

ESTUDOS PRELIMINARES DE CARACTERIZAÇÃO LITOESTRUTURAL E GEOMECÂNICA EM CAVIDADES FERRÍFERAS, CARAJÁS-PA

LITHOSTRUCTURAL AND GEOMECHANICAL PRELIMINARY STUDIES IN IRON CAVES, CARAJÁS-PA

Chrystophe Ronaib (1); Allan Douglas (1); Vanese Vieira (2); Marcelo Barbosa (3); Rafael Guimarães (3); Iuri Brandi (3)

(1) Brandt Meio Ambiente Ltda. Parauapebas PA.

(2) Vegeo. Belo Horizonte MG.

(3) Vale S.A. – Gerência de Espeleologia e Tecnologia. Belo Horizonte MG.

Contatos: cpeixoto@brandt.com.br; allan.dfs@hotmail.com; vanesevieira@yahoo.com.br; marcelo.roberto.barbosa@vale.com; rafael.guimaraes@vale.com; iuri.brandi@vale.com.

Resumo

A legislação ambiental brasileira determina que cavidades naturais e sua área de influência não podem sofrer impactos negativos irreversíveis em função das operações de mina em seu entorno, até que estudos específicos sejam realizados. No tocante aos aspectos físicos, este trabalho apresenta estudos preliminares de caracterização litoestrutural e geomecânica em cavidades ferríferas de Carajás, PA. São levantados parâmetros como grau de alteração, resistência, grau de fraturamento, RQD, condição hidrológica e características de descontinuidades como; persistência, abertura, espaçamento, rugosidade e preenchimento. O grau de alteração e resistência da rocha baseou-se na análise tátil – visual convencional, introduzindo-se a correlação com ensaios *in situ* de resistência a compressão uniaxial, utilizando-se o esclerômetro de Schmidt. São discutidos os procedimentos de mapeamento e aquisição dos parâmetros, sua quantidade e qualidade, bem como a análise dos resultados, como forma de contribuição para estudos geoespeleológicos.

Palavras-Chave: Cavidade ferrífera; caracterização geomecânica; esclerômetro de Schmidt; Carajás.

Abstract

*Brazilian environmental legislation request that natural caves and their area of influence cannot be damaged due to operations in their surroundings, until specific studies are carried out. In terms of the physical features, this work presents preliminary studies of lithostructural and geomechanical characterization in iron caves, in Carajás, PA. Parameters such as weathering, strength, fracturing, RQD index, hydrological conditions and discontinuities planes features such as persistence, openings, spacing, roughness and fill are determined. The degree of weathering and resistance was based on conventional tactile-visual analysis, and the correlation was introduced with *in situ* tests of uniaxial compression strength (UCS), using the Schmidt hammer. It is discussed the mapping and parameters acquisition procedures, their quantity and quality, as well as the analysis of the results, in order to geospeleological studies improvements.*

Key-Words: Iron caves; geomechanical characterization; Schmidt sclerometer, Carajás.

1. INTRODUÇÃO

A legislação brasileira por meio do Decreto Federal nº 6.640 de 2008, determina que as cavidades naturais subterrâneas de relevância máxima, bem como sua área de influência, não sofram impactos ambientais irreversíveis. De acordo com a Portaria IBAMA 887 e Resolução CONAMA 347, a área de influência de uma cavidade deve abranger uma distância mínima de proteção de 250m, até que estudos específicos determinem um perímetro de entorno definitivo.

Conhecer e entender a geotecnia dos ambientes subterrâneos tem sido um grande desafio nos últimos anos. Subdividido em escavações de obras de engenharia e em cavidades naturais, tais ambientes necessitam de análises e estudos distintos.

Em relação às cavidades naturais subterrâneas, existe pouca informação disponível na literatura sobre análise de estabilidade, e um dos principais métodos para acompanhar e controlar quaisquer danos ocasionados pelas operações mineiras nas proximidades é a utilização de sismógrafos de engenharia, realizando o controle de

influências sismográficas provenientes do desmonte de rocha (GONTIJO et al., 2014).

O conhecimento sobre as fragilidades litoestruturais dos maciços rochosos onde se inserem as cavidades, identificando deformações ou movimentos não visíveis (internos à rocha) ou pouco perceptíveis (microfissuras), bem como a determinação dos parâmetros geomecânicos dos diferentes tipos litológicos, são fundamentais para estabelecer um estudo mais preciso sobre o comportamento estrutural das cavidades com a aproximação das operações de lavra (BVP, 2009; BRANDI et al., 2015).

Neste trabalho apresenta-se os procedimentos de mapeamento e aquisição dos parâmetros num estudo preliminar de caracterização litoestrutural e geomecânica em três cavidades ferríferas de Carajás, PA, (N4E_0092, N4E_0033 e N4E_0008), como forma de contribuição para estudos geoespeleológicos.

2. LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado nas cavidades N4E_0092, N4E_0033 e N4E_0008, localizadas na área de entorno da mina N4EN (Figura 1) no Complexo Minerador em Carajás, município de Parauapebas, região sudeste do estado do Pará.

Segundo Gonçalves et al. (2016), as cavidades estudadas ocorrem em domínio de coberturas lateríticas, sendo individualizados três horizontes de intemperismo típicos dos platôs de Carajás, associados por vezes, às rochas-matrizes subjacentes. Do topo para a base, tem-se: Horizonte Crosta Laterítica, mostrando porções detríticas e zonas cimentadas por oxi-hidróxidos de ferro, cujo litotipo dominante é a Crosta Laterítica Detrítica (CLD); Horizonte de Transição, composto por uma trama constituída por oxi-hidróxidos de ferro e mostrando localmente zonas de baixa densidade associadas à ocorrência de cavidades, cujo litotipo dominante é a Formação Ferrífera Laterítica (FFL), e por fim, o Horizonte Saprolito, que pode ser constituído de argilas, caso se desenvolva sobre rochas vulcânicas ou de minério de ferro hematítico, se proveniente de jaspilitos (Tabela 1).

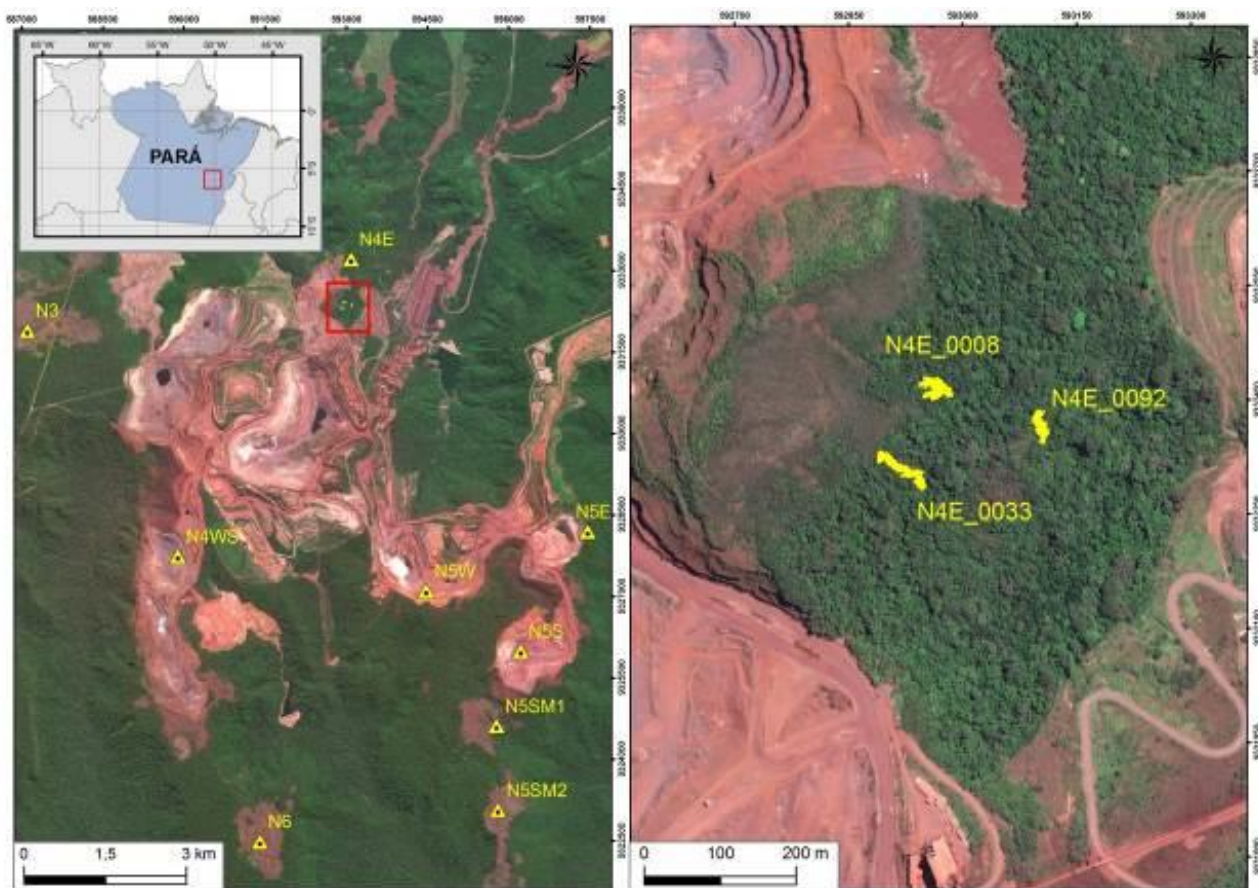


Figura 1: Localização das cavidades estudadas (projeção em superfície) nas proximidades da mina N4E.

Tabela 1: Descrição resumida dos três horizontes de intemperismo típicos dos platôs de Carajás modificado de Gonçalves et al. (2016).

Horizonte de Intemperismo	Espessura (m)	Descrição Geral
Crosta Laterítica	0,5 a 15	Clastos angulosos a sub-arredondados, mal selecionados (cm a m), e matriz/cimento silto-arenoso de óxido/hidróxido de ferro endurecido. Lítotipo dominante: Crosta Laterítica Detritica (CLD)
Horizonte de Transição	0,5 a 20	Bandas de óxido/hidróxido de ferro intercaladas, geralmente porosas a texturas cavernosas. Em geral, fraturadas e com intenso intemperismo. Lítotipo dominante: Formação Ferrífera laterítica (FFL)
Saprolito	> 20	Elevado grau de alteração (rocha completamente alterada), com presença pontual de rocha alterada solo saprolítico. Lítotipo dominante: Saprolito Rocha Ferrífera (SAPRF)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização geomecânica

Sistemas de classificação são adotados em geral na fase inicial de projetos geotécnicos, e englobam critérios qualitativos e/ou quantitativos e fornecem indicações no que diz respeito às propriedades intrínsecas sobre a qualidade do maciço. No Brasil, os métodos mais utilizados são os sistemas RMR (*Rock Mass Rating*, Bieniawski, 1989), Q - *Tunneling Quality Index* (Barton et al., 1974, 1994) e GSI (*Geological Strength Index*, Hoek et al., 1995, Marinos & Hoek, 2000, Hoek et al., 2013). Estas classificações atribuem pesos aos parâmetros relativos às características do maciço, sendo posteriormente obtido um índice geomecânico que resulta de aplicação de expressões de cálculo associados ao sistema empírico utilizado.

Em geral, as classificações baseiam-se na combinação de alguns dos seguintes parâmetros (Ferrer, et al., 1999).

- Ω Grau de alteração;
- Ω Resistência do material rochoso;
- Ω RQD;
- Ω Orientação das descontinuidades;
- Ω Condições das descontinuidades (persistência, grau de fraturamento, rugosidade, preenchimento e alteração da parede - meteorização);
- Ω Condição hidrológica;

Interessante ressaltar que a resistência geomecânica foi obtida a partir de análise tátil-visual (dados qualitativos), em decorrência da impossibilidade da aplicação de golpes de martelo convencional no interior de cavidades por força da legislação vigente, introduzindo-se, para efeito comparativo, a utilização de um equipamento portátil denominado esclerômetro ou martelo de Schmidt (dados quantitativos), por se tratar de ensaio não destrutivo de determinação da resistência à compressão uniaxial.

O levantamento de todos os parâmetros foi realizado no interior de três cavidades ferríferas, considerando-se os atributos médios da janela de representação do ponto de mapeamento.

Uma boa classificação geomecânica depende de uma boa caracterização geológico-geotécnica da rocha intacta, do bloco unitário e do maciço rochoso, incluindo as descontinuidades e os “defeitos” presentes, o que dá suporte a uma previsão mais apurada do comportamento dos maciços frente a uma solicitação imposta em um projeto de engenharia (Vieira et al., 2015). Para caracterização geomecânica são seguidos neste trabalho, os índices definidos pela ISRM (*International Society for Rock Mechanics*) e autores consagrados, como Bieniawski 1989 (Tabelas 2 a 5).

Tabela 2 - Classificação quanto ao índice de resistência (Vieira, 2015).

Grau	Resistência	Descrição	Resistência à compressão uniaxial
R0	Rocha extremamente branda	Marcada pela unha do polegar	0,25 - 1
R1	Rocha muito branda	Fragmentada com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo. Pode ser cortada em fatias com um canivete	1 - 5
R2	Rocha branda	Pode ser cortada em fatias com canivete com dificuldade. Marcas superficiais obtidas com pancadas firmes percutidas com a ponta do martelo de geólogo	5 - 25
R3	Rocha medianamente resistente	Não pode ser esmigalhada ou cortada em fatias com canivete. Podem-se fragmentos de rocha com uma pancada seca do martelo de geólogo.	25 - 50
R4	Rocha resistente	Podem-se obter fragmentos dando mais de uma pancada seca com o martelo de geólogo	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	Para se obterem fragmentos são necessários muitas pancadas com o martelo de geólogo.	100 - 250
R6	Rocha extremamente resistente	Apenas se obtém lascas percutindo com o martelo de geólogo.	> 250

Tabela 3 - Classificação quanto ao estado de alteração (ISRM, 1981).

Grau	Alteração	Descrição
A1	Rocha Sã	Alteração mineralógica nula a incipiente. Minerais preservam características originais e brilho, cor e clivagem.
A2	Levemente Alterada	Alteração mineralógica perceptível. Cores esmaecidas. Perda de brilho dos minerais.
A3	Medianamente Alterada	A matriz apresenta-se descolorida com evidências de oxidação, caulinição.
A4	Alterada	Descolorização generalizada, mas ainda com características da rocha.
A5	Extremamente Alterada (Saprólito)	Alteração mineralógica acentuada. Cores bastante modificadas. Possível presença de núcleos rochosos menos alterados.
A6	Solo residual (jovem) Solo saprolítico	Todo o material está alterado para solo. Estrutura original da rocha está preservada

Tabela 4 – Parâmetro de caracterização geomecânica - RQD

RQD	Descrição
91-100%	Excelente
76-90%	Bom
51-75%	Razoável
26-50%	Fraco
0-25%	Muito fraco

Tabela 5 – Parâmetros de caracterização geomecânica - Condições das Descontinuidades.

Grau de Fraturamento	Espaçamento	Descrição
GF	INTERV. Cm	
F1	>200	Maciço
F2	60-200	Pouco fraturado
F3	20-60	Medianamente fraturado
F4	0,6-20	Muito fraturado
F5	<0,6	Extremamente fraturado

Rugosidade		Legenda
Irregular/Descontínua	Rugosa	IR
	Lisa	IL
	Espelhada	IE
Ondulada	Rugosa	OR
	Lisa	OL
	Espelhada	OE
Plana	Rugosa	PR
	Lisa	PL
	Espelhada	PE

Persistência (m)	Distância (m)
Muito pouca persistência	<1
Pouca persistência	1 A 3
Persistência média	3 A 10
Persistência alta	10 A 20
Persistência muito alta	> 20

Abertura (mm)
Fechada
<0,1mm
0,1 a 1mm
1 a 5mm
> 5mm

Alteração da parede	Legenda
Inalterada	A6
Levemente alterada	A5
Moderadamente alterada	A3
Muito alterada	A1
Decomposta	A0

Grau de alteração e resistência

O grau de alteração e resistência da rocha baseou-se na análise visual do brilho e cor dos minerais e da rocha, além de uma análise tátil das condições de friabilidade. Sabe-se que em uma mesma litologia, quanto maior o grau de alteração da rocha, menos resistente ela se encontra.

RQD (Rock Quality Designation)

O índice RQD foi desenvolvido por Deere e Miller (1966), a fim de fornecer uma estimativa qualitativa dos maciços rochosos *in situ*, sendo uma das variáveis do RMR. O grau de fraturamento se expressa comumente pelo índice RQD (Rock Quality

Designation) proposto por Deere *et al.* (1967). Apesar da sua utilidade prática, este índice não considera aspectos como a orientação, o espaçamento, os preenchimentos e outras condições das descontinuidades, assim, não são suficientes para descrever as características de fraturamento dos maciços rochosos. O valor do índice RQD se determina a partir da frequência do espaçamento das descontinuidades, mediante a seguinte expressão que proporciona o valor teórico mínimo do RQD (PRIEST, 1993):

$$RQD_{min} \approx 100 \exp^{-0,1\lambda} (0,1\lambda + 1)$$

Onde λ é a inversa do espaçamento médio das descontinuidades.

Condições das discontinuidades

As características principais das discontinuidades com implicações no comportamento geotécnico dos maciços fraturados são, segundo a ISRM (1978), Hoek; Bray (1981) e, Priest (1993), a orientação, o espaçamento (grau de fraturamento), a persistência, a rugosidade, o preenchimento e a abertura. Além destas, é também importante referir a percolação nas discontinuidades e o estado de alteração das respectivas paredes.

A dimensão e forma dos blocos tem relação direta com as características das discontinuidades, sendo resultado do número de famílias de discontinuidades, a sua orientação, o seu espaçamento e persistência.

3.2 Ensaio de resistência (Esclerômetro de Schmidt)

O martelo ou esclerômetro de Schmidt foi inicialmente projetado para realizar medidas da resistência de corpos de prova de concreto e, posteriormente, adaptado por diversos autores para o estudo de maciços rochosos, podendo fornecer por meio de correlações, valores aproximados de resistência à compressão uniaxial e módulo de elasticidade de rochas (FIORI & CARMIGNANI, 2001).

Nos trabalhos de campo foi utilizado o esclerômetro portátil do tipo L. Este equipamento permite um ensaio de campo *in situ* que avalia a dureza da rocha através da medição do rebote (R), por meio de uma mola de aço, quando percutida sobre a superfície rochosa. Estes impactos do esclerômetro distam de, no mínimo, 3 cm um do outro e 5 cm de arestas e cantos, tendo sido mantido em ângulo reto, de forma perpendicular à superfície ensaiada (Figura 2). Para cada ponto ensaiado, a área delimitada possui no máximo 2 x 2m para executar 20 leituras de ricochete sem nenhum descarte dos valores baixos ou altos, obtendo-se valores em relação à média e mediana (VILES, et al., 2010).

Diferente de outros tipos de esclerômetros convencionais, para este do tipo Rock Schmidt, não há necessidade de correção com relação à direção horizontal dos ricochetes, pois conta com metodologia de leitura eletrônica por diferença de velocidade do êmbolo onde não há influência da gravidade durante o ensaio. Os valores de dureza obtidos com o esclerômetro são lançados no ábaco de correlação (Ábaco de Miller) para estimar o valor da resistência à compressão uniaxial (Figura 3).

Os ensaios ocorreram de forma sistemática ao longo das paredes das cavidades em pontos

específicos segundo dois critérios: mudanças das características litoestruturais e o intervalo entre os pontos ensaiados, de forma que todo o perímetro da cavidade foi coberto. Todos os pontos foram plotados na planta na cavidade.



Figura 2: Exemplo de aplicação do martelo de Schmidt.

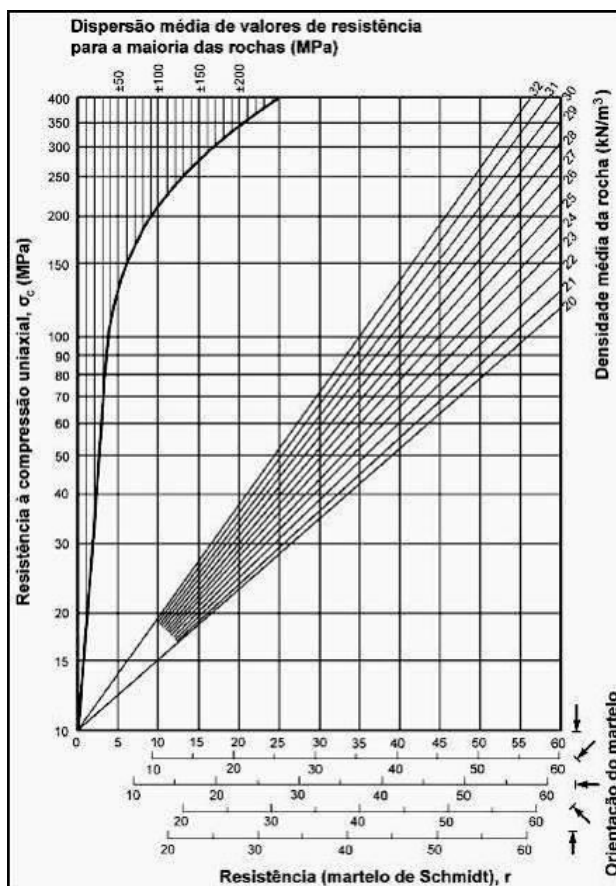


Figura 3: Ábaco de Miller para o cálculo da resistência a partir do *martelo de Schmidt* (adaptado de Gonzáles de Vallejo et al., 2002).

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização litoestrutural e geomecânica

As três cavidades estudadas se desenvolvem predominantemente em formação ferrífera laterítica e, localmente em crosta laterítica detrítica e rocha máfica intemperizada. Estes dois últimos litotipos

não serão aqui discutidos em função da sua baixa representatividade.

Em relação a formação ferrífera laterítica, o bandamento composicional marca sua anisotropia e constitui uma estrutura penetrativa, às vezes com vazios entre as bandas de Fe, resultantes da dissolução/lixiviação da sílica, ou ainda exibe arranjo caótico mostrando bandas de hematita fragmentadas, reorientadas e às vezes cimentadas, evidenciando processo de alteração/laterização mais avançado (Figuras 4a, b, c). Dobras do tipo *kink bands* são comuns e ocorrem desde a escala centimétrica à métrica (Figura 4d).

Nas cavidades **N4E_0033** e **N4E_0092**, nota-se alongamento do conduto principal na direção do eixo de duas grandes dobras de direções NW-SE e N-S respectivamente, que possivelmente controla a morfologia das cavidades (Braga *et al.*, 2017).

Grau de alteração e resistência

Para a avaliação qualitativa do estado de alteração e resistência, as três cavidades se apresentam em geral medianamente alteradas (A3 - Figura 5a). Nos setores distais a formação ferrífera

se mostra alterada (A4) com presença maior de hidróxidos de ferro, resultantes da hidratação dos minerais ferrosos (particularmente hematita e magnetita), conferindo à rocha uma tonalidade amarelada a avermelhada. No que diz respeito à resistência, as rochas se mostram medianamente resistentes (R3), com setores/núcleos pouco resistentes (R2) e mais resistentes (R4), como mostra o histograma de resistência da figura 5b.

Grau de fraturamento

Em termos geotécnicos o grau de fraturamento na formação ferrífera (FFB) predominam maciços muito fraturados (F₄), como mostra o histograma da figura 5c, formando blocos prismáticos, às vezes achatados (no plano do bandamento) ou romboédricos, de dimensões decimétricas a métricas. Nas demais descontinuidades o grau de fraturamento mostra-se bastante variado, notando-se fraturas isoladas (geralmente sub-horizontais) ou concentrações localizadas com espaçamento decimétrico a métrico (fraturas subverticais), cuja classificação varia entre (F1 e F3).

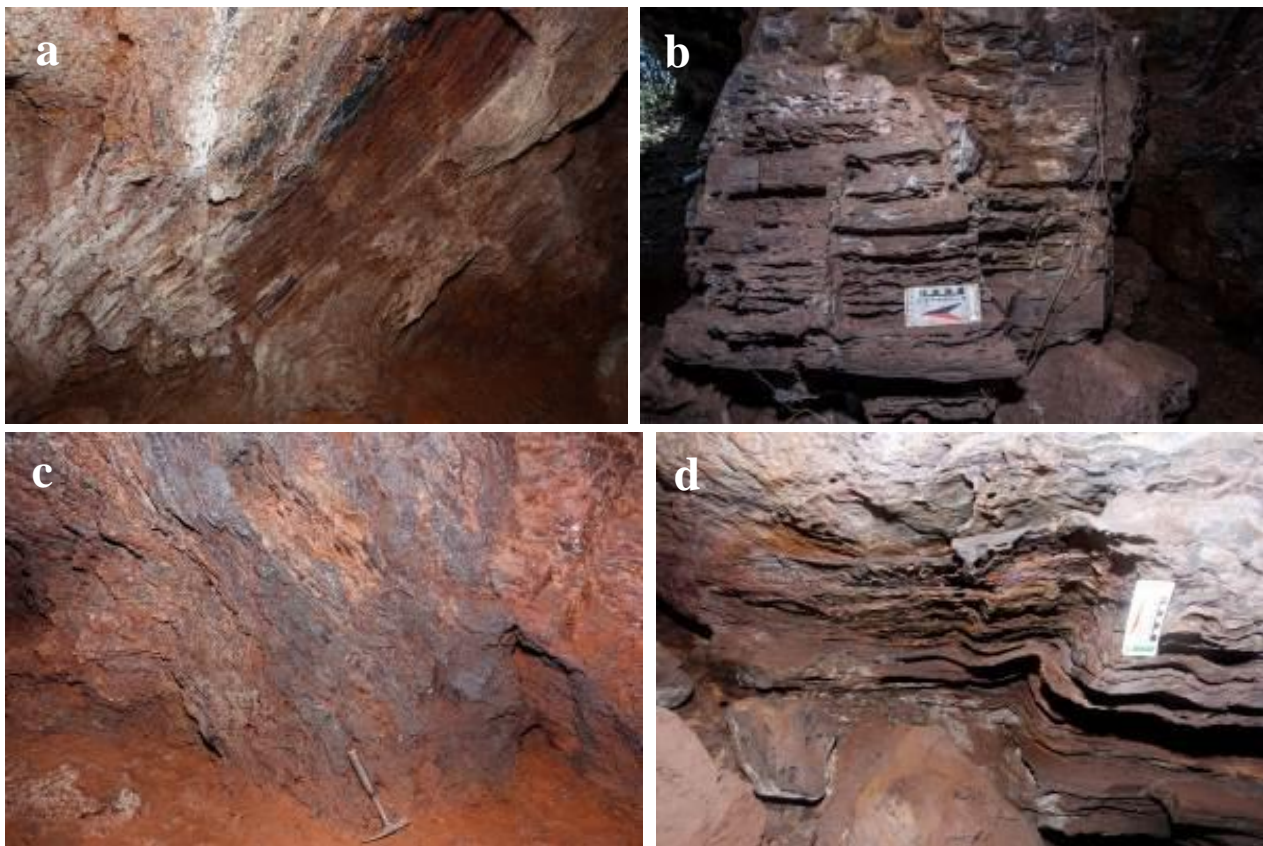


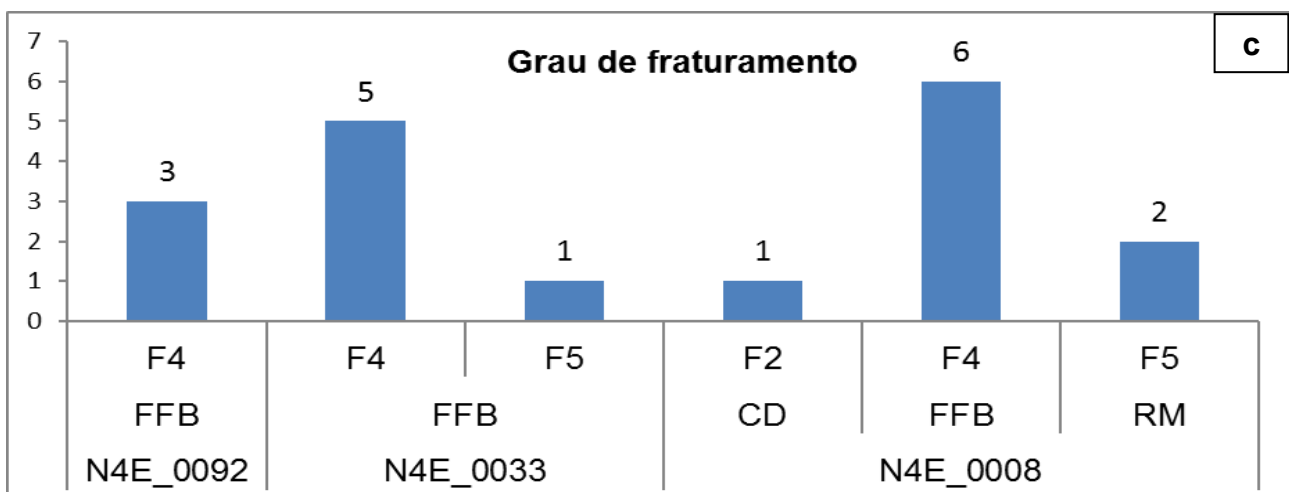
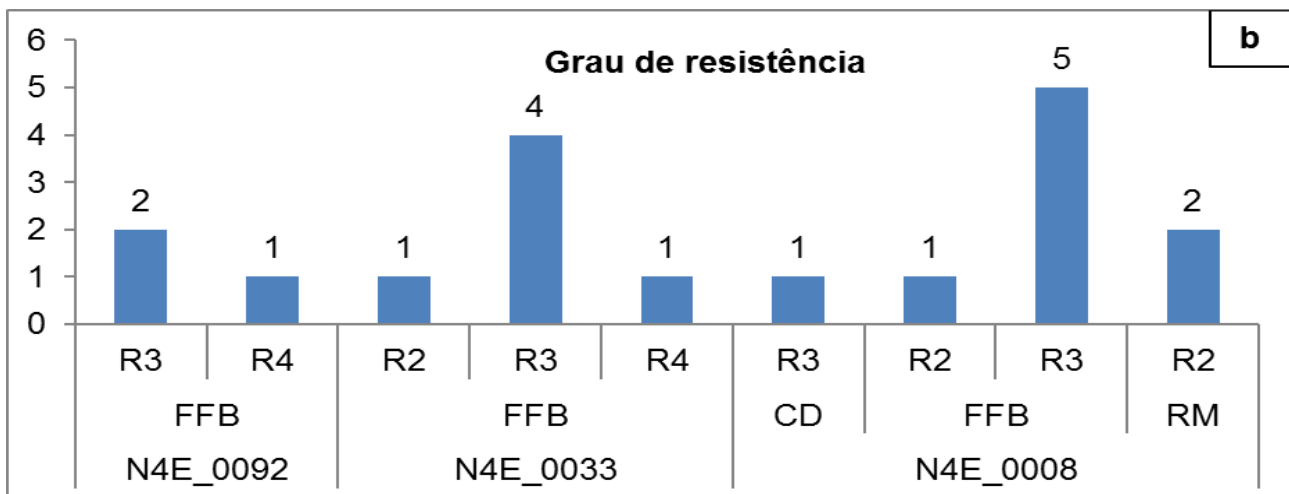
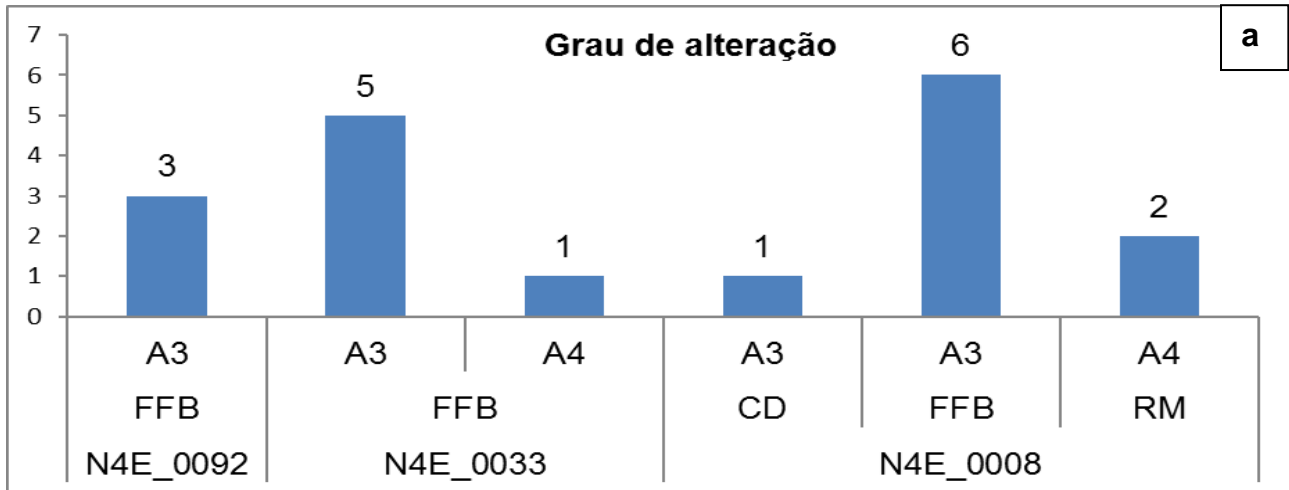
Figura 4: Aspectos texturais da FFL. a) bandamento persistente (cavidade N4E_0092); b) vazios entre bandas de óxido de ferro (cavidade N4E_0092); c) bandas de hematita fragmentadas e cimentadas evidenciando processos de laterização (cavidade N4E_0033) d) Dobras centimétricas no bandamento (cavidade N4E_0092).

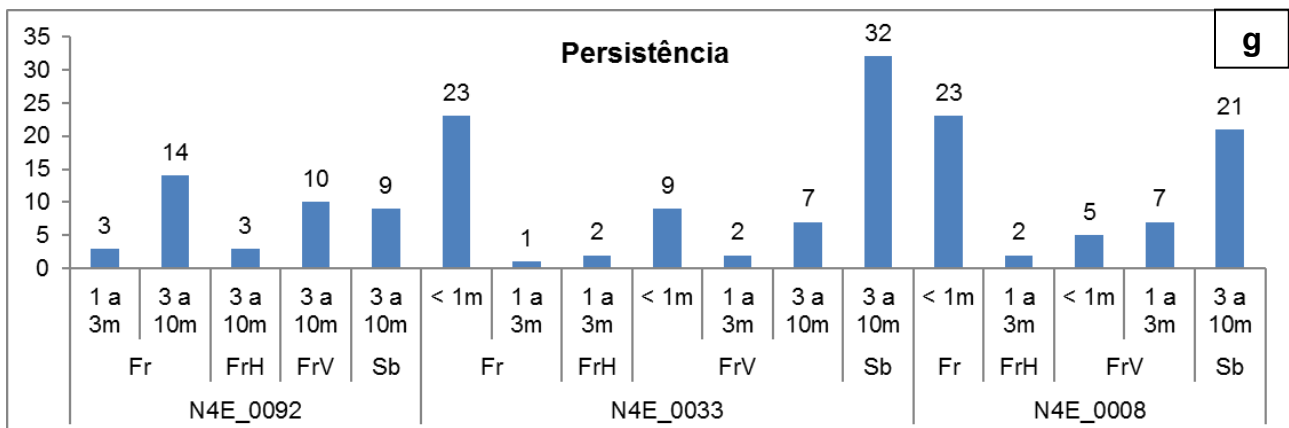
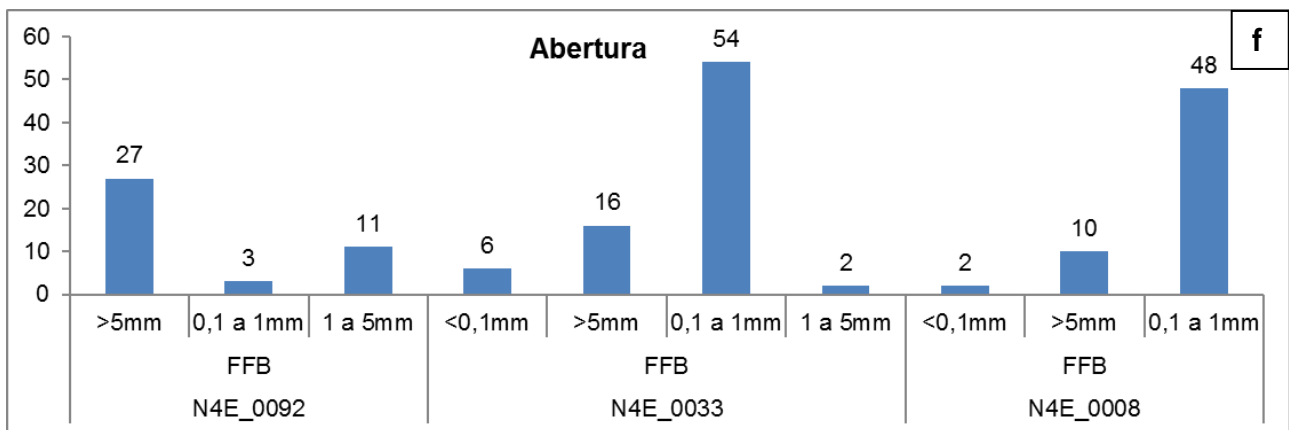
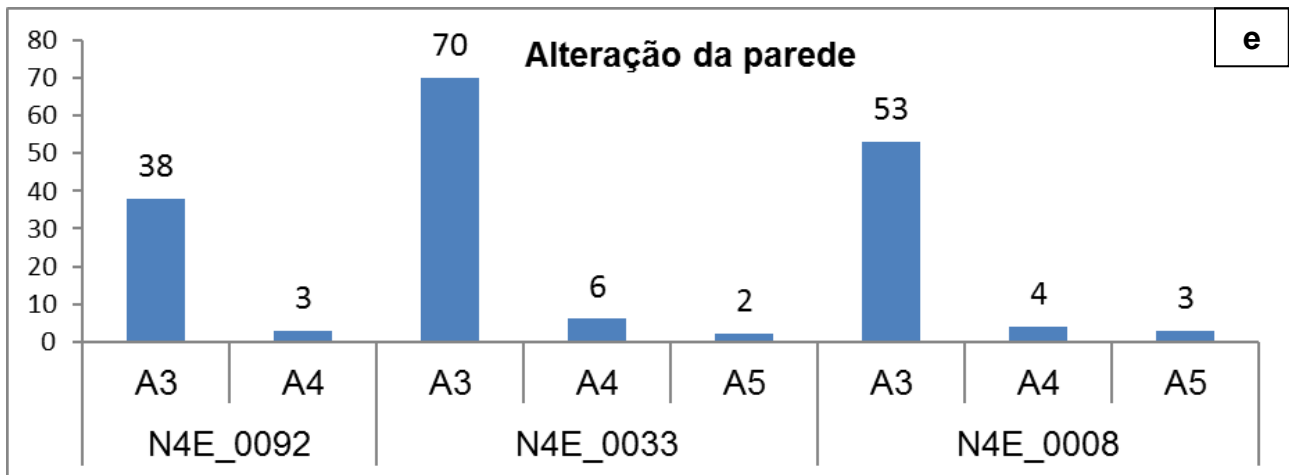
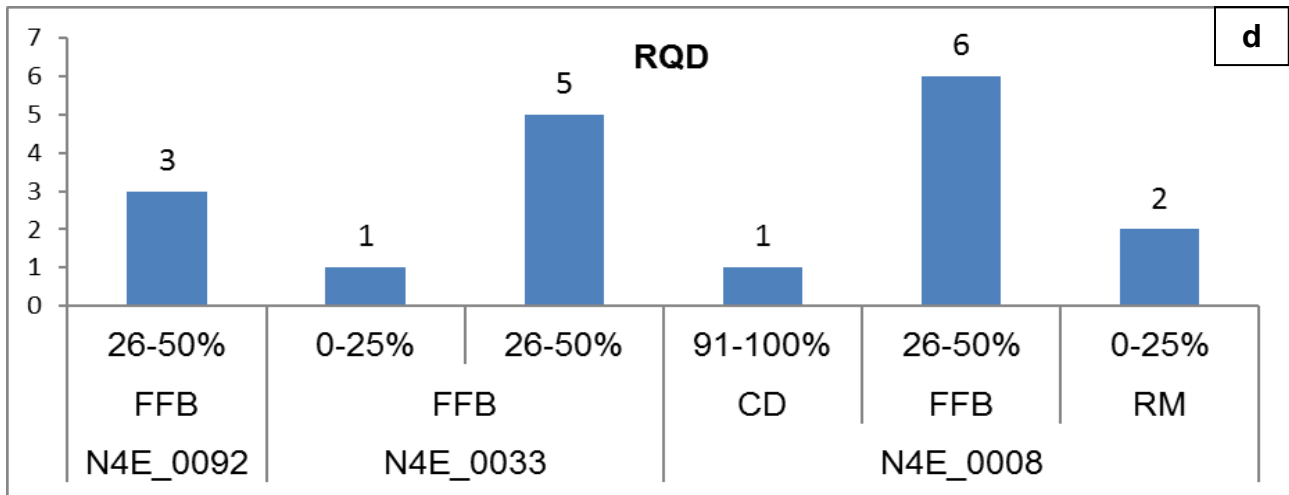
A baixa resistência do maciço nessas cavidades se deve principalmente: a) quando o material rochoso, que o constitui, tem baixa resistência em função do seu maior estado de alteração (A4); b) e quando a presença de um elevado número de fraturas ou outro tipo de descontinuidades (F₄) seja responsável por um comportamento de baixa resistência do maciço, mesmo que o material rochoso constituinte seja pouco alterado.

RQD

No estudo realizado observa-se uma fraca qualidade da rocha, onde a formação ferrífera mostra predomínio de RQD entre 26 a 50% (Figura 5d).

Os histogramas da figura 5 mostram dados obtidos dos pontos de mapeamento, incluindo as características dos litotipos principais e dos subordinados, quando presentes.





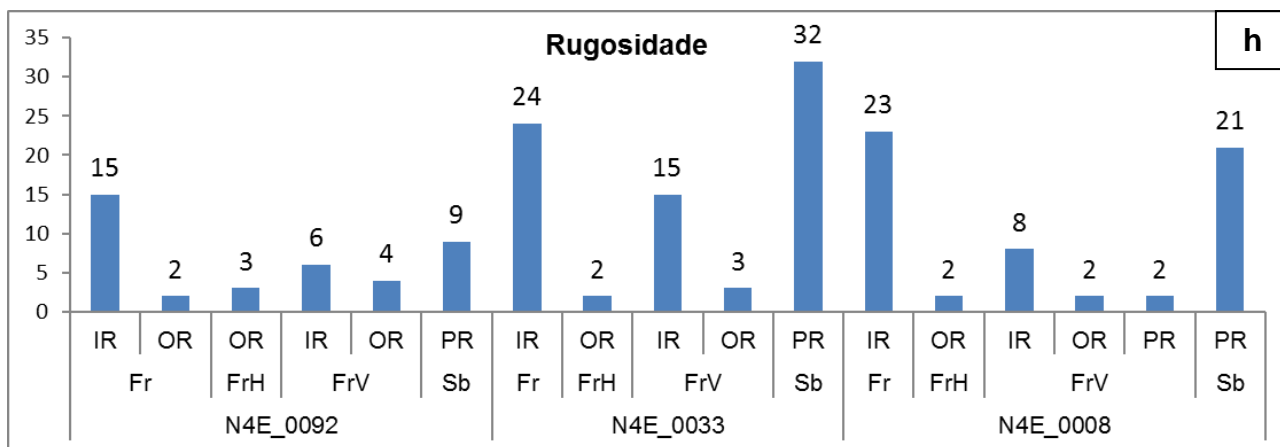


Figura 5: Histogramas representativos dos parâmetros geomecânicos das cavidades estudadas. a) Grau de alteração; b) Grau de resistência; c) Grau de faturamento; d) RQD; e) Alteração da parede; f) Abertura; g) Persistência e h) Rugosidade.

Condições das descontinuidades

A principal estrutura identificada no mapeamento foi o bandamento na formação ferrífera que se caracteriza pela persistência média (3-10m) e superfície planar rugosa (PR). Nos bandamentos são observadas duas direções principais, uma, segundo a direção NE-SW com mergulho baixo a moderado para NW (290/30), e outra orientação para NW-SE com mergulho moderado para SW (240/43) variando para NE (41/35) (Figura 6 estereogramas).

Os bandamentos são intersectados por duas famílias de fraturas principais, uma com direção NW-SE, e outra, aproximadamente paralela ENE-WSW, geralmente com mergulho moderado a alto para SE (165/57), conforme mostram os diagramas de rosetas (Figura 6-rosetas).

Ocorrem ainda em menor quantidade fraturas com mergulho sub-horizontal que mostram em geral persistência pouco contínua (1-3m) e superfície ondulada rugosa (OR) e fraturas subverticais com predomínio de estruturas de continuidade média (3-10m) nas cavidades N4E_0092 e N4E_0033 e persistência pouco contínuas (1-3m) para o caso da cavidade N4E_0008 (figura 5g), que apresentam em geral superfícies variando de irregular rugosa (IR) a ondulada rugosa (OR).

Algumas descontinuidades são abertas (>5 mm), com preenchimento de argila mole ou sem

nenhum preenchimento e a maioria é fechada (Figura 5f).

Condição hidrológica

As cavidades durante os trabalhos de campo mostraram-se seca. Embora, em períodos chuvosos podem ser observados indícios de presença de água, devido maior umidade e gotejamento principalmente nos terços distais, onde porções do maciço rochoso encontram-se mais argiloso (moderadamente alterado – A₃), provavelmente resultantes do processo de escoamento e infiltração de águas pluviais (Figura 5e). Um dos fatores que mais influenciam a resistência é a meteorização, uma vez que afeta as superfícies de descontinuidade da matriz rochosa, onde atuam os fenômenos de alteração (FERRER, et al., 1999).

4.2 Ensaio de resistência *in situ* (Esclerômetro de Schmidt- tipo L)

A determinação da resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso foi realizada de maneira indireta com o auxílio do esclerômetro portátil ou *martelo de Schmidt* (Figura 2). Para identificar as variações da resistência, foram distribuídos 31 pontos de ensaios *in situ* nas três cavidades estudadas (Figuras 7 a 9).

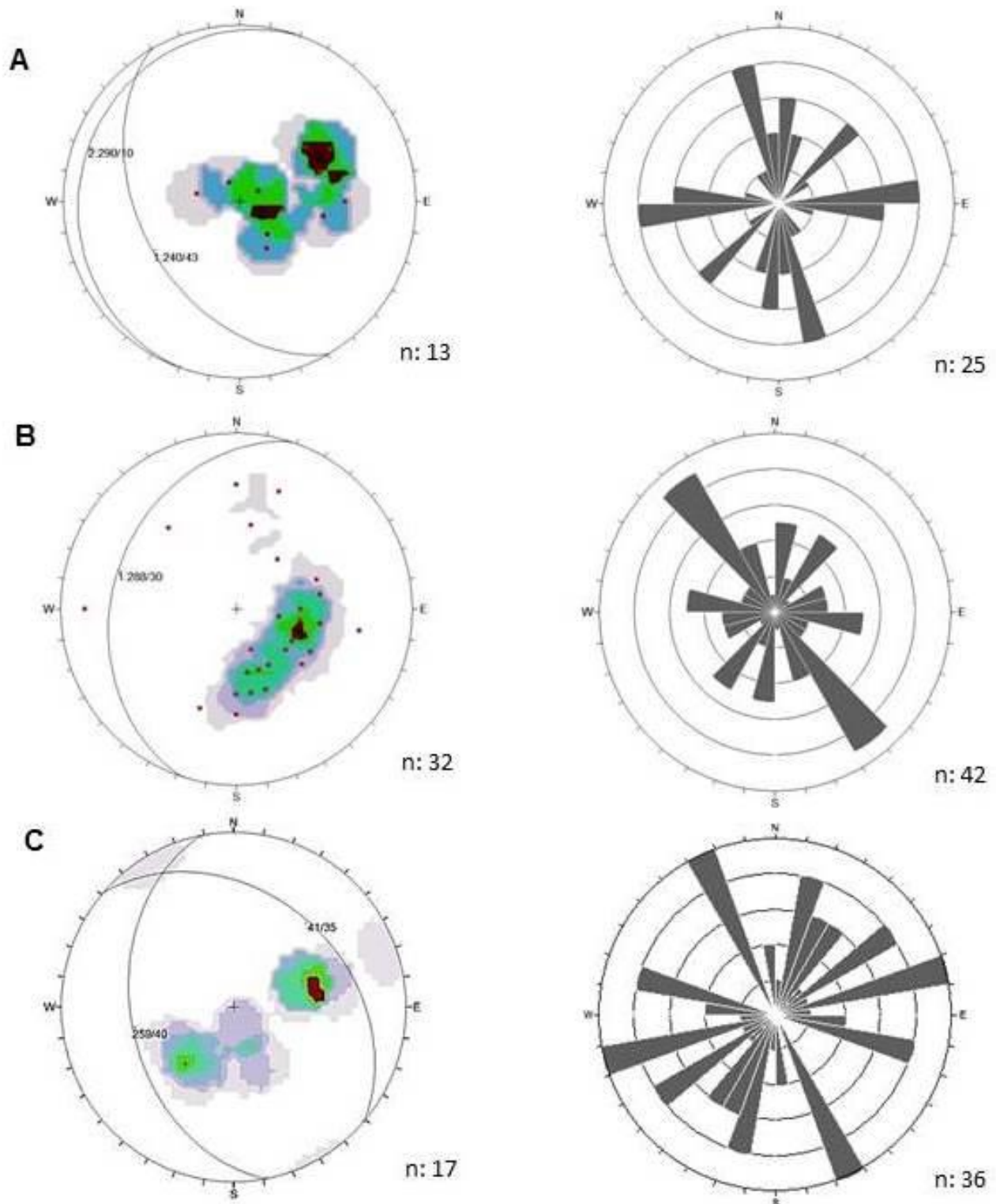


Figura 6: Diagramas de rosetas (gráficos à direita) da família de fraturas e estereogramas (gráficos à esquerda) dos bandamentos das cavidades estudadas: A) N4E_0092; B) N4E_0033 e C) N4E_0008.

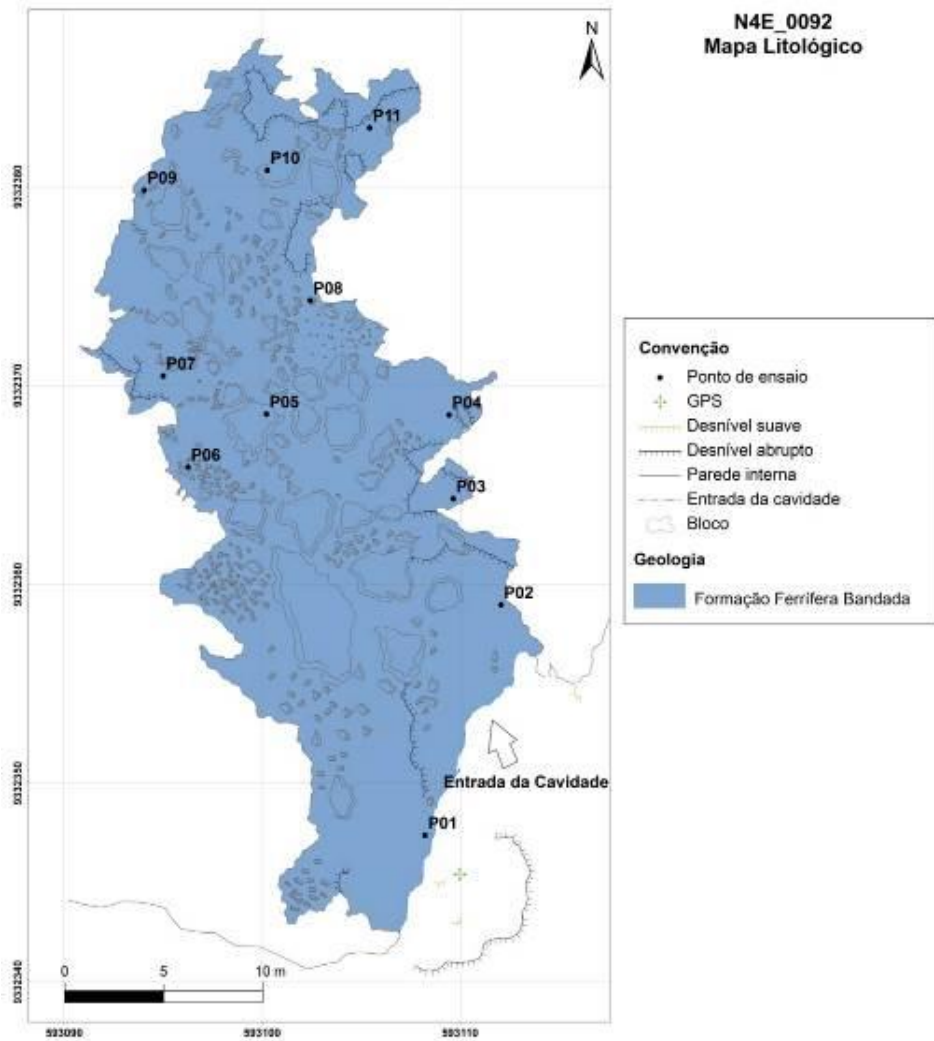


Figura 7: Mapa litológico com a localização dos pontos de ensaio na cavidade N4E_0092.

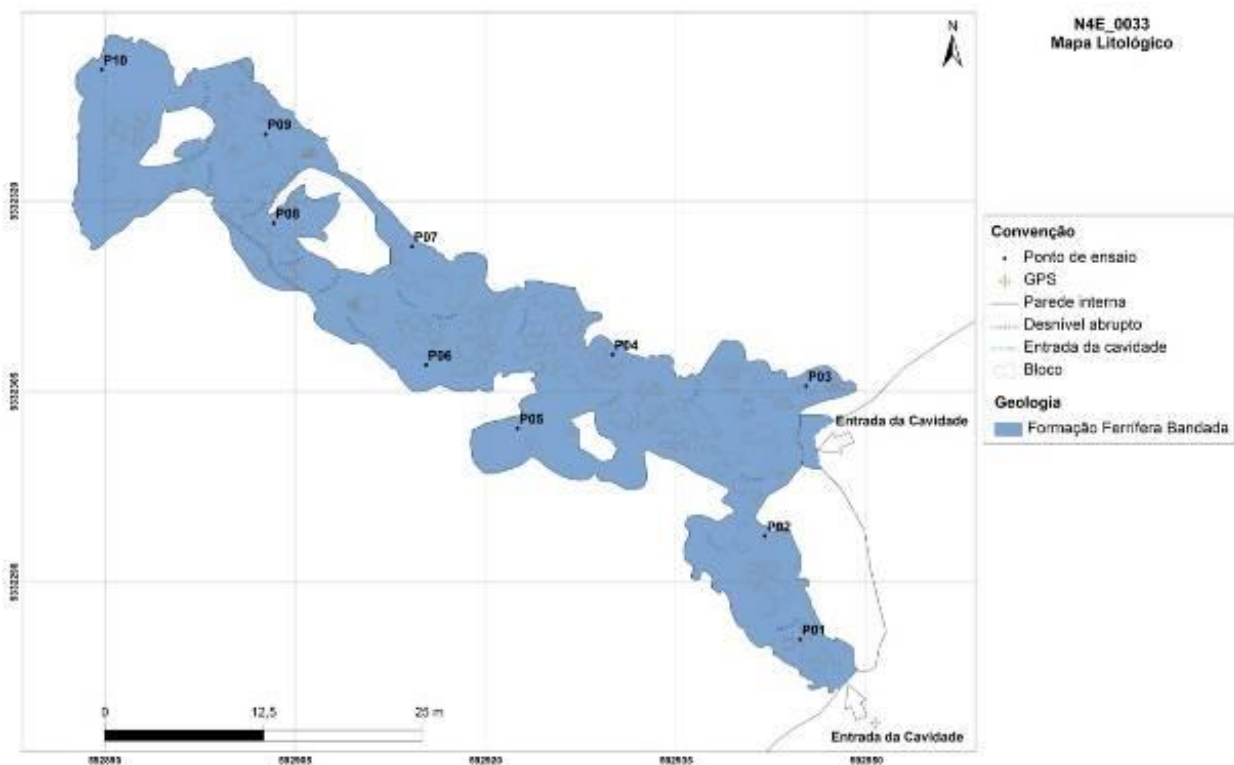


Figura 8: Mapa litológico com a localização dos pontos de ensaio na cavidade N4E_0033.

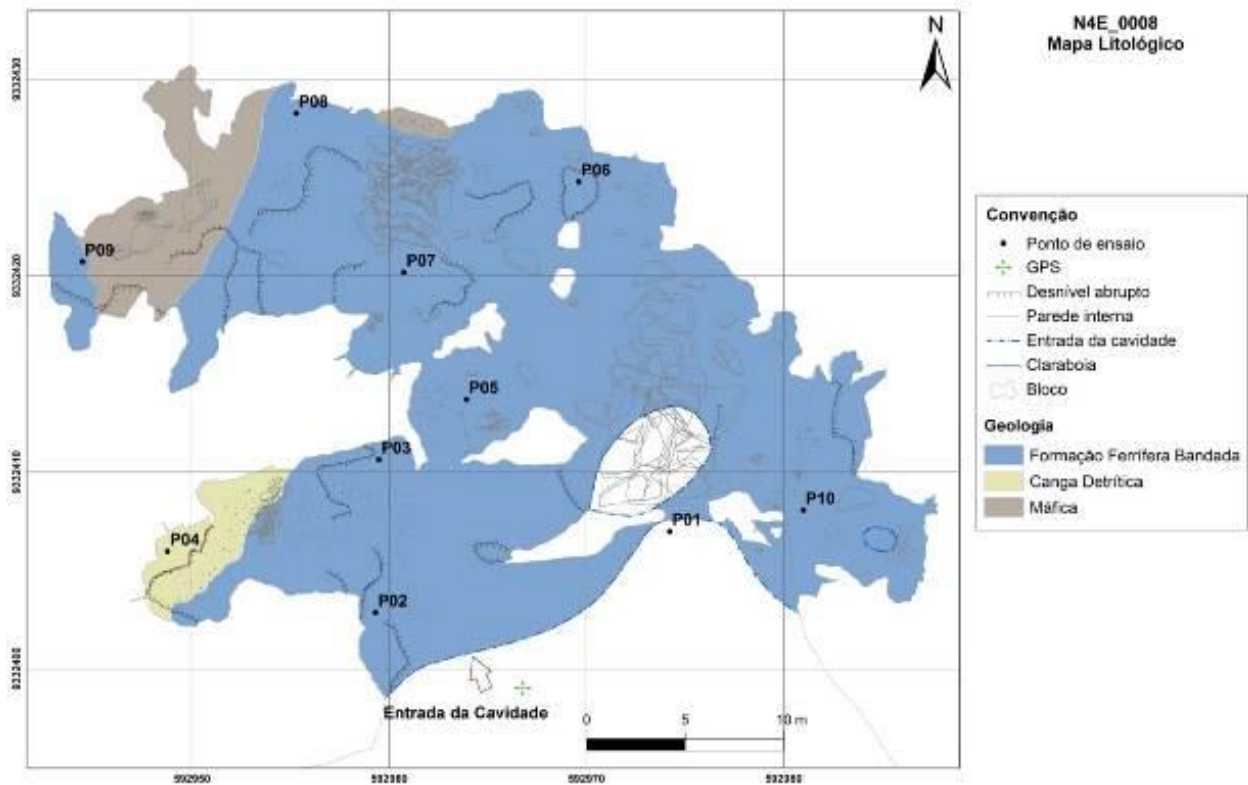


Figura 9: Mapa litológico com a localização dos pontos de ensaio na cavidade N4E_0008.

A medição do ricochete foi correlacionada com a resistência do maciço, mediante o designado *ábaco de Miller*, que leva em conta a densidade da rocha (a formação ferrífera laterítica apresenta uma densidade média 31 kN/m³) e a orientação do martelo em relação a superfície da rocha ensaiada (perpendicular a superfície de ensaio).

Como referência da densidade, foram coletadas ao longo dos anos, amostras que dão suporte as estimativas de recursos minerais dos

projetos de minério de ferro em Carajás (ASSIS, 2013). Ao todo foram utilizados dados de 973 medidas de densidade (Tabela 6).

Foi realizada uma análise comparativa entre as estimativas da resistência na análise tátil-visual da formação ferrífera, e os valores quantitativos da resistência determinado em ensaio utilizando o martelo de Schmidt no mesmo material, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas 7 a 9.

Tabela 6: Média dos valores de densidade para modelagem de dados aerogravimétricos gradiométricos (Assis, 2013).

Sigla	Litotipo	Densidade média (g/cm ³)
HC	Hematitito compacto	3,61
HF	Hematitito friável	3,12
HMN	Hematitito manganésífero	3,13
FMN	Formação ferrífera manganésífera	3,17
JP	Jaspilito	3,18
SO	Solo	2,03
CM	Colúvio/elúvio de hematitito laterizado	3,09
CQ	Lateritas	2,58
MD	Saprolito das rochas máficas, horizonte A/B	1,95
MSD	Saprolito das rochas máficas, horizonte C/R	2,34
MS	Rochas máficas indiferenciadas	2,58
QZ	Veio de Quartzo	2,47
AET	Arenito	2,62
CGL	Conglomerado	2,93

Tabela 7: Comparação das resistências geomecânicas por análise tátil-visual (qualitativa) e por ensaio com esclerômetro de Schmidt (quantitativa) da cavidade N4E_0092.

Pontos de ensaios	Análise tátil-visual		Martelo de Schmidt		
	Grau de alteração	Resistência (Mpa) (ISRM adaptado)	Média dos 20 valores de rebote R	Resistência uniaxial a compressão simples (Mpa)	Descrição ISRM (1981)
1	A ₃	R ₄ (50-100)	39 R	110	Rocha muito resistente
2	A ₃	R ₄ (50-100)	36 R	85	Rocha resistente
3	A ₃	R ₃ (25-50)	26,5 R	48	Rocha medianamente resistente
4	A ₃	R ₃ (25-50)	28 R	53	Rocha resistente
5	A ₃	R ₃ (25-50)	24 R	41	Rocha medianamente resistente
6	A ₃	R ₃ (25-50)	25,5 R	44	Rocha medianamente resistente
7	A ₃	R ₃ (25-50)	22,5 R	37	Rocha medianamente resistente
8	A ₃	R ₃ (25-50)	21 R	32	Rocha medianamente resistente
9	A ₃	R ₂ (10-25)	22 R	35	Rocha medianamente resistente
10	A ₃	R ₃ (25-50)	19,5 R	30	Rocha medianamente resistente
11	A ₄	R ₃ (25-50)	25,5 R	44	Rocha medianamente resistente

Densidade da formação ferrífera: 31,2 kN/m³

Tabela 8: Comparação das resistências geomecânicas por análise tátil-visual (qualitativa) e por ensaio com esclerômetro de Schmidt (quantitativa) da cavidade N4E_0033.

Pontos de ensaios	Análise tátil-visual		Martelo de Schmidt		
	Grau de alteração	Resistência (Mpa) (ISRM adaptado)	Média dos 20 valores de rebote R	Resistência uniaxial a compressão simples (Mpa)	Descrição ISRM (1981)
1	A ₃	R ₄ (50-100)	28,5 R	54	Rocha resistente
2	A ₃	R ₄ (50-100)	18,5 R	28,5	Rocha medianamente resistente
3	A ₃	R ₃ (25-50)	18 R	28	Rocha medianamente resistente
4	A ₃	R ₃ (25-50)	23,5 R	39	Rocha resistente
5	A ₃	R ₃ (25-50)	14,5 R	22,5	Rocha branda
6	A ₃	R ₃ (25-50)	23 R	38	Rocha medianamente resistente
7	A ₃	R ₃ (25-50)	18,5 R	28,5	Rocha medianamente resistente
8	A ₄	R ₂ (10-25)	17 R	27	Rocha medianamente resistente
9	A ₄	R ₂ (10-25)	14,5 R	22,5	Rocha branda
10	A ₄	R ₃ (25-50)	19 R	29	Rocha medianamente resistente

Densidade da formação ferrífera: 31,2 kN/m³

Tabela 9: Comparação das resistências geomecânicas por análise tátil-visual (qualitativa) e por ensaio com esclerômetro de Schmidt (quantitativa) da cavidade N4E_0008.

Pontos de ensaios	Análise tátil-visual		Martelo de Schmidt		
	Grau de alteração	Resistência (Mpa) (ISRM adaptado)	Média dos 20 valores de rebote R	Resistência uniaxial a compressão simples (Mpa)	Descrição ISRM (1981)
1	A ₃	R ₃ (25-50)	24 R	41	Rocha medianamente resistente
2	A ₃	R ₄ (50-100)	36 R	85	Rocha resistente
3	A ₄	R ₂ (10-25)	13,5 R	21	Rocha branda
4	A ₃	R ₃ (25-50)	19,5 R	30	Rocha medianamente resistente
5	A ₃	R ₃ (25-50)	19,5 R	30	Rocha medianamente resistente
6	A ₃	R ₃ (25-50)	21,5 R	33	Rocha medianamente resistente
7	A ₃	R ₄ (50-100)	26 R	47	Rocha medianamente resistente
8	A ₃	R ₃ (25-50)	23,5 R	39	Rocha medianamente resistente
9	A ₄	R ₃ (25-50)	17 R	27	Rocha medianamente resistente
10	A ₄	R ₃ (25-50)	18,5 R	28,5	Rocha medianamente resistente
Densidade da formação ferrífera: 31,2 kN/m ³					

Na análise dos resultados, nota-se que a cavidade **N4E_0092** apresenta a formação ferrífera mais resistente, sendo classificada em geral como rocha medianamente resistente (R3) com resistência a compressão uniaxial (σ_c) variando entre 25 e 50 Mpa, (conforme ISRM, 1981 - Tabela 7) e setores mais resistentes (R4) próximo à entrada da cavidade onde o ensaio apresenta valores de resistência cerca de 80 Mpa e 110 Mpa.

As cavidades **N4E_0033** e **N4E_0008** apresentam uma formação ferrífera com características geomecânicas diferentes em três setores da cavidade. Nos setores iniciais são classificados conforme a ISRM (1981) como uma rocha resistente (R4), com resistência a compressão uniaxial no intervalo entre 50 e 100 Mpa. A formação ferrífera medianamente resistente (R3) ocorre de forma predominante nas respectivas cavidades e apresenta resistência à compressão uniaxial (σ_c) entre 25 e 50 Mpa. Nos pontos 5 e 9 da cavidade **N4E_0033** (Tabela 8) e ponto 3 da cavidade **N4E_0008** (Tabela 9) a formação ferrífera é menos resistente, provavelmente devido a uma maior porosidade (influxo de água) e, ainda pela presença de pares conjugados de fraturas. Dessa forma, tais cavidades são classificadas neste setor de acordo com a ISRM (1981) como rocha branda de resistência a compressão uniaxial (σ_c) entre 10 e 25 Mpa.

Ressalta-se que no ponto (1) da cavidade **N4E_0008**, por vezes não foi possível obter valores

de rebote (sem leitura) em função da fragilidade do material encontrado. Irfan; Dearman (1978a) aconselham que o esclerômetro de Schmidt só deva ser utilizado para materiais resistentes com um valor de ricochete (R) superior a 40. No entanto, Hencher; Martin (1982) defende o uso do martelo de Schmidt como índice para toda a gama de estados de alteração do material. Propõem, ainda, que a inexistência de valor de ricochete (R), pode ser usada para definir o limite entre o estado muito alterado e o estado completamente alterado, mas apenas no caso dos materiais *in situ*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que mesmo em caráter preliminar, este estudo de caracterização representou bem a geologia local em ambientes ferríferos, e forneceu boa aproximação das condições de qualidade do material rochoso, o que pode auxiliar nos estudos geoespeleológicos exigidos pela legislação vigente no que diz respeito à estabilidade estrutural das cavidades durante a aproximação da lavra em regiões de cavidades. Sendo importante o conhecimento da resistência do maciço mediante as vibrações para o planejamento e controle das premissas de desmonte (cargas e distancias).

As principais contribuições técnicas deste trabalho foram:

Ω Os dados apresentados mostram uma ótima correlação entre a análise tátil-visual e o ensaio

utilizando o martelo de Schmidt, onde a resistência à compressão uniaxial através do esclerômetro de Schmidt no maciço rochoso mostrou em média valores de 25-50 Mpa para as zonas medianamente alteradas e resistentes (A3/R3) e, cerca de 10-25 Mpa nas zonas mais alteradas e menos resistentes (A4/R2). Estes valores se encontram dentro do limite do índice de resistência estabelecido pela ISRM.

- Ω Observou-se que a direção principal de desenvolvimento (prolongamento e alargamento) das cavidades e/ou condutos maiores, segue preferencialmente, a interseção entre o bandamento e duas principais famílias de fraturas (NE-SW e NW-SE). A resistência da formação ferrífera foi influenciada pela anisotropia da direção que será determinante para a estabilidade do maciço, principalmente em condições onde o plano de anisotropia se encontre alterado, representando pontos de fraqueza do maciço rochoso;

Ω A formação ferrífera laterítica em termos de qualidade geotécnica apresentou um grau de fraturamento elevado (F4) que geralmente implica no comportamento de baixa resistência do maciço, mesmo que o material rochoso constituinte seja pouco alterado.

Ω A circulação de água no maciço rochoso por meio de estruturas como fraturas, foliações e dobras, tem papel fundamental na alteração heterogênea da formação ferrífera, resultando numa maior porosidade do material, tornando-se conseqüentemente mais friável e menos coesivo, sendo um dos fatores que mais influenciam na resistência das cavidades e, indicando zonas com maior fragilidade geotécnica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Vale S.A. pela autorização na divulgação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, L. M. et al. **Geração de Modelo Exploratório para o Minério de Ferro da Província Mineral de Carajás Através da Integração de Dados Multifforme.** (2013) (Dissertação de Mestrado em Geologia) - UNB.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classification, USA:** Jonh Wiley & Sons, 1989. p. 251.
- BRAGA, A. A. J. et al. **Influência estrutural sobre cavidades em formações ferríferas, Carajás-Pa.** *Geonomos*, 25(1), 24-39, 2017.
- 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, SP. Anais. Campinas: SBE, 2015. p. 627-634. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_627-634.pdf. Acesso em: 24 abr. 2018.
- BRASIL. **Decreto no 6.640, de 7 de novembro de 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 1 de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF, 7 de novembro de 2008.
- BVP Engenharia Ltda. **Mapeamento litoestrutural e geomecânico da mina N4E - Serra dos Carajás/PA - 2008** (Relatório interno nº BVP: 2.01.02.100-E-RT-020).
- DEERE, D; MILLER, R. **Engineering classification and index properties for intact rock.** 1º. New Mexico: University of Illinois, 1966. p. 300. Report AFNL-TR-65-116, 1966.
- DEERE, D. U. A. J; HENDRON, J. R; PATTON, F.D; CORDING, E. J. **Design of surface and near surface construction in rock. In failure and breakage of rock.** C. Fairhurst ed. Society of Mining Engineers of AIME, New York, p. 237-302, 1967
- FERRER, M; VALLEJO, L. **Manual de Campo para la Descripción y Caracterización de Macizos Rocosos en Afloramientos.** Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, 1999. p. 83. ISBN: 84-7840-387-6, 1999.

- FIORI & CARMIGNANI. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Curitiba: Ed. UFPR, 604 p. 2011.
- GONÇALVES, D.F., DE PAULA, R.G., BARBOSA, M.R., TELES, MAURITY, C.W., J.B., MACAMBIRA, J.B. **Perfis lateríticos e o desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas na mina N4E - Carajás, sudeste do estado do Pará**. Anais do 48º Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Porto Alegre. 2016. [s.n.]
- GONTIJO, A. A. **Utilização de Sensor Ótico para Monitoramento Contínuo de Convergência em Ambientes Subterrâneos**. 2014.
- HENCHER, S. R; MARTIN, R. P. **The description and classification of weathered rocks in Hong Kong for engineering purposes**. Proc. 7th Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, vol. 1, p. 125-142, 1982.
- HOEK, E; BRAY, J. **Rock Slope Engineering**. 3º. London: Institution of Mining and Metallurgy, p. 358. ISBN 0 419 16010 8, 1981.
- 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 Abril. 2018.
- IRFAN, T. Y; DEARMAN, W. R. **The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England**. Quartely Journal Engineering Geology, vol. 11, p. 233-244, 1978a
- ISRM - International Society of Rock Mechanics. **Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 15 (6): p. 319-368, 1978.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics. **Basic geotechnical description of rock masses**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr., 18: 85- 110, 1981
- MAURITY, C. W; KOTSCHOUBEY, B. **Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1- Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas**. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra, 7: p. 331-362, 1995.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Resolução CONAMA nº 347, de 10 de setembro de 2004**. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico. Diário Oficial da União, 13 de setembro de 2004. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452. Data de acesso 15/03/2018.
- PRIEST, S. D. **Discontinuity analysis for rock engineering**. Chapman & Hall, London p. 470, 1993.
- VIEIRA, V. et al. **Caracterização geológico-geotécnica e Classificação geomecânica**. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2015
- VILES, H. et al. **The use of the Schmidt Hammer and Equotip for rock hardness assessment in geomorphology and heritage science: a comparative analysis**. Earth surface processes and landforms. 5 Julho 2010, p. 320-333, 2010.

Fluxo editorial:

Recebido em: 21.06.2019

Aprovado em: 02.10.2019



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp