

Levantamento de Dados Geomecânicos em Cavidades em Formação Ferrífera Utilizando Laser Scanner 3D

Ramon Araújo

Vale, Nova Lima, Brasil, ramon.araujo@vale.com

Cristiane Silva Sebastião

Coffey, Belo Horizonte, Brasil, cristiane.sebastiao@coffey.com

Mauri Lopes Ferreira

Coffey, Belo Horizonte, Brasil, mauri.lopes@coffey.com

Michelle Galdeano

Coffey, Belo Horizonte, Brasil, michelle.galdeano@coffey.com

Leonardo Soares

Coffey, Belo Horizonte, Brasil, leonardo.soares@coffey.com

Iuri Brandi

Vale, Belo Horizonte, Brasil, Iuri.brandi@vale.com

Romero César Gomes

UFOP, Ouro Preto, Brasil, romero@em.ufop.br

RESUMO: A elaboração de estudos geotécnicos para cavidades naturais subterrâneas nas proximidades de lavra mineral tem como objetivo compreender o comportamento geomecânico dos maciços onde essas cavidades estão inseridas e monitorar suas estruturas, visando garantir a integridade física do ambiente, frente a sua necessidade de preservação. Essa análise possibilita o entendimento dos mecanismos de resposta das cavidades frente às forças impostas para fragmentação das rochas, provocadas por ações naturais ou antrópicas. A adoção de um raio de proteção de 250 metros ao entorno de cavidades, estabelecido por lei, torna-se o grande desafio para a indústria minerária, uma vez que exerce influência significativa nos processos de licenciamento ambiental, seja para novos projetos ou expansão de alguns empreendimentos. Parte essencial nos estudos de estabilidade geotécnica, o mapeamento de classes geomecânicas em cavidades desenvolvidas em formações ferríferas apresenta uma série de dificuldades, entre elas a obtenção de medidas estruturais precisas com bússola em ambiente com forte influência magnética, subterrâneo, frequentemente de difícil acesso e dispondo de pouca ou nenhuma luminosidade. Frente a estas dificuldades e embasado nas recomendações da ISRM - International Society for Rock Mechanics Commission on Testing Methods, é justificada a utilização de levantamentos de laser scanner 3D, sendo possível a obtenção de parâmetros para classificação geomecânica, realização de medição de estruturas geológicas e identificação de litotipos nas cavidades. O laser scanner 3D já é utilizado em estudos espeleológicos para levantamentos topográficos de detalhe. Esta tecnologia tem causado uma grande revolução nas atividades de mapeamento e levantamento de dados de campo, possibilitando a visualização em ambiente de realidade virtual por equipes multidisciplinares, trazendo inúmeros ganhos para os estudos espeleológicos, incluindo um aumento de produtividade e redução da exposição dos profissionais a riscos de campo. Este artigo apresenta os resultados do

mapeamento geomecânico de uma cavidade em formação ferrífera realizado com o auxílio de ambiente de realidade virtual a partir do escaneamento da cavidade por laser scanner 3D e validação das informações em campo. A classificação geomecânica adotada foi o RMR de (Bieniawski, 1989), no entanto a metodologia pode ser aplicada para obtenção de parâmetros para diversos sistemas de classificação geomecânica.

PALAVRAS-CHAVE: Cavidades em Formação Ferrífera, Levantamento Litoestrutural, Laser Scanner 3D.

1 INTRODUÇÃO

A interferência de empreendimentos com áreas de influência direta de cavidades tem exigido a adoção de medidas de controle para o monitoramento das condições de integridade física de cavidades naturais subterrâneas durante as etapas de implantação e operação.

Dentro desse contexto, a estabilidade física de cavidades é influenciada pelo comportamento geomecânico dos seus litotipos constituintes, que por sua vez é dependente das estruturas geológicas, que traduzem descontinuidades presentes no maciço e de sua condição de resistência. O levantamento de parâmetros para estudo deste comportamento geomecânico englobam a determinação, tradicionalmente em campo, de características geométricas de descontinuidades, utilizando-se equipamentos como bússola geológica e trena. No ambiente de cavidades, as limitações de acesso, tempo e condições de visibilidade, dificultam a execução dos trabalhos de campo. No ambiente de mineralizações ferríferas, a influência do magnetismo pode acarretar em dificuldades adicionais ao uso da bússola.

Frente a estas dificuldades, o presente estudo realizou o mapeamento das descontinuidades de uma cavidade em mineralização de ferro na região de Carajás, utilizando um modelo 3D obtido através de escaneamento a laser.

O mapeamento foi realizado em uma sala de realidade virtual (RV) utilizando o software Geovisionary 3 (Figura 4). A visualização do modelo tridimensional da cavidade em ambiente de RV possibilita uma imersão na cavidade de forma altamente realística, para identificar de forma precisa os atributos geométricos que podem ser medidos e digitalizados, possibilitando uma interpretação

inicial de parâmetros visuais de contatos litológicos, preenchimento de fraturas, presença de água, através da observação da cor e brilho das nuvens de pontos 3D produzidas.

O levantamento em RV englobou a determinação de parâmetros geométricos das descontinuidades, tais como atitude, persistência, abertura e espaçamento, obtidos com precisão para toda a cavidade. Através destes dados, foi possível calcular o RQD volumétrico e o grau de fraturamento do maciço e iniciar uma setorização do ambiente. Com a obtenção destes dados e as observações visuais realizadas foi iniciada uma classificação geomecânica da cavidade em estudo.

Após o estudo da cavidade em ambiente RV, foi realizada uma etapa em campo, para validação dos dados obtidos e realização de testes de resistência a compressão uniaxial com o martelo de Schimdt.

Os dados em campo foram utilizados para complementar a classificação geomecânica, obtida através do Rock Mass Rating (RMR).

O sistema de classificação geomecânica RMR foi desenvolvido por Bieniawski nos anos de 1972-1973 e sofreu modificações posteriores por este autor nos anos de 1974, 1976, 1979 e 1989.

A avaliação do maciço rochoso pela metodologia desenvolvida por Bieniawski é realizada através do somatório de pesos atribuídos a seis parâmetros, sendo estes:

- 1- Resistência à compressão uniaxial da rocha;
- 2- Designação da Qualidade da Rocha (RQD);
- 3- Espaçamento entre as descontinuidades;
- 4- Condição das descontinuidades;
- 5- Condições da água subterrânea;
- 6- Orientação das descontinuidades em relação à escavação.

Estes parâmetros foram obtidos através do

levantamento de dados em ambiente RV e em campo.

A partir da interpretação de informações 3D, utilizando-se principalmente os produtos gerados no escaneamento a laser destas cavidades, foi possível realizar a diferenciação e delimitação das classes geomecânicas no software Datamine Studio 3.

2 ÁREA DE ESTUDO

A cavidade estudada localiza-se nas proximidades da mina N4EN, no município de Parauapebas, porção sul do Estado do Pará. A mina N4EN está inserida na Província Carajás, com corpos de minério inseridos nos platôs da Serra de Carajás, que contém uma das maiores províncias minerais do planeta. A Figura 1 apresenta a localização da cavidade.

A cavidade N4E-0026 é desenvolvida predominantemente no contato entre a formação ferrífera da Formação Carajás e a carapaça de canga que recobre a mineralização.



Figura 1 - Localização da cavidade N4E – 0026

3 MÉTODOS UTILIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Aquisição e processamento de dados

Para este trabalho foi escolhido o laser Scanner Leica C10, mostrado na Figura 2, por conter características técnicas e físicas que possibilitaram o levantamento. O equipamento é compacto e de fácil transporte, o que possibilitou a entrada em pequenos condutos, áreas de rastejo e ou com dificuldades de

locomoção sem perder a qualidade nos levantamentos.

Possui um campo de visão de 360° na horizontal e 270° na vertical, com câmera digital embutida de quatro megapixels com ajuste automático de luminosidade e foco.



Figura 2 – Laser scanner utilizado na cavidade N4E – 0026

O resultado desta etapa de trabalho foi a geração de uma nuvem de pontos colorida (RGB) preparada para ser diretamente visualizada em ambiente virtual, apresentando o contexto morfológico e geométrico da cavidade e a sua inserção na paisagem dentro de Modelos Digitais de terreno (MDT), georeferenciadas. A malha 3D gerada através das nuvens de pontos se integra com softwares CAD e SIG na geração de subprodutos e possibilita cálculos e estimativas intracavernícola e exocavernícola. Seções paralelas, comumente chamadas de perfis e cortes, possuem altíssimo detalhamento e precisão, facilitando a localizações de áreas de interesse dentro da cavidade, como, espeleotemas, canalículos, contatos geológicos, discontinuidades e áreas de instabilidade geotécnica.

A velocidade de escaneamento de 50.000 pontos por segundo reproduziram de forma muito realística o ambiente cavernícola e sua morfologia na paisagem, matematizando de forma eficaz no que se refere localização espacial das estruturas existentes.

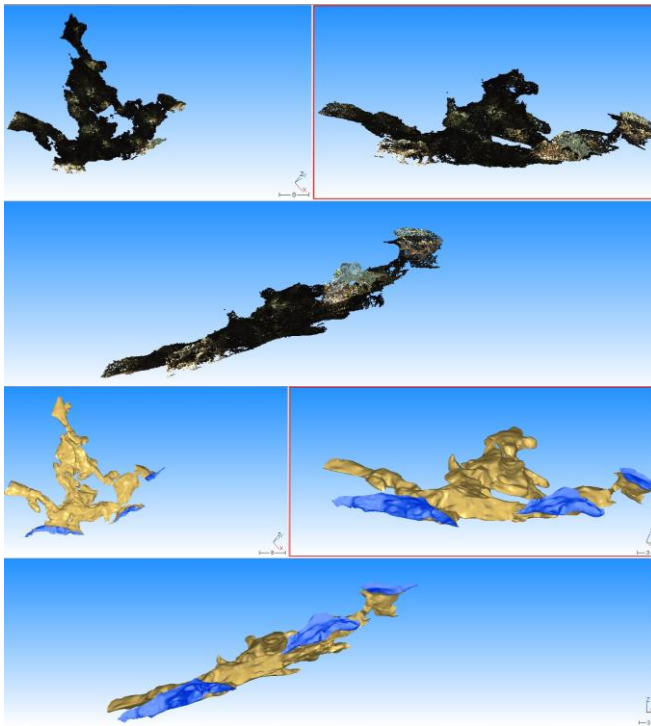


Figura 3 - Nuvem de pontos e malha 3D gerada com o escaneamento a laser da cavidade N4EN - 0026

3.2 Levantamento de descontinuidades em ambiente de RV

Nesta etapa foi realizado um levantamento das descontinuidades em uma sala de realidade virtual (Figura 4).



Figura 4. Sala de Realidade Virtual (RV) utilizada para o mapeamento

Todas as descontinuidades identificadas foram digitalizadas e medidas (Figura 5).

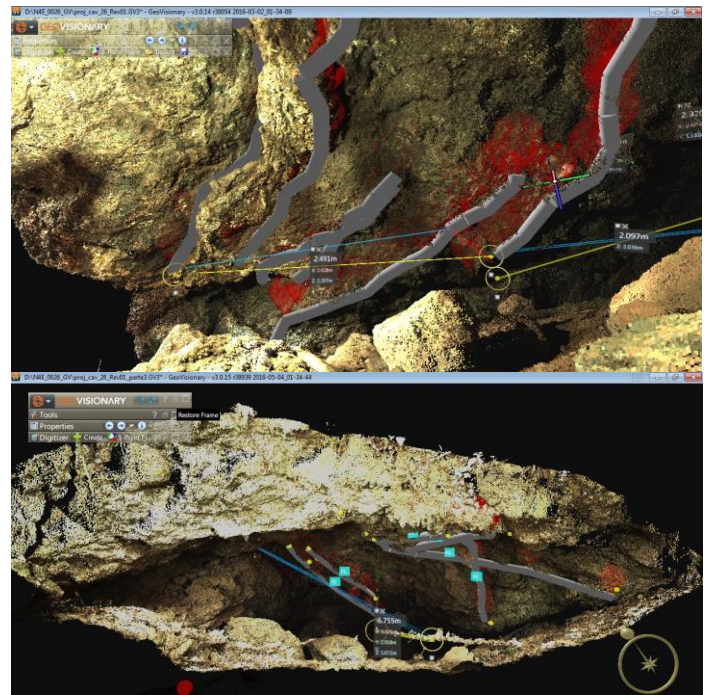


Figura 5. Identificação e medição das descontinuidades em ambiente de realidade virtual

Nesta etapa foram avaliados os seguintes parâmetros:

a) Resistência à compressão uniaxial

Este parâmetro foi avaliado de maneira preliminar utilizando principalmente as características de cor e brilho observadas nas imagens e foi medido posteriormente em campo.

b) Designação da Qualidade da Rocha (RQD)

Através das famílias de descontinuidades identificadas na cavidade, o RQD foi calculado utilizando a relação proposta por Palmström (1982):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

Onde J_v representa o índice volumétrico (somatório do número de descontinuidades por unidade de comprimento, para o conjunto das famílias).

c) Espaçamento entre as descontinuidades

Os planos de fraqueza existentes no maciço

rochoso (descontinuidades) foram medidos observando-se a distância média entre os planos na direção perpendicular a estas.

d) Condição das descontinuidades

Através do ambiente RV foi possível avaliar e medir a separação ou abertura das descontinuidades, a sua continuidade ou persistência, e em alguns casos, quando as descontinuidades possuíam maior abertura, a rugosidade de sua superfície.

O grau de intemperismo e o tipo de materiais de preenchimento na superfície dos planos de descontinuidade não foram passíveis de obtenção em ambiente de realidade virtual e foram definidos na etapa de campo.

e) Condições de águas

A condição de água no maciço rochoso pode ser identificada apenas nos pontos com ocorrência de gotejamento e fluxo, sendo esta avaliação complementada com a etapa de campo.

f) Atitude das descontinuidades

Os planos de descontinuidades foram medidos diretamente no ambiente de RV, obtendo-se uma tabela com medições dos planos Dip/dip direction.

3.3 Levantamento de dados em campo

Os parâmetros levantados em ambiente de RV foram validados de maneira muito otimizada através de uma visita à cavidade. Nesta visita foram levantados os parâmetros de resistência à compressão uniaxial, preenchimento das descontinuidades que não foram possíveis de obtenção através das imagens.

Resistência à compressão uniaxial

No ambiente de cavidade, não é possível a utilização de golpes de martelo de geólogo para estimar as condições de resistência do maciço para realização de estimativa de resistência a compressão uniaxial, devido à necessidade de preservação das condições deste ambiente. Em solução a este problema, foi utilizado ensaios de

campos obtidos com o martelo de Schmidt em 28 pontos da cavidade. Os valores de resistência obtidos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de resistência a compressão uniaxial – Martelo de Schmidt

Ponto	Litologia	UCS (MPa)
1	Canga detrítica	15.9
2	Canga detrítica	19.2
3	Jaspilito	13.7
4	Canga detrítica	8.4
5	Jaspilito	12.5
6	Canga estruturada	10.4
7	Jaspilito	7.9
8	Canga estruturada	8.3
9	Canga estruturada	8.8
10	Canga estruturada	11.2
11	Canga detrítica	6.1
12	Canga detrítica	6.2
13	Canga detrítica	6.5
14	Canga detrítica	7.2
15	Canga detrítica	4.6
16	Canga detrítica	6.3
17	Canga detrítica	4.7
18	Canga detrítica	11.8
19	Canga detrítica	4.9
20	Canga detrítica	9.2
21	Canga estruturada	16.1
22	Canga estruturada	5.3

Os demais parâmetros foram levantados ou validados através da utilização de uma ficha de campo adequada para classificação geomecânica RMR.

3.4 Geração de modelo classes geomecânicas 3D

Os dados levantados em ambiente de realidade virtual e validados em campo foram aplicados ao sistema de classificação RMR de (Bieniawski, 1989) de forma a avaliar os maciços da área com relação ao comportamento geomecânico. Os resultados obtidos a partir desta análise permitiram distinguir classes geomecânicas diferenciadas para obtenção de

um modelo geomecânico que foi construído em 3D, utilizando os dados interpretados em ambiente RV no software Datamine Studio 3.

A partir da aplicação dos sistemas de classificação geomecânica foi realizado a diferenciação em classes ou domínios geomecânicos, utilizando o ambiente 3D, principalmente os produtos gerados no escaneamento a laser destas cavidades, para visualização e interpretação das informações geradas.

O modelo geomecânico delimitou domínios na área em análise com comportamentos geomecânicos potencialmente diferenciados em termos de resistência e deformabilidade.

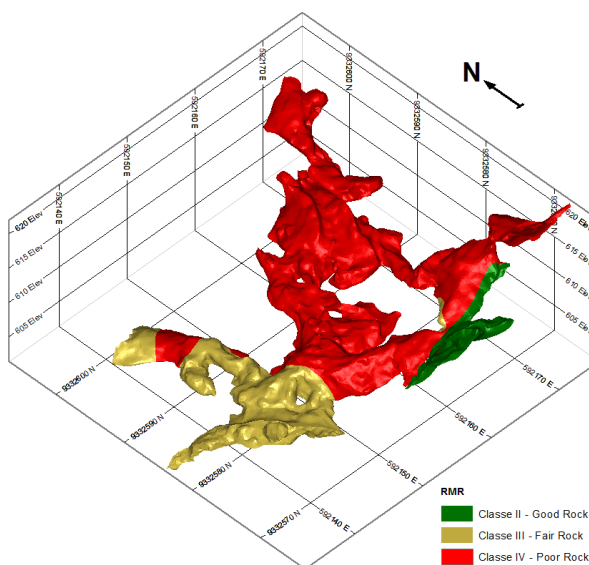


Figura 6 - Modelo de classes geomecânicas 3D - RMR Bieniawski da cavidade N4E – 0026

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A obtenção de estudos geomecânicos através de modelo 3D obtido através de escaneamento a laser apresentou resultados muito satisfatórios.

O trabalho realizado permitiu a obtenção de modelo virtual 3D altamente realístico e preciso com qualidade adequada para interpretações geológicas, estruturais e geomecânicas.

O ambiente virtual possibilitou a análise detalhada da cavidade, mesmo dos trechos com difícil acesso, vencendo as limitações de visualização e acesso tão comuns às cavidades.

A metodologia utilizada reduziu significativamente o tempo de permanência na cavidade, trazendo segurança as equipes de

trabalho e potencializando trabalhos de conferência e revisão das informações.

A obtenção de dados de descontinuidade em ambiente de realidade virtual possibilitou uma coleta de dados espaciais das estruturas com alta precisão e confiabilidade.

O avanço destas tecnologias de aquisição, processamento e interpretação de dados tem permitido a geração de modelos muito mais precisos para diversos ambientes e condições geológicas. A utilização destas técnicas também é promissora para mapeamentos de pontos de ocorrência de queda de blocos e delimitação de pontos de fragilidade na cavidade e composição de um mapa de risco para este ambiente.

REFERÊNCIAS

- BCRA, British Cave Research Association. Disponível em: <<http://bcra.org.uk/surveying/index.html>> Acesso em: 03/01/2015.
- Beraldin J, Blais F, Boulanger P, Cournoyer L, Domey J, El-Hakim SF, Godin G, Rioux M, Taylor J, 2000, *Real world modeling through high resolution 3D imaging of objects and structures*, ISPRS Journal of Photogrammetry & remote Sensing 55 (2000), pp. 230-250.
- Basu, A. e Aydin, A. (2005). *Predicting uniaxial compressive strength by point load test: Significance of cone penetration*. Rock Mechanics and Rock Engineering.
- Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs 15, 335-344. Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.
- Bieniawski, 1989, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- Palmström, A. 1982. *The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of jointing*. In: Proceedings of the Fourth International Congress IAEG, New Delhi, vol. V, 221–228.
- Torrecillas, Marcelo. *A realidade virtual em jornada das estrelas*. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Comunicação) - Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo. 2009.