



ANAIS do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Eldorado SP, 15-19 de julho de 2015 - ISSN 2178-2113 (online)



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia disponível gratuitamente em www.cavernas.org.br/33cbeanais.asp

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

BRANDI, I.; BARBOSA, M.; GUIMARÃES, R.. Uso do esclerômetro de Schmidt na avaliação da resistência geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferríferos, Carajás- PA. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. *Anais...* Campinas: SBE, 2015. p.627-634. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_627-634.pdf>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.
Consulte outras obras disponíveis em www.cavernas.org.br

USO DO ESCLERÔMETRO DE SCHMIDT NA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA GEOMECÂNICA DE CAVIDADES NATURAIS SUBTERRÂNEAS EM TERRENOS FERRÍFEROS, CARAJÁS- PA

GEOMECHANICAL EVALUATION STUDIES OF NATURAL UNDERGROUND CAVES IN CARAJÁS, PA
USING THE SCHMIDT SCLEROMETER

Iuri BRANDI; Marcelo BARBOSA; Rafael GUIMARÃES

Vale SA, Carajás PA.

Contatos: iuri.brandi@vale.com; marcelo.roberto.barbosa@vale.com; rafael.guimaraes@vale.com.

Resumo

Esse trabalho visa apresentar os resultados obtidos nos estudos de avaliação geomecânica de cavidades naturais subterrâneas em Carajás com o uso do esclerômetro de Schmidt. A esclerometria é um ensaio não destrutivo cujo objetivo é avaliar a dureza superficial de concreto ou maciço rochoso. Este instrumento e esta técnica foram aplicados em litologias da Formação Ferrífera Bandada para sua caracterização quanto a sua dureza, resistência, grau de alteração, e outras correlações. Este método não apresenta impacto ao meio ambiente e permite a continuidade das operações das minas a céu aberto. O uso deste instrumento é novo para esse tipo de cenário, porém seus resultados mostraram-se animadores em relação à definição das resistências geomecânicas das litologias testadas, e estão sendo associados a outros estudos geotécnicos.

Palavras-Chave: Esclerômetro de Schmidt; Resistência geomecânica; Estudos geotécnicos.

Abstract

This article presents the results achieved in the geomechanical evaluation studies of natural underground cavities in Carajás using the Schmidt sclerometer. The sclerometry is a non-destructive testing and the objective of this type of test is to assess the surface hardness of concrete or rock mass. This tool and this technique were applied in lithologies of banded iron formation for its characterization as its hardness, strength, degree of alteration, and other correlations. This method has no impact on the environment and allows the continued operation of the open pit mines. The use of this instrument is new to this scenario, however their results seems to be interesting compared to the definition of geomechanical resistance of the tested lithologies and have been associated with other geotechnical studies.

Key-words: Schmidt esclerometer; geomechanical strength; geotechnics study.

1. INTRODUÇÃO

Este documento apresenta os resultados preliminares obtidos pela Vale, no âmbito do projeto “Estudo Geomecânico de Cavidades em Carajás” em desenvolvimento nas cavidades situadas ao entorno das Minas de N4E e N4WS, Carajás - PA.

De acordo com a Portaria IBAMA 887 e Resolução CONAMA 347, a área de influência de uma cavidade deve abranger uma distância de proteção de 250 m a partir da sua projeção na superfície, até que estudos específicos determinem um perímetro de entorno definitivo.

A elaboração dos estudos geomecânicos para a área das cavidades naturais no entorno da mina tem como objetivos compreender o comportamento geomecânico dos maciços destas cavidades e analisar os possíveis mecanismos de rupturas nestas localidades, o que possibilitará, no futuro, a

compreensão da relação entre os possíveis impactos ocorridos em cavidades naturais em consequência das operações de lavra nas proximidades das respectivas cavidades analisadas. Esses estudos suportarão o desenvolvimento de uma metodologia que poderá ser implantado em qualquer cavidade natural em ambiente de formação ferrífera e que subsidiarão o estabelecimento de uma distância segura para as operações de mina, com intuito de preservar a área de entorno protetivo de acordo com a Portaria IBAMA 887 acima mencionada.

1.1 Localização

As minas N4EN e N4WS localizam-se no município de Parauapebas, no estado do Pará, a 30km de distância do município de Parauapebas. As minas pertencem ao Sistema Serra Norte, do Complexo Carajás, e são interligadas à área urbana

do município pelo acesso Rio Verde (Parauapebas) destaca-se a localização das minas em questão.
– Núcleo Urbano de Carajás. Abaixo, na Figura 1,



Figura 1. Imagem de satélite e modelo digital do terreno da área estudada.

1.2 Geologia

As minas de N4EN e N4WS estão inseridas na Província Carajás, localizada na porção sul do Estado do Pará, no município de Parauapebas, com corpos de minério inseridos nos platôs da Serra de Carajás.

A Província Carajás (Figura 2) representa a porção crustal mais antiga e melhor preservada do Cráton Amazônico. A Província Carajás é delimitada a norte pelo Domínio Bacajá, a leste, pela Província Tocantins, cujo limite é marcado pelo cavalgamento do Cinturão Araguaia, e a oeste, pelas rochas ígneas e sedimentares paleoproterozóicas da Província Amazônia Central que recobrem e cortam as rochas da Província Carajás.

A Província Carajás é dividida nos domínios Rio Maria e Carajás (CPRM 2008). O Domínio Rio Maria é caracterizado por uma crosta juvenil mesoarqueana, com sequências de greenstonebelts e granitóides tipo TTG. O Domínio Carajás, onde estão inseridas as minas N4EN e N4WS, é uma

região de crosta continental predominantemente neoarqueana, caracterizada principalmente por sequências metavulcanosedimentares e granitóides de alto K. (CPRM 2008).

A Província Carajás contém uma das maiores províncias minerais do planeta. A área de estudo está inserida em depósitos de ferro distribuídos ao longo de uma estrutura conhecida como sinclínório ou dobra de Carajás que agrupam-se em conjuntos denominados Serra Norte, Serra Sul, Serra Leste e São Félix. Os depósitos estão associados a Formação Ferrífera Bandadas (formação ferrífera bandada) da Formação Carajás que ocorrem intercalados entre unidades vulcânicas máficas, atribuídas à Formação Parauapebas, pertencentes ao Grupo Pará (CPRM 2008).

Em suas associações tectônicas da Província Carajás há presença dos Greenstones Belts arqueanos onde estão inseridas as formações Carajás e Parauapebas, ambas pertencentes ao Grupo Pará.

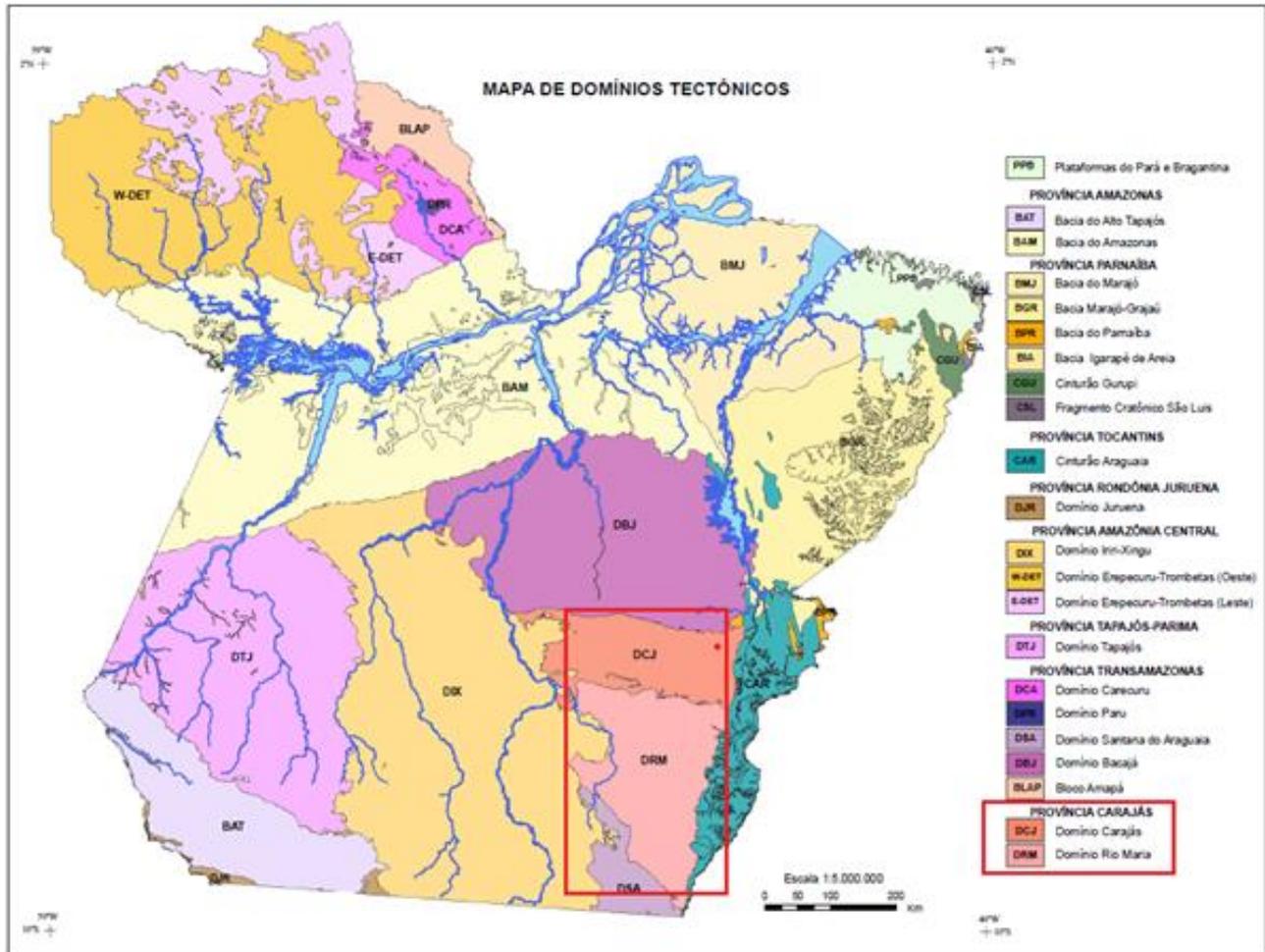


Figura 2. Mapa de domínios tectônicos do Estado do Pará (CPRM 2008).

2. METODOLOGIA

O uso da esclerometria foi um dos pilares desse estudo realizado nas cavidades de Carajás, e o ponto focal do artigo. O esclerômetro de Schmidt, também chamado Martelo de Schimidt, é utilizado internacionalmente em Mecânica das Rochas, sendo normatizado pela International Society for Rock Mechanics - ISRM (1978) e ASTM D5873 (2000).

No estudo realizado foi aplicada a metodologia de ensaio da ISRM (1978 – 2014), que preconiza a obtenção das seguintes informações:

- Descrição litológica do maciço rochoso (força, cor, textura / fábrica, intemperismo / alteração);
- A localização geográfica e profundidade de amostragem em paredes rochosas in-situ;
- Data do ensaio e condições climáticas (isto é, a exposição a temperaturas extremas, umidade, etc.);
- Número da amostra ou afloramento;
- Tipo de amostra (bloco de corte de serra, grande bloco de campo, frente de escavação e a exposição natural);
- O método de escavação (e.g. *blasting*, *ripping*, *mechanicalsplitting*, *boring*);
- Dimensões da amostra ou superfícies de exposição;
- a umidade da amostra durante os testes (teor de água (%)) ou em termos descritivos, tais como seca e úmida);
- tipo *Hammer* (L-, N- ou de outro tipo);
- Uso e natureza de fixação e apoio da base de aço;
- A orientação do eixo do martelo (direção), com impacto referência à horizontal;
- A orientação do eixo de martelo com referência a se manter intactas as características de anisotropia da rocha (por exemplo, laminação, foliação, xistosidade e lineação);
- Histograma de 20 leituras de ricochete (normatizados para direção de impacto

horizontal e ordenados em valor decrescente); a média, mediana, moda e intervalos estatísticos;

(n) fotografias (ou descrição) dos pontos de impacto antes e após os testes.



Figura 3. Imagem Martelo Schmidt durante ensaio.

No momento do disparo, em superfície perpendicular, a mola é comprimida e uma massa é lançada contra o êmbolo, conforme mostram as Figuras 4 e 5, onde parte da energia é absorvida pela superfície por deformação elástica e parte transformada em energia.



Figura 4. Martelo de Schmidt no momento do disparo.

Durante o disparo, a energia que é absorvida pela superfície ensaiada é relacionada com resistência da rocha e com sua dureza superficial. Dessa forma, a massa é liberada para o impacto. Quanto maior a resistência da superfície ensaiada, menor a deformação e maior o ricochete.

A energia liberada após o impacto (Figura 5b) é calculada pelo índice esclerométrico (IE), ou também chamado de número de ricochete (HR), cujo cálculo é a distância percorrida pela massa após o repique do disparo. O resultado é um número adimensional que é considerado como índice de dureza do material ensaiado que varia em escala linear de 10 a 100 (Katz *et al*, 2000; Basu e Aydin, 2004 e Basu, 2005).

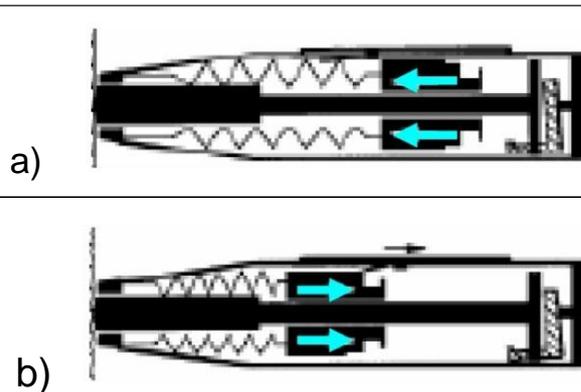


Figura 5. a) Energia liberada para o impacto. b) Energia liberada após impacto; massa repica e retorna.

Considera-se a dureza da superfície ensaiada e outras propriedades das rochas, tais como resistência, elasticidade e densidade, afim de extrair o valor de recuperação do martelo, cujo coeficiente é dado pela Equação (Buyuksagis e Goktan, 2006):

$$R = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

Onde: h = altura do ressalto

H = altura da queda

A constante de ricochete (HR) pode ser utilizada para comparar superfícies homogêneas. Segundo Yagiz (2009), a relação entre a constante de ricochete e a elasticidade não são relacionados para todos os tipos de rochas. A dispersão de valores é reduzida quando em superfícies não homogêneas, desde que a granulometria da rocha seja compatível com o diâmetro do êmbolo de impacto do Martelo de Schmidt (Basu e Aydin, 2004; Aydin e Basu, 2005).

Em relação a posição do esclerômetro ou Martelo de Schmidt, é importante ressaltar que este deve ser colocado sempre perpendicular à superfície ensaiada, evitando-se variações nas medidas. Valores adquiridos em direções diferentes da horizontal sofrem a ação gravitacional e deverão ser normalizados por meio das curvas de correção, fornecidas pelo fabricante e estipuladas pela ISRM (1978).

3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Os dados coletados foram extraídos no software Rocklink, organizados e salvos em planilha excel. O reconhecimento de campo permitiu

descrever as litologias *in situ*, bem como determinar as falhas e orientações estruturais presentes.

Os valores obtidos passaram por um tratamento estatístico de acordo com o Método Médio ISRM, que recomenda efetuar vinte medições em cada superfície ensaiada, podendo parar quando após dez medidas seguidas, não se obter variações maior que dois (02). Assim, foi calculada a média utilizando-se os maiores valores obtidos no ensaio. O valor da média em cada ponto foi lançado no Ábaco de Miller (VALLEJO *et al.*, 2002), que relaciona o valor obtido em campo com a densidade da rocha (Figura 7).

No ábaco de Miller (Figura 6) foi plotado o valor da Resistência R. De acordo com a orientação do Martelo de Schmidt em campo e com as densidades da rocha, adquiridas através do Quadro Resumo das Densidades da Mina de N4E (Figura 7), foi possível chegar ao valor da resistência a compressão uniaxial (UCS) de cada ponto ensaiado, cujos litotipos utilizados aparecem selecionados no quadro abaixo.

A Tabela 1 apresenta os valores de resistência a compressão uniaxial (UCS) obtidos em cada ponto de mapeamento da cavidade N4E-0026 e mostra a média do ricochete do martelo em cada litotipo.

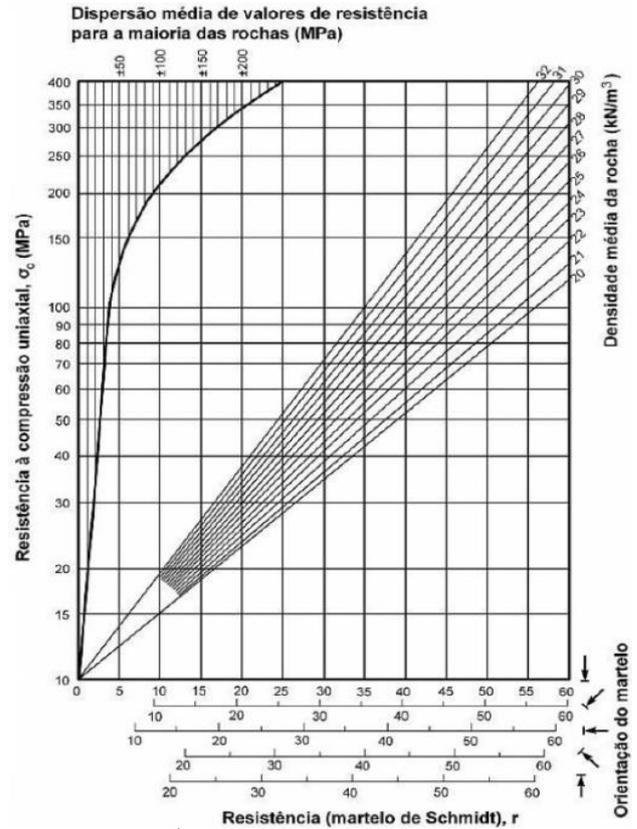


Figura 6. Ábaco de Miller (Vallejo, *et al.*, 2002).

Quadro Resumo das Densidades da Mina de N4 - Modelo SN4_0514

Litotipos	Nº de Amostras	Densidade Natural (t/m³)	Desvio	Umidade (%)	Densidade Seca (t/m³)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	P (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Mn (%)	Método *	N4W - Audit 2008		N4E - Audit 2008	
												Nº de Amostras	Dens_N (t/m³)	Nº de Amostras	Dens_N (t/m³)
HC Hematita Compacta	36	3.81	0.35	1.17	3.86	67.15	1.47	0.014	0.49	0.16	BH/DV	0	3.37	11	3.59
HF Hematita Friável	283	3.17	0.27	6.92	2.94	67.45	1.17	0.012	0.65	0.22	PV/FA	74	3.16	0	3.42
HMN Hematita Manganêsifera	19	3.15	0.42	7.10	2.93	59.91	1.84	0.019	1.27	5.48	PV			2	3.09
FMN Ferro Manganesês	8	3.18	0.27	3.88	3.07	46.45	1.60	0.023	0.70	15.92	PV/DV	0	2.53	0	2.53
JP Jaspelito	62	3.27	0.30	0.33	3.26	46.41	29.18	0.013	1.21	0.19	DV/PV/BH	0	3.22	0	3.29
MD Máfica Decomposta	211	1.88	0.14	22.02	1.47	17.40	34.96	0.061	25.48	0.46	PV/DV	0	1.88	33	1.54
MSD Máfica Semi-Decomposta	25	2.35	0.30								DV	0	2.21	5	2.30
MS Máfica Sã	156	2.62	0.15	0.10	2.62						DV	0	2.55	11	2.55
CE Canga Estrutural	20	3.22	0.31	3.47	3.11	65.69	1.04	0.079	1.99	0.04	DV	0	2.97	3	2.97
CQ Canga Química	9	2.34	0.24	9.21	2.13	43.35	0.55	0.170	20.95	0.05	DV/FA/PV/BH	0	2.62	4	2.50
AT Aterro ^{††}	0	1.91													
Total	829											74		69	

*Métodos: DV = Meio Denso por Deslocamento de Volume; PV = Meio Denso por Preenchimento de Volume; BH = Balança Hidrostática; FA = Frasco de Areia

†† Foi considerado um aumento de volume final de 15% em relação a 70% de MD, 10% de MSD, 18% de JP, 1% de CE e 1% de CQ.

Figura 7. Quadro das densidades da Mina de N4E.

Tabela 1. Lista das litologias da Mina de N4E-0026 com suas respectivas densidades.

Cavidade	Ponto	Litologia	HR Média	σ_c (MPa)
N4E-0026	Ponto 1	Canga detrítica	59,2	120
N4E-0026	Ponto 2	Canga detrítica	61,4	130
N4E-0026	Ponto 3	Formação Ferrífera Bandada	55,5	200
N4E-0026	Ponto 4	Canga detrítica	36,4	36
N4E-0026	Ponto 5	Formação Ferrífera Bandada	45,7	148,5
N4E-0026	Ponto 6	Canga estruturada	40,1	85
N4E-0026	Ponto 7	Formação Ferrífera Bandada	31,1	39,9
N4E-0026	Ponto 8	Canga estruturada	37,5	62

3.1 Modelagem estatística

O tratamento estatístico dos dados de resistência com o esclerômetro apontou diferença de 20% nos valores obtidos para obtenção dos resultados através da metodologia aplicada de acordo com as normas ISRM (1978 a 2014), quando comparados a cálculos estatísticos baseados nas 20 medidas de ricochete *in situ*.

O tratamento dos dados, baseado na normatização proposta pela ISRM proporcionou a distinção dos litotipos, conforme os valores de resistência obtidos por litologia nas cavidades amostradas (Figura 8). Os gráficos foram separados por litotipos, cujo valor apresentado é a média geral da resistência obtida através do Ábaco de Miller. A variação obtida na canga estruturada, por exemplo, se mostrou elevada, quando comparada aos demais litotipos ensaiados.

Vale ressaltar que 4 pontos de Formação Ferrífera Bandada e 3 pontos de rocha básica não são dados suficientes para cálculos estatísticos, já que a quantidade amostrada é inferior ao número proposto pela literatura, o que acontece também para a Formação Ferrífera Bandada e a Rocha Básica.

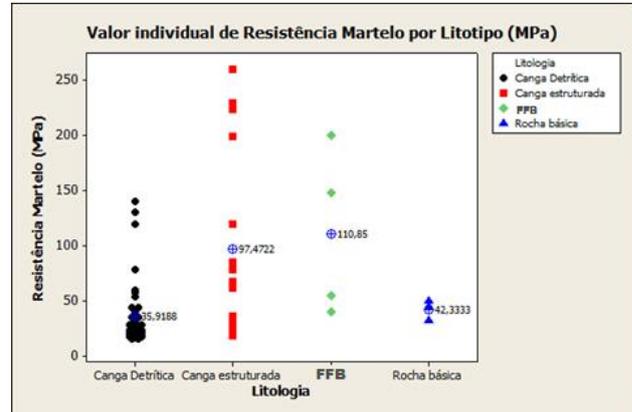


Figura 8. Valor de R por litotipo.

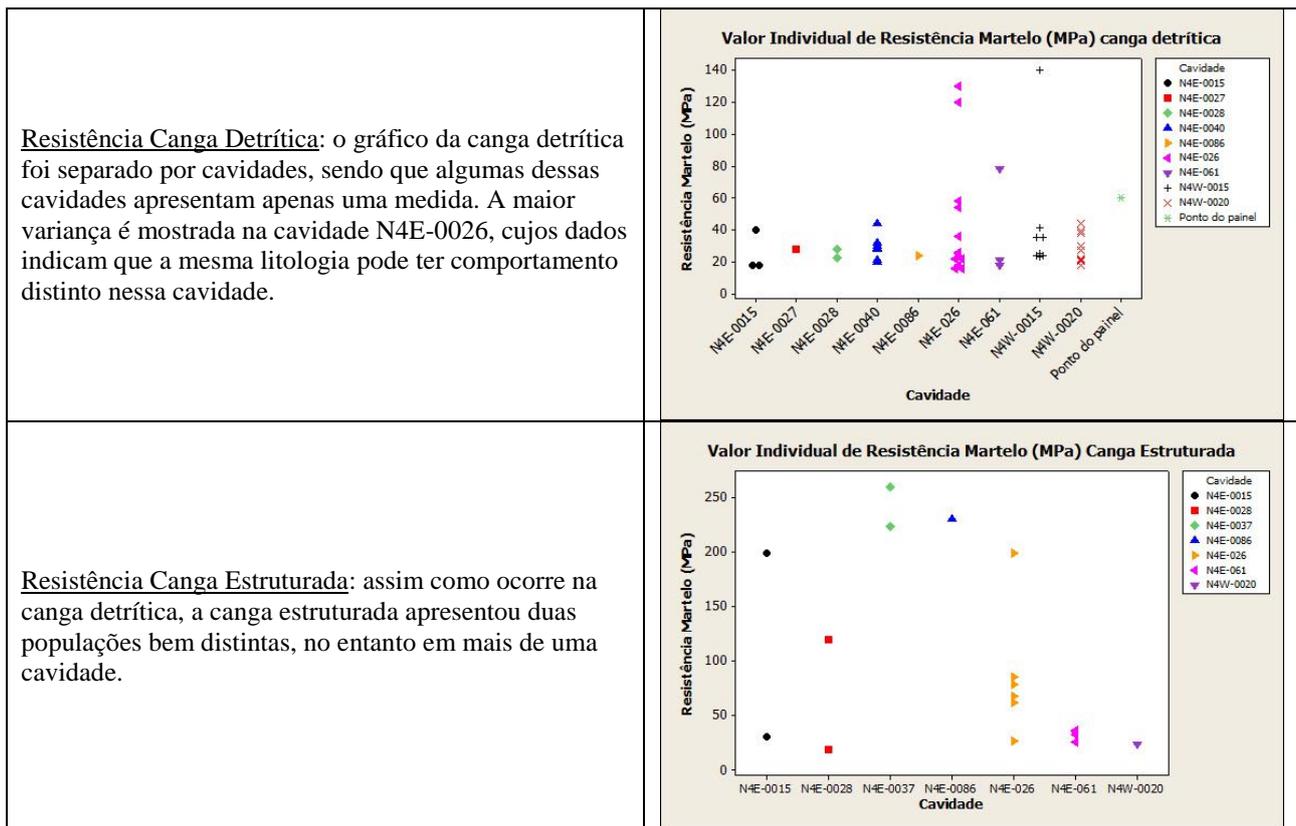


Figura 9. Valor das resistências em canga detrítica e canga estruturada, respectivamente.

A separação dos dados por cavidade avalia comportamentos distintos de cada litotipo, o que não configura dados com precisão estatística. Uma sugestão é que sejam efetuadas inúmeras medições nas cavidades estabelecidas, de tal modo que se possa ter uma quantidade suficiente para que os dados sejam tratados com a precisão necessária.

Os ensaios foram descritos conforme ficha a seguir e em conformidade com as normas estabelecidas pela International Society for Rock Mechanics - ISRM (1978). Este modelo foi replicado para todos os pontos ensaiados.



Ponto 1

Ponto 2

Figura 10. Localização dos pontos de ensaios no interior da cavidade N4E_0015.

4. CONCLUSÕES

O uso do esclerômetro de Schmidt permitiu avaliar a resistência dos litotipos presentes nas cavidades de forma não destrutiva e in situ, mantendo as paredes intactas, respeitando a legislação em vigor e contribuindo para o incremento da base de dados de variáveis geotécnicas pertinentes a espeleologia de cavernas em litologias ferríferas.

Data: 19/11/2014	Nome da cavidade: N4E - 0015 Amostragem: in situ - no teto e parede da cavidade										
Localização: Coordenadas. UTM WGS84 X= 592934 Y= 9332689 Z= 604 metros											
Tipo Martelo Schmidt: N											
Orientação do eixo do martelo de acordo com a foliação: orientação perpendicular a foliação											
<table border="1"> <tr><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">←</td></tr> </table>	3	←	<table border="1"> <tr><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">←</td></tr> </table>	3	←	<table border="1"> <tr><td style="text-align: center;">5</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">↑</td></tr> </table>	5	↑	<table border="1"> <tr><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">←</td></tr> </table>	3	←
3											
←											
3											
←											
5											
↑											
3											
←											
Ponto 01	Ponto 02	Ponto 03	Ponto 04								

Descrição litológica do maciço			
Superfície da cavidade (teto) de cor vermelha, cobrindo a maior parte da formação ferrifera, com grande quantidade de seixos ou blocos de hematita cimentados por óxidos de ferro.			
A FFB predomina no salão de entrada (Ponto 04) e na porção distal da cavidade (Ponto 03). No interior da cavidade ocorre a canga detrítica na maior parte do teto da cavidade.			
100- 90- 80- 70- 60- 50- 40-	16,5 10,5 12,5 17,5 16,5 18,0 12,5 12,0 16,5 15,5	Measurements N = 10 Invalid measurements Ni = 0 (0%) Mean value f = 13,5 R Range R = 7,5 R Standard deviation s = 3,0 R Mode = 10,5 R (*3) Median = 12,5 R Settings Averaging mode Mean method ISRM	
Condição hidrológica:			
Mapeamento em condições de alta umidade do ar, com ocorrência de chuva durante a atividade.			
A cavidade apresentava piso e paredes úmidas e gotejamentos no teto e paredes antes do início da chuva.			
Com a chuva verificou-se grande fluxo hídrico no interior da cavidade na porção mais distal do teto principal.			
Formação de enxurrada com carreamento de material (solo).			

Figura 11. Ficha de descrição dos testes.

A partir das análises conjugadas com dados geoespeleológicos do entorno, é possível evoluir na adequação dessa metodologia para esclarecimentos sobre os parâmetros de resistência das cavidades naturais situadas ao entorno das minerações de ferro.

Em sequência aos estudos e testes realizados, com a viabilidade do método, maior número de cavidades será analisado para a composição de um banco de dados mais robusto, permitindo a modelagem geoestrutural dessas cavidades

pertencentes a um mesmo setor geotécnico da mina de N4E situada em Carajás.

Estudos pertinentes a análises de riscos geotécnicos e estruturais serão aplicados para que as atividades de mineração, principalmente o planejamento de lavra e o desmonte, possam se adequar tecnicamente, visando à preservação da integridade física e ecológica das cavidades situadas ao entorno das frentes de lavra, promovendo o equilíbrio entre a atividade mineradora e os recursos ambientais presentes na região da mina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 7584:(1978): Ensaio não destrutivo. Concreto endurecido - Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão: Prescreve o método para avaliação da dureza superficial do concreto endurecido pelo uso do esclerômetro de reflexão.
- AYDIN, A., (2009). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rocks Mechanics Mining Science* 46, 627e634.
- 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. Eng.* 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, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- COFFEY, 2014 - MAPEAMENTO GEOESTRUTURAL E GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO – REGISTRO DE CAMPO – (Relatório nº RL-280614).
- KATZ, O., Reches, Z., Roegiers, J.C. (2000). Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37 (4), 723e728
- LAUBSCHER, D.H. 1977. Geomechanics classification of jointed rock masses - mining applications. *Trans. Instn Min. Metall.* 86, A1-8.
- YAGIZ, S. (2009). Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 68 (1), 55e63.