

Instrumentação Geotécnica da Caverna CAI-03, Anglo American, Conceição do Mato Dentro-MG

Alexandre Assunção Gontijo, MSc

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

Rodolfo Renó

MecRoc Engenharia Ltda., Belo Horizonte-MG, Brasil, rodolfo.reno@mecroc.com.br

Gilcimar Oliveira, MSc

Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, Brasil, gilcimar@angloamerican.com

Tiago Alves, MSc.

Anglo American, Belo Horizonte – MG, Brasil, tiago.alves@angloamerican.com

Faustino Souza

Anglo American, Conceição do Mato Dentro – MG, Brasil, faustino.souza@angloamerican.com

RESUMO: Nos últimos anos houve um grande aumento no número de cavernas naturais cadastradas em formações ferríferas no Brasil. Esse fato vem sendo associado às mudanças recentes nas regras jurídicas voltadas ao licenciamento ambiental de empreendimentos em áreas com potencial espeleológico. Com as novas mudanças na legislação foi possível, nestas regiões, direcionar esforços para a prospecção espeleológica, estudos de relevância e estudos específicos visando a proteção do patrimônio espeleológico. Grande parte das cavernas, juntamente com suas respectivas áreas de influência, não podem sofrer impactos irreversíveis e possuem sua preservação garantida pela legislação vigente. Isso, aliado ao fato que o processo espeleogenético é semelhante ao processo de concentração mineral em ambientes de formações ferríferas, causa o bloqueio de recursos minerais, além da inviabilização de obras de infraestrutura vitais aos empreendimentos mineiros. Atualmente existem diversos estudos, desenvolvidos pela iniciativa privada e pública, que buscam avaliar e monitorar os impactos físicos que os empreendimentos podem causar nas cavernas e suas áreas de influência. A realização de um monitoramento geotécnico em ambientes subterrâneos não se trata apenas da seleção de instrumentos e sim de um processo de engenharia abrangente, com premissas básicas que devem ser seguidas, além de análises específicas para otimização do projeto de monitoramento. Este trabalho busca apresentar as considerações e detalhes da instrumentação geotécnica contínua da caverna natural CAI-03, inserida em um ambiente de formações ferríferas, localizada no empreendimento da Anglo American, em Conceição do Mato Dentro-MG.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, Instrumentação, Geotecnia, Caverna Natural, Formações Ferríferas.

1 INTRODUÇÃO

O decreto nº 6.640, de 2008, determina que as cavernas naturais subterrâneas de relevância

máxima, incluindo sua área de influência, sejam integralmente preservadas. Cavernas de outros níveis de relevância, assim como suas áreas de influência, poderiam sofrer impactos mediante a

submissão de estudos específicos e proposição de medidas de compensação. A área de influência de uma cavidade, na falta de estudos específicos, é preliminarmente definida como 250 metros a partir da projeção horizontal da cavidade em poligonal convexa (CONAMA 347/2004).

Em empreendimentos minerários, os quais possuem rigidez locacional, não raro os raios de projeção (sejam preliminares ou oriundos de estudos de detalhamento) acabam por imobilizar reservas minerais ou gerar necessidade de alteração de infraestruturas de apoio vitais ao empreendimento.

A legislação permite, contudo, a avaliação de redução de raio de proteção de cavernas, desde que efetivados estudos específicos. Essa ferramenta é importante também, pois, possibilita a redução das áreas de influência de cavidades e, com isso, torna-se possível viabilizar empreendimentos ou mesmo evitar a supressão da caverna.

A vibração, gerada por desmontes de rochas, trânsito de equipamentos, operação de maquinários dentre outras ações necessárias para operação de uma mina é um fator determinante para geração de impacto em cavidades.

Em ambientes subterrâneos, tais como túneis e minas, técnicas de instrumentação para monitoramento de vibrações e variações de deslocamentos (internos ou externos) são aplicadas amplamente. Quando executadas com critério e qualidade, o risco em questão se torna controlável. A instrumentação geotécnica é uma técnica que ao longo dos anos vem mostrando resultados favoráveis e satisfatórios nesses ambientes. Analogamente, a aplicação dessas técnicas em cavidades naturais subterrâneas, somadas a conceitos técnicos de espeleologia, são ferramentas que podem ser utilizadas na determinação dos possíveis impactos que as cavidades estão sujeitas. Ou seja, em caso de ocorrência, conhecer, medir e quantificar esses impactos. Caso contrário, comprovar a não ocorrência de impactos em função das atividades citadas anteriormente.

Mediante a apresentação de estudos específicos, a área de influência da cavidade CAI- 03 foi delimitada em 150 metros,

conforme autorização do órgão ambiental. A solicitação foi feita pela empresa Anglo American - Minério de Ferro Brasil, a fim de viabilizar a instalação de um Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD) na área industrial de sua unidade no município de Conceição do Mato Dentro-MG.

Como parte do programa de monitoramento da cavidade, é fundamental detectar eventuais impactos físicos potencialmente gerados pela instalação do TCLD.

Neste trabalho está descrito como foi idealizado e executado o projeto de instrumentação sismográfica e geotécnica, simultaneamente, contínua da cavidade CAI-03, buscando realizar seu monitoramento e possíveis impactos relacionados às atividades do empreendimento em sua proximidade.

2 OBJETIVOS

Apresentar de maneira clara e objetiva como foi idealizada e executada a instrumentação geotécnica contínua da cavidade CAI-03, localizada na área industrial da Anglo American - Minério de Ferro Brasil.

Apresentar os dados obtidos na caracterização geotécnica da cavidade em questão e como essas informações puderam auxiliar na definição do projeto de instrumentação e na definição zonas de fragilidade geotécnica da cavidade.

Divulgar a comunidade geotécnica as principais características e comportamentos observados neste ambiente subterrâneo. Expor a metodologia empregada e a forma como os dados foram tratados para possíveis críticas e sugestões que possam engrandecer tecnicamente os estudos desenvolvidos pelas empresas MecRoc e Anglo American.

Reforçar a importância de estudos de caracterização geotécnica das cavidades naturais, assim como o monitoramento geotécnico para geração de dados e parâmetros que possam auxiliar em estudos futuros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido a partir da compilação dos dados e relatórios apresentados pela empresa MecRoc Engenharia Ltda. à Anglo American - Minério de Ferro Brasil, em função da prestação do serviço de monitoramento geotécnico contínuo da cavidade CAI-03 (Gontijo *et al.* 2015).

Para a execução do monitoramento primeiramente realizou-se um levantamento bibliográfico sobre a área, envolvendo estudos espeleológicos em cavidades de minério de ferro, estudos geotécnicos e geomecânicos aplicados a ambientes subterrâneos, bem como geologia e aspectos fisiográficos principais da área. Foram analisados também estudos e informações disponibilizadas pela contratante acerca do acervo espeleológico na área do empreendimento, assim como do histórico e características da própria CAI-03.

Com base nessas informações foram definidas e orientadas as visitas técnicas realizadas na cavidade e suas proximidades. Durante as visitas em campo foram levantadas informações importantes sobre a cavidade e seu entorno para subsidiar o projeto de instrumentação da cavidade. Durante esta fase de campo foi realizada também uma caracterização geotécnica da cavidade a fim de definir áreas de fragilidade para orientar e otimizar o projeto de instrumentação.

De posse dessas informações foi finalizado o projeto de instrumentação da cavidade com o dimensionamento e confecção dos instrumentos e acessórios necessários.

Nos dias 04 e 05 de novembro de 2014, a equipe MecRoc, juntamente com colaboradores da própria Anglo American - Minério de Ferro Brasil instalaram os instrumentos na cavidade CAI-03 alimentados com energia solar.

Com a cavidade instrumentada, foi definido um cronograma de coleta, interpretação e emissão de boletins sobre os dados obtidos.

Os softwares utilizados na confecção deste trabalho foram: *Microsoft Office*, *ArcGIS*, *SMDR*, *AutoCAD*, *Phase*, *Dips* e *Unwedge*.

4 CONTEXTO LOCAL

4.1 Localização da Cavidade

A cavidade CAI-03 localiza-se na área industrial da Anglo American - Minério de Ferro Brasil, município de Conceição do Mato Dentro-MG, na localidade conhecida por Serra do Sapo. Encontra-se sob as coordenadas UTM 665295E / 7911337N, zona 23K (SAD-69), a uma cota de 786m (Figura 1).

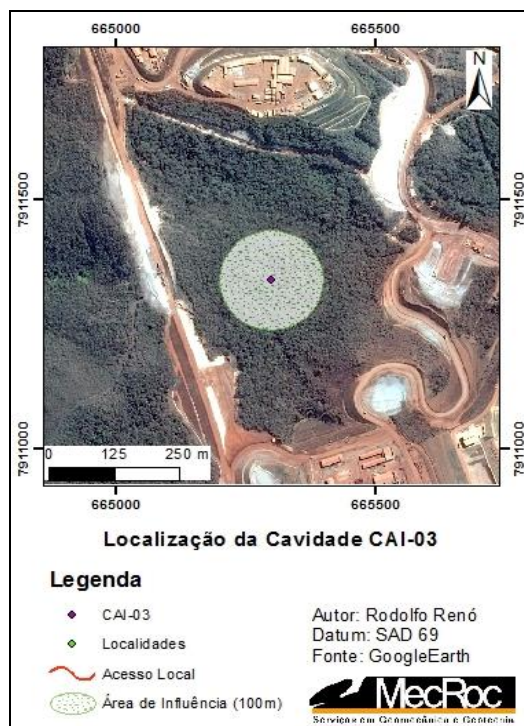


Figura 1. Localização da cavidade CAI-03 na área da empresa Anglo American - Minério de Ferro Brasil.

Distante 189m a W da cavidade encontra-se uma estrada de acesso e um Transportador de Correia de Longa Distância (TCLD), ambas na direção N-S. Outras estruturas encontram-se a uma distância maior como, por exemplo: 320m à N inicia-se área industrial; 310m a S inicia-se área industrial; 210m à E encontra-se uma estrada de acesso; 250m a SE se encontra uma estrada de acesso.

4.2 Geologia

A cavidade desenvolve preferencialmente no contato entre a canga sotoposta ao itabirito. Esse contato é visível quase que na totalidade da cavidade e caracteriza-se por ser uma superfície bastante irregular e interdigitada.

O itabirito constitui uma rocha de protólito sedimentar de origem química, depositada em

ambiente oxidante e posteriormente metamorfozizada. É estruturada por bandamentos alternados, milimétricos a centimétricos, de porções compostas por silicatos e porções compostas por minerais de óxido de ferro, principalmente hematita, magnetita e martita.

Por se tratar de uma rocha metamórfica deformada, é possível identificar planos de fraturas, juntas, zonas de cisalhamento, além do acamamento. Também é possível identificar dobramentos, lineações de interseções e indicadores cinemáticos.

A canga sobreposta ao itabirito é caracterizada por apresentar um baixo selecionamento, com seixos pouco arredondados a angulosos, variação granulométrica acentuada indo de matacões a cascalho, compostos por itabirito e quartzo de veio. Possui uma matriz arenosa com granulometria de areia grossa a muito fina, juntamente com argilominerais de granulometria silte e argila.

Aparentemente, existe uma granodecrescência ascendente que pode evidenciar uma movimentação desse material anterior a sua oxidação e cimentação, entendido como um material coluvionar.

Acima da canga existe uma camada de solo de espessura variada que permite o desenvolvimento de uma vegetação mais densa em alguns pontos.

4.3 Características Espeleológicas

De acordo com o CANIE – CECav/ICMBio existem 115 cavidades cadastradas na região, 72 no município de Conceição do Mato Dentro e 43 no município de Alvorada de Minas. Dessas cavidades 58 são em formações ferríferas (canga e/ou itabirito), 37 são em rochas siliciclásticas e 20 não possuem identificação do tipo de rocha encaixante.

A cavidade CAI-03, localiza-se na vertente W de uma drenagem na área industrial da Anglo American - Minério de Ferro Brasil. Caracteriza-se por ser uma cavidade encaixada na interface entre as formações ferríferas bandadas (BIF's) e a canga.

Sua morfologia pode ser definida como

linear com um desenvolvimento principal na direção N-S. Apresenta uma projeção horizontal de 74m, desnível de até 2,50m, área de 396m² e um volume aproximado de 485m³. Possui apenas uma entrada de 16m de largura e 3,00 metros de altura, localizada em uma quebra no relevo de direção E-W em meia encosta (Auler, 2011). Na porção mais interior da cavidade pode-se observar duas galerias paralelas, interconectas por vazios entre pequenos pilares remanescente do próprio processo espeleogenético (Figura 2).

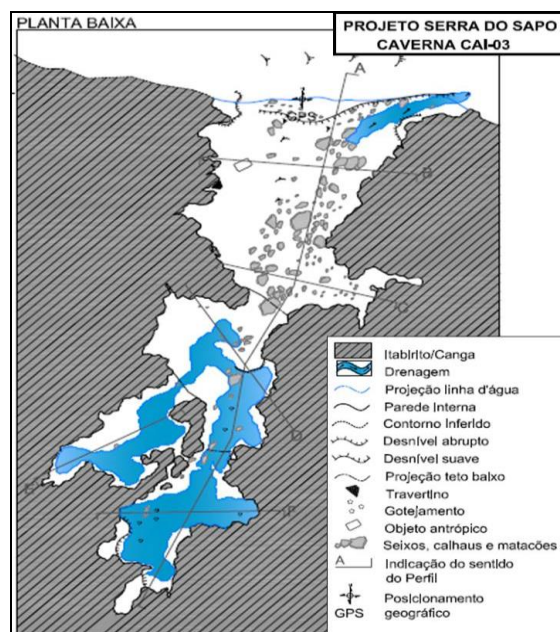


Figura 2. Planta baixa da cavidade CAI-03(adaptado de Auler, 2011).

5 CARACTERIZAÇÃO ZONEAMENTO GEOTÉCNICO

E

Em um levantamento de campo todas as características que estão relacionadas à geotecnia da cavidade foram observadas. As características foram tratadas espacialmente buscando uma setorização das áreas semelhantes.

Para a caracterização geotécnica da cavidade foram descritos aspectos relacionados às litologias presentes, estrutural, hidrologia, hidrogeologia, dinâmica dos sedimentos, qualidade do maciço rochoso e espeleogênese.

Ao longo das galerias da cavidade foram identificadas apenas as formações ferríferas bandadas e o manto de canga como exemplares

de encaixante.

No itabirito foram observadas diversas estruturas, tais como: acamamento; foliação; lineação de interseção; dobramentos; dobras parasíticas em “S”; estruturas oclares; planos de cisalhamento; três famílias de juntas; uma família de fraturas.

Já na canga é possível identificar apenas fraturas e juntas delimitadas por superfícies bastante irregulares. Algumas porções da canga na cavidade apresentam fraturas abertas pela gravidade delimitando blocos suspensos no teto.

Todos os sedimentos observados são gerados na própria cavidade, sem evidências de aporte externo. O sentido geral dos sedimentos é saindo da cavidade e o transporte desses é regido principalmente pela movimentação de água nas épocas chuvosas e pela gravidade nas regiões inclinadas.

Durante a visita não foi identificada a presença de água na cavidade, entretanto podemos identificar indícios da presença da mesma em épocas de chuva, tanto por fluxos contínuos e empoçamentos durante a estação chuvosa, como fluxos torrenciais (enxurradas) durante as chuvas localizadas.

Para obtenção da qualidade do maciço rochoso foram utilizadas as técnicas desenvolvidas por Barton (1974). Em média a a qualidade levantada pelo índice Q teve um resultado de 2,099 para o itabirito e 0,667 para a canga.

Em termos de espeleogênese a circulação de água através da família de fraturas F1, na interface com a canga, promoveu a dissolução e o carreamento do itabirito. Na área onde esse fluxo sai do maciço a dissolução e o carreamento das partículas é mais intenso, proporcionando uma maior dimensão dos condutos. Dessa forma, o teto da cavidade passou a ser composto de canga ocorrendo também a interligação de pequenos salões e galerias. Com isso ocorrem processos de colapso do teto composto de canga devido ao aumento gradativo dos vãos e a eliminação dos pilares entre os pequenos salões. Esse processo provoca o soterramento das galerias pela canga que posteriormente é carregada pela erosão para fora da cavidade.

Com base nessas informações obtidas na

caracterização geotécnica realizaram-se ainda análises comparativas relativas aos tamanhos dos vãos, mecanismos de ruptura, sinais de instabilidade e a morfologia dos condutos, que é ilustrada na Figura 3.



Figura 3. Entrada da cavidade ilustrando morfologia do conduto.

A partir da setorização dos aspectos geotécnicos, para cada característica foi definida uma escala de pontuação comparativa em relação à estabilidade, características mais estáveis receberam uma pontuação maior e estruturas com maior possibilidade de movimentação ou colapso foram penalizadas.

Ao final a somatória de cada área sobreposta resulta em um grau comparativo de fragilidade geotécnica da cavidade em função de estímulos físicos externos (Figura 4). Como a qualidade do maciço rochoso é influenciada pela presença de água foi realizada também uma simulação para a estação chuvosa ao longo dos pontos com evidências de aporte (Figura 5).

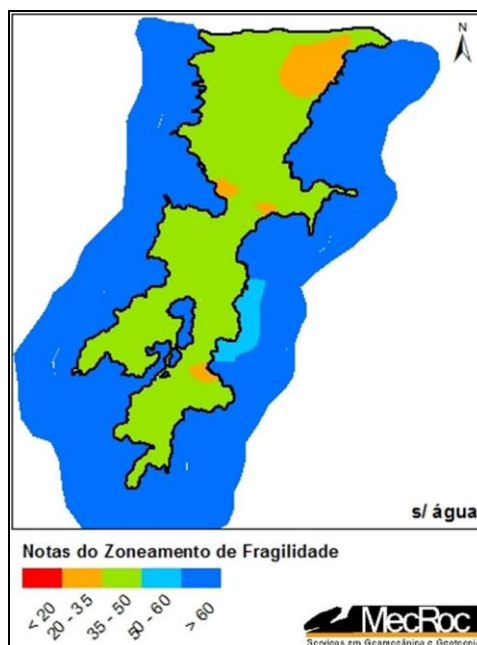


Figura 4. Resultado do zoneamento geotécnico da cavidade CAI-03 simulada para o maciço sem água.

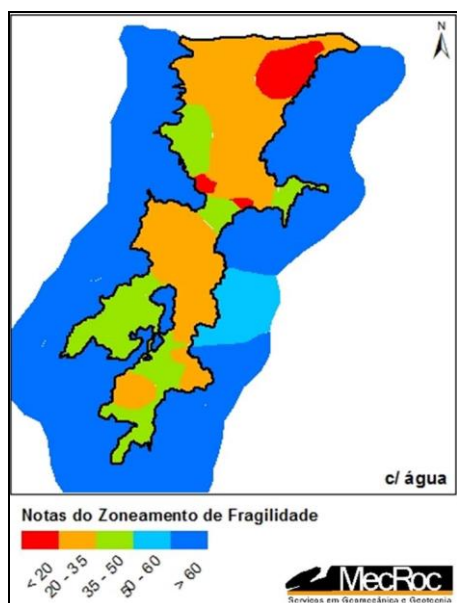


Figura 5. Resultado do zoneamento geotécnico da cavidade CAI-03 simulada para o maciço com água.

6 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

Com base no zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade foram definidos três pontos para a instalação de sensores de variação de deslocamento do maciço e um ponto para o monitoramento das vibrações (com geofone triaxial).

O equipamento escolhido para realizar o monitoramento foi o Sistema de Monitoramento de Dinâmica de Rochas – SMDR, desenvolvido pela MecRoc Engenharia Ltda. para atender as necessidades de monitoramento geotécnico de cavidades naturais. O SMDR conta com sensores capazes de executar o monitoramento de maneira contínua. Além disso, o aparelho possui um sistema eletrônico central responsável pelo processamento e armazenamentos dos sinais de todos os sensores utilizados. Todos os componentes do SMDR são resistentes às intempéries.

Para situações especiais, como cavidades naturais, que, geralmente, se encontram em locais afastados e, até mesmo, de acesso limitado, o uso de sistemas autônomos pode ser a única fonte de energia viável e, neste caso, tem-se como alternativa a energia fotovoltaica. O painel solar foi instalado próximo à estrada

que dá acesso à cavidade, fora do raio de influência da cavidade, minimizando a possibilidade de impactos ambientais e facilitando a manutenção e a desmobilização dos equipamentos.

Foram definidos três pontos para o monitoramento contínuo de variação de deslocamento. Dois deles, por se tratarem de blocos instáveis no teto, foram instrumentados com a utilização de uma barra telescópica de fixação (Figura 6), para evitar quaisquer perfurações no maciço, buscando manter a integridade desta. O outro ponto, por ter sido escolhido para monitorar uma possível movimentação das paredes do vão de entrada da cavidade, foi instalado com gesso.



Figura 6. Bloco de canga isolado por descontinuidades instrumentado com a barra telescópica.

O sensor de vibração foi instalado na canga por se tratar do material que será monitorado no caso da movimentação, buscando correlacionar a intensidade das vibrações com a reação da movimentação/deslocamento do maciço (Figura 7).



Figura 7. Sensores de vibração - geofone (esquerda) e de deslocamento (direita) fixados com gesso.

A central de coleta de dados foi instalada na entrada da cavidade, evitando acesso constante de pessoas no local, para coleta de dados, e consequentemente diminuindo as chances de acidentes e impactos à cavidade (Figura 8).



Figura 8. central de armazenamento de dados instalados na proximidade da entrada da cavidade.

7 MONITORAMENTO DA CAVIDADE

A coleta das informações foi realizada a partir da conexão de um computador à central de armazenamento localizada logo na entrada da cavidade. A conexão foi realizada através de um cabo e com a utilização do software específico do SMDR, no qual foram gerados relatórios das medidas dos sensores de deslocamento e informações sobre os eventos de vibração detectados.

Pela análise geral dos dados de deslocamento coletados pode-se concluir que não existe uma movimentação aparente nos sensores no período de monitoramento. Observam-se nos gráficos desvios máximos de deslocamentos em todos os sensores, menores que 1mm, em que não existe uma tendência aparente que possa indicar a ocorrência de uma movimentação. Esse sinal cíclico, de baixa amplitude que deve ser relacionado apenas a ruído dos sensores e sistemas (Figura 9).

Nos dados descarregados no monitoramento foram encontrados três arquivos de vibração no sistema. Pela característica dos dados observados podemos observar que não são

vibrações características de detonações, trânsito de equipamentos ou o TCLD. Nota-se apenas um pico, de intensidade muito baixa, podendo talvez ser correlacionado pela interação de algum animal com o sensor (Figura 10).

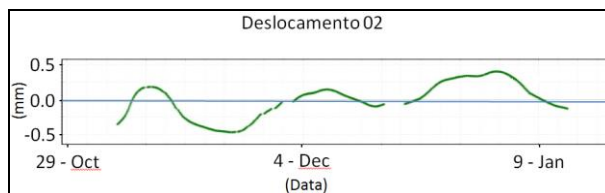


Figura 9. Exemplo do ruído do sensor de deslocamento com uma variação cíclica de baixa amplitude.

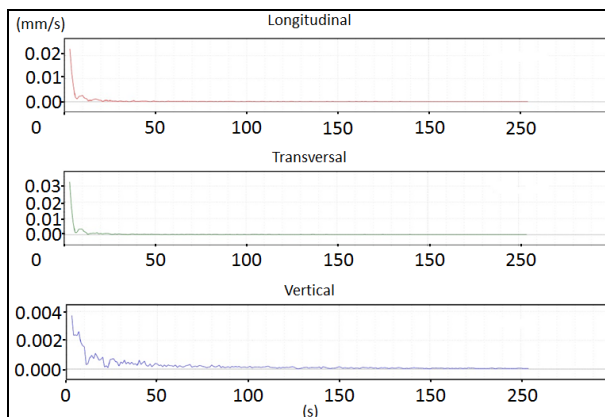


Figura 10. Exemplo do evento de vibração registrado em 22/12/14 às 18:52:20h.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como resultado final do trabalho de monitoramento foi possível concluir que todas as intervenções realizadas no empreendimento, fora dos 150m de raio da área de influência da cavidade CAI-03, não foram intensas o suficiente para causar impactos físicos, quantificados pelos sensores, na cavidade.

O estudo mostra que as técnicas empregadas atualmente nos monitoramentos subterrâneos de maciços rochosos podem ser empregadas com sucesso em monitoramentos geotécnicos de cavidades naturais subterrâneas. Essa aplicação deve levar em consideração as peculiaridades dos ambientes cavernícolas, assim como um amplo entendimento dos processos dinâmicos atuantes na cavidade para uma visão real dos possíveis impactos que a cavidade está exposta.

Uma caracterização preliminar da cavidade e um zoneamento de fragilidade geotécnica se

mostra um recurso muito importante, pois através dele é possível escolher o método de monitoramento, dimensionar corretamente os equipamentos, além da definição dos locais prioritários para a instalação dos sensores.

O monitoramento de locais prioritários é de grande importância, uma vez que caso ocorra alguma manifestação causada por agentes externos, estes serão identificados com uma maior rapidez nos locais de maior fragilidade. Desta forma, ações mitigadoras dos impactos, caso sejam identificados, podem ser tomadas com maior antecedência, mantendo o patrimônio espeleológico protegido.

A realização de estudos de vibração detalhados permite a idealização de curvas de danos e atenuação para diferentes tipos de ambientes. Desta forma, seriam necessárias bibliotecas com uma quantidade de informações considerável acerca do comportamento das vibrações, além da disponibilização de informações detalhadas sobre a geologia do local e plano de fogo utilizado na área.

Para compormos o estado da arte da espeleologia, com aderência aos princípios de confiabilidade do controle geotécnico de cavidades que sofram impactos ou situem-se adjacentes a empreendimentos de alto impacto, julgamos ser necessário incentivar e sistematizar as ações de monitoramento contínuo, com vistas ao estabelecimento de parâmetros seguros de operação em qualquer contexto espeleológico, colaborando com a estruturação da análise de impactos de empreendimentos frente áreas de influências de cavidades. Esse procedimento, certamente, aumentará a segurança operacional dos grandes empreendimentos e, concomitantemente, permitirá maior controle e precisão na valorização e preservação do patrimônio espeleológico nacional.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A, pela disponibilização das informações necessárias, além do auxílio durante a execução de todas as atividades.

Agradecemos a equipe técnica AERON por

apoiar em todos os momentos do monitoramento, desde instalação, coleta dos dados e tratamento destes.

REFERÊNCIAS

- Auler, A. 2011. Perímetro de Proteção Cavidade CAI-03 – Anglo American, Carste Consultores Associados Ltda., Belo Horizonte, MG, BRASIL, 18p.
- Barton, N.R., Lien, R. and Lund, J. 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the design of Tunnel Support. *Rock Mech.* 6(4), 189-239.
- Brasil. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Decreto nº 6.640, 7 novembro 2008, dá nova redação aos arts. 1o, 2o, 3o, 4o e 5o e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional.
- 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.
- Cadastro Nacional de Informações Espeológicas – CANIE. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas / Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>>. Acesso em: 10jan. 2015.
- Gontijo, A. et. Al. 2014. Utilização de Sensor Ótico para Monitoramento Contínuo de Convergência em Ambientes Subterrâneos. *Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, CORAMSEG 2014, Goiânia, Anais.*
- Ministério do Meio Ambiente - MMA. Resolução CONAMA nº 347, de 10 de setembro 2004. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeológico. *Diário Oficial da União*, 13 de setembro de 2004. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?co_dlegi=452>. Acesso em: 30mar. 2016.