naturais é um tema atual e novo no meio geotécnico, testes com o SMDR foi realizado em uma cavidade natural subterrânea nas proximidades de uma Mina da VALE (QF) em caráter experimental. Tais ensaios buscam avaliar e analisar de forma contínua as informações de deslocamento (convergência e divergência) pontual em um conduto da cavidade.

5.2.1 Resultados

A Figura 10 ilustra o mapa da caverna e o local onde foi realizado a instrumentação utilizando o SMDR.

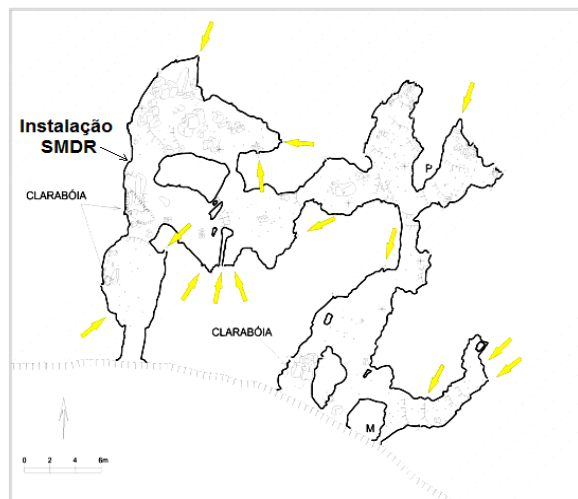


Figura 10. Mapa da caverna e o local onde foi realizado a instrumentação utilizando o SMDR

O SMDR permaneceu em funcionamento internamente na Caverna e os resultados coletados sobre a convergenciometria são apresentados na Figura 11.

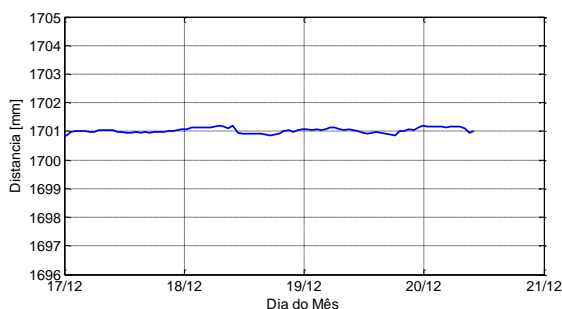


Figura 11. Resultados sobre a convergenciometria em caverna natural

Podemos interpretar que não ocorreu nenhum deslocamento no conduto instalado, considerando que o equipamento esteve coletando informações durante 4 dias consecutivos.

6 CONCLUSÕES

A importância crescente do monitoramento

permanente das obras geotécnicas em geral, justifica-se pelo primado de sua segurança e pelas garantias de proteção, e explica a necessidade de esforços de investigação (Gama, D. 2004).

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 monitoramento de dinâmica de rochas, o SMDR, e testado em uma galeria da Mina Cuiabá da AngloGold durante 24 dias e os resultados comparados com o método convencional de medição da Empresa.

Os resultados dos testes apresentaram um erro relativo entre as medições do SMDR e o método atual máximo de 4.3% e a mesma tendência da curva que mostra uma retração da galeria.

Adicionalmente, os resultados obtidos com a nova abordagem permitem uma taxa de aquisição muito superior a atual permitindo caracterizar de forma detalhada a evolução da galeria sem perder variações importantes. No teste, a taxa do SMDR foi de 46000 pontos por dia ao passo que o da medição manual foi de 0.1 pontos por dia.

Por último, a vantagem sobre segurança, pois os dados obtidos não necessitam de uma equipe de medição para realizar as leituras uma vez que essas são armazenadas no sistema, ou seja, minimiza a intervenção humana na atividade de convergenciometria. Basta uma pessoa periodicamente para descarregar os dados ou mesmo um sistema de monitoramento “online” para a coleta das informações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas AngloGold Ashanti, VALE e Ideagora pelo apoio, disponibilização de pessoal e local para instalação e testes dos equipamentos.

Em especial, agradecemos o apoio de: Paulo Filippo ; Rodolfo Renó ; Guilherme Santana ; Reuber Cota ; Felipe Pereira ; Cristiano Nogueira ; Maurílio de Freitas ; Iuri Brandi ; Ramon Araujo ; Márcio Mansur ; Fernando Frigo.

REFERÊNCIAS

- ASTM D 4403-84 (2005) *Standard practice for extensometers used in rock*, American Society for Testing and Materials.
- Barbosa, C. B., Ferreira, L. A., Araújo, F. M., Gonçalves, L., Gama, C. D., Malva, R., Silva, A. e Freitas, V. (2009) *Fiber Bragg grating system for continuous large-scale monitoring of convergence in Rossio Tunnel*, 20th International Conference on Optical Fibre Sensor, Edinburgh, UK.
- CONAMA 347/2004 - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 347/04. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Brasília, 2004.
- Dias, C. R., Brandi, I. V., Teles, C. A., Dutra, G. e Antonini, A. (2012) *Procedimentos Para Estudos de Conservação da Integridade Física de Cavidades Naturais Subterrâneas*, 7ª edição do CBMina, Belo Horizonte, MG, Brasil, CD-ROM.
- Díaz, J. e Lledó, P. (2009) *Taller Interdivisional de Definición de Dominios Geotécnicos, Informe Técnico - DERK Ingeniería y Geología Ltda.*, Codelco, Chile.
- Gama, C. D. (2004) - *A Method for Continuous Monitoring of Tunnel Deformations during Construction and Service Phases*, Eurorock 2004, Salzburg, Editor W. Schubert, p.251-254.
- Gama, C. D (2006) *Novos Desenvolvimentos sobre o método extensiométrico para monitorizar convergências em túneis*, 10ª Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, Portugal.
- IBAMA nº 887. Delibera sobre o patrimônio espeleológico nacional e delimita a área de influência das cavidades naturais. Brasília, 1990. Disponível em www.ibama.gov.br. Acesso em 23 jun. 2011.
- NBR 9653 (2005) *Vibração - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Norma Regulamentadora NR 22 – *Saúde e Segurança Ocupacional na Mineração*. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 1999. Disponível em www.portal.mte.gov.br. Acesso em 23 jun. 2011.
- Oliveira, A. B., Olivito, J. P. e Silva, D. R. (2011) *Caracterização da Unidade Espeleológica e das Unidades Geomorfológicas da Região do Quadrilátero Ferrífero*, Espeleo-Tema. V. 22, p 61-80.
- Trajano, E e Bichuette, M. E. (2010). *Relevância de cavernas: Porque estudos ambientais espeleobiológicos não funcionam*, Espeleo-Tema V.21, p. 105-112
- Vlachopoulos, N. e Diederichs M.S. (2009) *Improved Longitudinal Displacement Profiles for Convergence Confinement Analysis of Deep Tunnels*, Rock Mech Rock Engng, Netherlands, p. 131-146.