

Zoneamento da Fragilidade Geotécnica de Cavidades Naturais em Formações Ferríferas

Tatiana Soares Noce

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, tatiana.noce@gmail.com

Rodolfo Renó

MecRoc Engenharia Ltda., Belo Horizonte, Brasil, rorennow@gmail.com

Frederico Garcia Sobreira

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, sobreira@degeo.ufop.br

Hernani Mota de Lima

Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, hernani.lima@ufop.br

RESUMO: Segundo a legislação ambiental brasileira, as cavidades naturais subterrâneas, bem como sua área de influência, não podem sofrer impactos negativos irreversíveis até que se realizem estudos específicos de relevância e medidas compensatórias. Na ausência de estudos específicos para a determinação dessa área de influência, estipulou-se toda a área inserida em um raio de 250m a partir da projeção horizontal da cavidade. Esse valor pode ser exagerado ou mesmo insuficiente para a preservação das cavernas. Um dos parâmetros que deve ser analisado para a definição da real área de influência é a integridade física, que está associada à fragilidade geotécnica perante os níveis de vibração e deslocamento sofrido pelo maciço rochoso. Quando se tratam de cavidades em formações ferríferas, as áreas de influência podem encampar reservas minerais. Esse estudo trata dos principais aspectos geotécnicos observados em cavidades naturais inseridas nesse contexto. Para isso, foi realizada uma caracterização das principais estruturas geológicas presentes em duas cavidades situadas na Serra de Antônio Pereira, na região conhecida como “Gogo” de propriedade da Vale S/A, município de Mariana-MG. Tal estudo pode ajudar a direcionar monitoramentos geotécnicos e estudos mais detalhados que, conseqüentemente, contribuirão para o estabelecimento de critérios técnicos para a definição da área de influência de cada cavidade. É possível observar uma alta fragilidade geotécnica nesses ambientes, comumente compostos por rochas muito alteradas, com baixa resistência a compressão uniaxial e alta possibilidade de ocorrência de mecanismos de ruptura. Essa alta fragilidade, muitas vezes está associada ao próprio processo de espeleogênese das galerias, sendo as zonas mais frágeis coincidentes com zonas de contato ou locais com movimentação de água e sedimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Zoneamento geotécnico, Espeleologia, Cavidades Naturais, Formações Ferríferas, Geotecnia.

1 INTRODUÇÃO

O decreto federal nº 6.640 de 2008 determina que as cavidades naturais subterrâneas de relevância máxima, incluindo sua área de influência, não sofram impactos ambientais

irreversíveis. Cavidades de outros níveis de relevância, assim como suas áreas de influência, podem ser suprimidas ou sujeitas a impactos, desde que precedidos de estudos específicos e mediante compensações ambientais. A Resolução CONAMA 347 de 10 de setembro de

2004 determina que até que se realizem estudos específicos para um melhor dimensionamento da área de influência das cavidades naturais, esta será dada pela projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de 250 m, em forma de poligonal convexa. Esse entorno pode não representar a real área de influência dessas cavidades, podendo ser exagerado ou mesmo insuficiente para a sua preservação.

Quando se tratam de cavidades em formações ferríferas, o raio de influência pode reduzir, consideravelmente, uma reserva economicamente lavrável, além de impedir a implantação de obras de infraestrutura vitais para a indústria da mineração. Para atender aos princípios de desenvolvimento sustentável, os mineradores têm dedicado diversos estudos para um melhor conhecimento da gênese, do comportamento geomecânico e do ecossistema de dentro e dos arredores das cavidades.

Um dos aspectos fundamentais a ser analisado é a integridade física das cavernas perante os possíveis impactos que os empreendimentos poderiam causar. O presente estudo realizou a caracterização geotécnica e o zoneamento geotécnico de duas cavidades inseridas em formações ferríferas situadas na região do Morro Santana, município de Mariana-MG.

2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo está localizada na Serra de Antônio Pereira, município de Mariana, porção sudeste do estado de Minas Gerais. O acesso é feito a partir da porção norte da área urbana de Mariana pela MG-129, por cerca de 6 km até o trevo da comunidade do Gogo, seguindo daí por estradas secundárias não pavimentadas.

3 METODOLOGIA

O estudo se iniciou com o levantamento e análise da bibliografia existente acerca da estratigrafia, geologia estrutural, geomorfologia e fisiografia local e regional da área de estudo. Ainda nesse contexto, foram analisados

diversos trabalhos envolvendo estudos espeleológicos em cavidades de minério de ferro e estudos geotécnicos e geomecânicos aplicados a ambientes subterrâneos. Foram confeccionados mapas base, com o auxílio dos softwares ArcGIS 10.1 e Google Earth Pro, a serem utilizados nas etapas de campo, a partir da aquisição das informações cartográficas e espeleológicas da área de estudo, aliado ao levantamento das cavidades já cadastradas.

Com base nos aspectos litológicos, posição no relevo e características naturais e antrópicas, foram selecionadas 2 cavidades para a realização do estudo: SPB10 e SPD11.

Após a seleção, foram desenvolvidos os trabalhos de mapeamento litológico e estrutural e caracterização geotécnica das cavidades, com a análise dos principais aspectos que possam afetar a fragilidade física destas. Foram realizados ensaios de carga pontual das principais rochas encaixantes das cavidades, sendo as amostras coletadas do piso de modo a não afetar a integridade das galerias.

Em seguida, foi utilizado o sistema de classificação de maciços rochosos Rock Mass Index (R_{Mi}), de modo a setorizar a cavidade em regiões com qualidade do maciço semelhante. A escolha desse sistema se deu por se tratar de um sistema mais atual e com maior variação em ambientes pequenos, além de dar ampla atenção à resistência à compressão uniaxial da rocha, parâmetro fundamental para a definição da qualidade de um maciço.

Após isso, foram definidos os principais aspectos a serem analisados para um efetivo zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas. Assim, foram catalogados os sinais de instabilidade apresentados nas cavidades, os possíveis mecanismos de ruptura, a dinâmica hídrica e dos sedimentos e a dimensão média dos vãos sem apoio. Além disso, foram analisados os processos de espeleogênese, de modo a verificar sua relação às zonas de fragilidade e instabilidade das galerias.

Por fim, a partir da interação das características geotécnicas e suas respostas a possíveis impactos físicos, foi possível gerar um zoneamento da fragilidade geotécnica das cavidades. Tal zoneamento possui um caráter

comparativo, subdividindo as galerias em zonas de fragilidade muito alta, alta, média, baixa e muito baixa.

4 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

4.1 Caverna SPB10

4.1.1 Caracterização da Rocha Intacta

A caverna SPB10 está inteiramente inserida em canga detritica, de granulometria muito grossa a cascalho com seixos mal selecionados de dimensões de até 30 cm. Apresenta minerais totalmente alterados, gradando para cores de solo, com uma coerência relativamente alta, quebrando com dificuldade ao golpe do martelo de geólogo. A resistência a compressão uniaxial da canga observada nessa caverna é de 11,59 MPa.

4.1.2 Caracterização Estrutural

São identificadas fraturas e juntas delimitadas por superfícies bastante irregulares, com mecanismo de ruptura por tração. Observa-se um grande bloco colapsado de uma zona de fraturamento com mergulho próximo a 90°.

Essas fraturas apresentam superfícies muito rugosas com continuidades variáveis. Suas aberturas são maiores que 5mm, muitas vezes delimitando blocos suspensos no teto. É comum a presença de queda de blocos em toda a extensão da galeria. O mapa da caverna mostrando as estruturas observadas está apresentado na Figura 1.

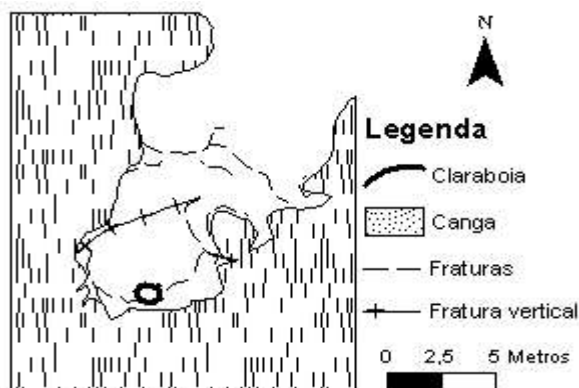


Figura 1. Mapa estrutural caverna SPB10. Fonte: Modificado de Auler et al. 2012.

4.1.3 Qualidade do Maciço Rochoso

A partir da equação de Palmstrom (1996) para maciços com menos de três famílias de descontinuidades, obteve-se um volume do bloco de 420 m³, bem superior às dimensões máximas da galeria.

A partir desse valor, obtém-se um índice jP superior a 1, chegando a um índice R_{Mi} igual a resistência a compressão uniaxial, uma vez que o máximo valor para o índice jP de acordo com Palmstrom (1996) é 1,0.

Assim, o maciço foi classificado como maciço muito forte, com R_{Mi} muito alto em toda a extensão da caverna.

4.1.4 Dinâmica Hídrica

Durante os trabalhos de campo não foi observada presença de água no interior da galeria. Observa-se indícios de um fluxo de água provavelmente pluvial, entrando na galeria principalmente pela boca e claraboia. Em seu interior, ele é comumente direcionado a porção central, onde é observada uma maior concentração de sedimentos argilosos.

4.1.5 Dinâmica dos Sedimentos

São observados processos de abatimento do teto em toda a extensão da caverna, gerando sedimentos e blocos abatidos oriundos da canga. Além disso, observa-se um aporte externo de sedimentos advindos da boca e da claraboia, bem como uma remobilização deles próximo a claraboia, provavelmente devido a ação da água pluvial.

O zoneamento a partir da dinâmica dos sedimentos foi feito com base em sua movimentação, sendo os sedimentos mais arenosos e menos coesos com maior possibilidade de movimentação. Sedimentos mais argilosos, por outro lado, apresentam baixa possibilidade de movimentação.

4.1.6 Tamanho dos Vãos

Nas proximidades da boca da galeria nota-se uma maior dimensão dos vãos, gerando uma menor estabilidade de acordo com este

parâmetro. Em sua porção mais distal, os vãos são inferiores a 5 metros, gerando relativamente uma maior estabilidade.

4.1.7 Espeleogênese

O fluxo de água em direção a inclinação da escarpa causou um favorecimento no processo de lixiviação da canga, assim como do itabirito logo abaixo nesse sentido. O processo de lixiviação gera vazios isolados em meio ao substrato que continuamente se comunicam e ficam cada vez maiores. Com a ampliação desses vazios, a canga perde estabilidade solapando devido à gravidade.

O processo gerou a comunicação da cavidade com o exterior através de uma dolina de colapso que compõe a sua entrada.

4.2 Cavidade SPD11

4.2.1 Caracterização da Rocha Intacta

Inserida no contato entre o itabirito e a canga, a cavidade SPD11 apresenta a litologia mais comum desse tipo de ambiente subterrâneo natural (Figura 2). O itabirito apresenta-se muito alterado e pouco coerente, facilmente quebrável ao golpe do martelo de geólogo. Sua resistência a compressão uniaxial obtida a través de testes de carga pontual foi de 12,45 MPa.

A canga apresenta características bem semelhantes as observadas na cavidade SPB10, diferenciando-se por uma maior quantidade de blocos de itabirito em meio a matriz. A resistência a compressão uniaxial obtida para esta canga nos ensaios de carga pontual foi de 10,10 MPa.



Figura 2. Contato canga/itabirito cavidade SPD11

4.2.2 Caracterização Estrutural

Foram observadas três famílias de estruturas principais no itabirito, dadas pelo acamamento (S0) e duas famílias de fraturas, J1 e J2. O acamamento apresenta-se bastante influente nos processos de instabilidade com muitos deslocamentos associados, principalmente quando interceptado pelas duas famílias de fraturas (Figuras 3 e 4). As superfícies das descontinuidades apresentam-se rugosas e planas, moderadamente alteradas e sem a presença de água. Ressalta-se que a cavidade apresenta uma inclinação geral para NE, resultante do acamamento principal de atitude média igual a 043/23.

A canga, dada por todo o teto e a porção leste da galeria, apresenta diversas juntas de tração descontínuas muito rugosas e muito alteradas.

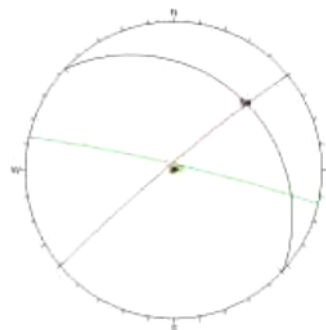


Figura 3. Estereograma mostrando a conformação geral das cunhas existentes na cavidade SPD11.

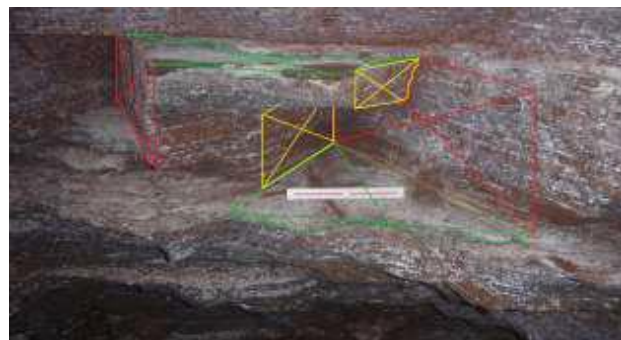


Figura 4. Cunhas formadas pela conjugação do acamamento com as famílias de fraturas J1 e J2

4.2.3 Qualidade do Maciço

A canga encontrada nesta cavidade apresentou, a partir dos cálculos indicados por Palmstrom (1996), um volume do bloco igual a 256,50 m³.

A partir daí, obteve-se a mesma qualidade do maciço obtida na canga encontrada na cavidade SPB10, apresentando um índice R_{Mi} muito alto, com resistência do maciço muito forte.

O itabirito apresentou um volume do bloco médio de 0,0011 m³, gerando valores de R_{Mi} baixos, classificando-o como maciço fraco em termos de resistência.

4.2.4 Dinâmica Hídrica

Não foi observada presença de água durante os trabalhos de campo, sendo o escoamento pluvial provavelmente em direção à entrada. O fluxo preferencial no interior da galeria seria inicialmente em direção a sua porção leste, em virtude da maior inclinação proporcionada pelo mergulho do acamamento, e em seguida em direção a boca, acompanhando a maior inclinação do piso.

Essa água adentra o ambiente cavernícola pelos vazios interconectados existentes na camada de canga, pela zona de contato entre esta e o itabirito e pelas fraturas comuns nas formações ferríferas. Como está situada em uma ruptura de relevo, com uma drenagem cerca de 100 metros a frente, o escoamento provavelmente é direcionado a drenagem, contribuindo com seu aporte de água.

4.2.5 Dinâmica Sedimentar

Os sedimentos encontrados na cavidade SPD11 são, em sua maioria, de origem autóctone. Trata-se de sedimentos frutos do processo de deslocamento da canga, que já se encontra em um estágio avançado, e da própria desagregação do itabirito. Devido às inúmeras cunhas existentes nestes itabiritos, é comum o processo de deslocamento dessa litologia, causando pequenos depósitos sedimentares placóides em meio a sedimentos finos.

Os sedimentos são direcionados pela ação pluvial e da gravidade tanto para a boca da cavidade quanto para a sua porção leste, seguindo o mergulho do acamamento principal.

4.2.6 Tamanho dos Vãos

A cavidade SPD11 apresenta uma conformação

semelhante a SPB10, com maiores dimensões nas proximidades da boca, e menores dimensões na porção mais distal.

4.2.7 Espelogênese

O desenvolvimento principal da cavidade SPD11 se dá na zona de contato entre a canga e o itabirito, seguindo o modelo principal de espeleogênese desse tipo de caverna.

Todo o teto está inserido em canga com uma inclinação de atitude semelhante ao acamamento principal, indicando uma gênese relativa à erosão e dissolução do substrato friável de itabirito, restando a capa de canga mais resistente como teto da caverna.

5 ZONEAMENTO GEOTÉCNICO

Para um efetivo zoneamento geotécnico, as informações levantadas em campo foram tratadas e analisadas espacialmente possibilitando a setorização dos aspectos geotécnicos semelhantes. Tomou-se como princípio que os locais de maior fragilidade são os que provavelmente responderiam primeiro aos impactos sofridos nas galerias por agentes externos.

Foram analisados seis aspectos geotécnicos principais, sendo definida uma escala de pontuação para cada um. Ressalta-se que a atribuição de valores foi feita de forma comparativa, resultando em um zoneamento apenas qualitativo, de modo a definir as áreas mais susceptíveis a possíveis impactos.

Foi utilizada uma escala de pontuação de 0 a 100 no zoneamento, onde os valores mais baixos representam as áreas de menor fragilidade. Dentre os aspectos analisados foram atribuídos até um máximo de 40 pontos para a qualidade do maciço rochoso, 15 pontos para os mecanismos de ruptura, 15 pontos para a influência de água, 15 pontos para a influência dos sedimentos e 15 pontos para o tamanho relativo dos vãos. Os locais que apresentam sinais de instabilidade foram penalizados em 15 pontos. A partir daí foram definidos 5 níveis de fragilidade diferentes de acordo com as faixas

de pontuação obtidas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Faixa de pontuação por nível de fragilidade geotécnica utilizado.

Fragilidade geotécnica	Pontuação
Muito alta	< 20
Alta	21 a 40
Média	41 a 60
Baixa	61 a 80
Muito baixa	> 81

5.1 Caverna SPB10

A caverna SPB10 apresenta-se completamente seca, com um índice R_{Mi} muito alto e uma alta probabilidade de queda de blocos do teto em toda sua extensão. Já a movimentação dos sedimentos, o tamanho dos vãos e ocorrência de sinais de instabilidade são variáveis.

As maiores movimentações de sedimentos são observadas próximo a entrada e na porção mais distal, ficando a porção intermediária como um depósito com movimentação muito baixa de sedimentos. Os sinais de instabilidade são relativamente coincidentes com as principais descontinuidades observadas.

O mapa contendo o zoneamento de fragilidade geotécnica da caverna está apresentado na Figura 5. A caverna apresenta uma fragilidade geotécnica baixa em toda sua extensão, explicada, sobretudo pelos altos valores de R_{Mi}. Nota-se que as zonas de maior fragilidade são coincidentes com as regiões onde foi observada uma maior concentração de juntas de alívio, assim como as regiões com maiores instabilidades.



Figura 5. Zoneamento da fragilidade geotécnica da caverna SPB10.

5.2 Caverna SPD11

A caverna SPD11 apresenta uma fragilidade geotécnica visivelmente inferior a caverna SPB10, principalmente nas porções inseridas em itabirito, que mostram um menor índice R_{Mi} e maior probabilidade de ocorrência de mecanismos de ruptura. As porções próximas à zona de contato e a entrada da galeria também apresentam baixas fragilidades, explicadas pelas características estruturais e de alteração da rocha.

As zonas menos frágeis estão inseridas na canga, principalmente onde não existem fraturas de alívio com aberturas e continuidades consideráveis. O mapa contendo o zoneamento geotécnico da caverna SPD11 está apresentado na Figura 6. Nota-se a menor fragilidade da porção da caverna inserida em itabirito, com uma coloração mais escura no mapa. Em seguida, a região mais frágil é a mais próxima à entrada da galeria, onde ocorre influência de água, maior movimentação de sedimentos e maior concentração de juntas de alívio na canga.

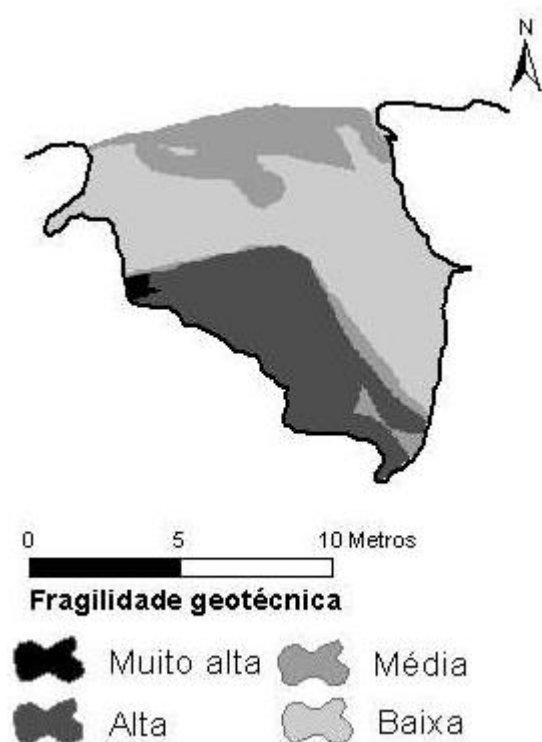


Figura 6. Zoneamento da fragilidade geotécnica da cavidade SPD11

6 CONCLUSÕES

Foi possível observar uma alta aplicabilidade do sistema de classificação de maciços Rock Mass Index (RMI) nesses ambientes, assim como de outras técnicas comuns para a caracterização de maciços rochosos, sempre levando em conta as peculiaridades das cavidades naturais.

O presente estudo trata do passo inicial para futuros monitoramentos de cavidades naturais de modo a definir seu real raio de influência. Para dar continuidade a esse tipo de estudo, é fundamental o monitoramento contínuo de cavidades que tenham permissão de redução do raio de influência ou mesmo de supressão. Assim, é possível obter uma maior aplicabilidade, além de uma melhor definição da pontuação e classes de fragilidade sugeridas.

Ressalta-se que existe uma ampla relação das porções mais frágeis das galerias com sua própria espeleogênese.

Por se tratar de uma análise comparativa são necessários outros estudos mais detalhados zoneamento para a definição de uma escala de pontuação mais quantitativa e objetiva.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Vale S/A pelo apoio e pela liberação da região de estudo e de material bibliográfico, a UFOP pela disponibilização dos laboratórios e a SEE pelo apoio pessoal e empréstimo de equipamentos.

REFERÊNCIAS

- AULER, A. S. *et al.* Projeto Gogo – Espeleologia: Diagnóstico e Análise de Relevância. Belo Horizonte: Carste Consultores Associados Ltda., 2012.
- 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. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-010/2008/Decreto/D6640.htm . Acesso em: 30 abr. 2015.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Resolução CONAMA nº 347, de 10 de setembro 2004. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico. Diário Oficial da União, 13 de setembro de 2004. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452> > . Acesso em: 30abr. 2015.
- PALMSTROM, A. *Characterizing rock masses by the RMI for use in Pratical Rock Engeneering. Part 1: The development of the Rock Mass Index (RMI). Tunnelling and Underground Space Technology: Great Britain*, v. 11, n. 2, p. 175-188, 1996.