



# ANAIS do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Brasília-DF, 20-23 de Abril de 2022



O artigo a seguir é parte integrando dos Anais do 36º Congresso Brasileiro de Espeleologia (CBE) disponível gratuitamente em [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br).

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

LIMA, T. F.. Mapeamento geoestrutural-geotécnico de cavidades hospedadas em Itabirito e Canga - O caso da gruta Fecho do Funil In: MOMOLI, R. S.; STUMP, C. F.; VIEIRA, J. D. G.; ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 36, 2022. Brasília. *Anais...* Campinas: SBE, 2022. p.388-395. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais36cbe/36cbe\\_388-395.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais36cbe/36cbe_388-395.pdf)>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.  
Consulte outras obras disponíveis em [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br)

## **MAPEAMENTO GEOESTRUTURAL-GEOTÉCNICO DE CAVIDADES HOSPEDADAS EM ITABIRITO E CANGA – O CASO DA GRUTA FECHO DO FUNIL**

*GEOSTRUCTURAL-GEOTECHNICAL SURVEY OF CAVES HOSTED IN ITABIRITO AND CANGA – THE  
CASE OF THE GRUTA FECHO DO FUNIL*

**Thiago Ferreira LIMA (1,2).**

- (1) Brandt Meio Ambiente LTDA;  
(2) Observatório Espeleológico.

**Contatos:** [tlima@brandt.com.br](mailto:tlima@brandt.com.br); [flima.thiago@gmail.com](mailto:flima.thiago@gmail.com).

### **Resumo**

Considerando às particularidades espeleogenéticas e de fragilidade das cavidades hospedadas em Itabiritos, Jaspilitos e Canga, e sua susceptibilidade a impactos ambientais ocasionados pelas atividades humanas, este estudo tem como objetivo a proposição de métodos para o seu mapeamento geoestrutural-geotécnico, baseado em métodos de diagnóstico tradicionalmente aplicados a feições morfológicas e civis como taludes, represas e maciços rochosos. Para a definição do método, elaborou-se uma ficha de mapeamento geoestrutural-geotécnico que utiliza como referência as tabelas indicadas pela Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas (*International Society for Rock Mechanics – ISRM*). As etapas do estudo foram divididas em revisão bibliográfica, coleta e tratamento de dados e análise integrada dos resultados alcançados, buscando assim uma sistematização metodológica fundamental à sua credibilidade. Neste trabalho, optou-se pela apresentação dos resultados do mapeamento geoestrutural-geotécnico realizado na Gruta Fecho do Funil, localizada no município de São Joaquim de Bicas, Estado de Minas Gerais. Foram levantadas as características litológicas, estruturais, hidrológicas e de fragilidade dessa cavidade, com vistas a subsidiar a elaboração do mapa geoestrutural-geotécnico ora apresentado. À guisa de conclusão, foram identificadas evidências de que as principais zonas de fragilidade da Gruta Fecho do Funil estão associadas às descontinuidades (famílias de fraturas, foliação e contato litológico) e também a porções mais alteradas e menos resistentes do maciço rochoso que hospeda a cavidade.

**Palavras-Chave:** Gruta; Mapeamento; Geoestrutural; Geotécnico; Geomecânica; Formação Ferrífera (FFB).

### **Abstract**

*Considering the speleogenetic and fragility particularities of the caves hosted in Itabiritos, Jaspilitos and Canga, and their susceptibility to environmental impacts caused by human activities, this study aims to propose methods for its geostructural-geotechnical mapping, based on diagnostic methods traditionally applied to morphological and civil features such as mine ramps, dams and craggys. To define the method, a geostructural-geotechnical mapping form was create up using as reference the tables indicated by the International Society for Rock Mechanics (ISRM). The stages of the study were divided into bibliographic review, data collection and treatment and integrated analysis of the results achieved, thus seeking a methodological systematization fundamental to work credibility. In this paper, we chose to present the results of the geostructural-geotechnical survey carried out in Gruta Fecho do Funil, located in the city of São Joaquim de Bicas, state of Minas Gerais. The lithological, structural, hydrological and fragility characteristics of this cave were surveyed, with a view to subsidizing the elaboration of the geostructural-geotechnical map presented in the results topic. Based on the results, we identified that the main fragile zones of the Gruta Fecho do Funil are associated with rocky discontinuities (fractures, foliation and lithological contact) and also with more altered and less resistant portions of the rock mass that hosts the cave.*

**Keywords:** Cave; Mapping; Geostructural; Geotechnical; Geomechanics; Banded Iron Formation (BIF).

## 1. INTRODUÇÃO

Este artigo trata da proposição de métodos capazes de auxiliar a execução de um mapeamento geoestrutural-geotécnico em cavidades desenvolvidas sob Formações Ferríferas Bandadas (FFB) e Cangas (considerando suas respectivas designações lito-texturais).

Nos anos 2000, verificou-se o incremento da demanda por estudos espeleológicos em cavidades hospedadas em FFB e Canga nas regiões do Quadrilátero Ferrífero/MG (notoriamente, na então Mina de Capão Xavier, como apresentado por PILÓ, L. B. & AULER A. S. (2005)) Carajás/PA (MAURITY & KOTSCHOUBEY, 2005 e PILÓ, L. B. & AULER A. S., 2009) e Corumbá/MT. Tal fato deve-se principalmente ao crescimento dos estudos ambientais desenvolvidos no âmbito do licenciamento ambiental de atividades minerárias exigidos pela legislação concernente à proteção do patrimônio espeleológico.

A partir de então, inúmeras técnicas vêm sendo aplicadas e aperfeiçoadas no que tange a execução de prospecções, espeleotopografia, estudos geoespeleológicos, bioespeleológicos e, mais recentemente, monitoramentos ambientais. Todos estes estudos têm como princípio efetivo cumprir os pressupostos do Decreto Federal N° 10.935/22, e da Instrução Normativa N° 02/2017 do Ministério de Meio Ambiente, que tratam da proteção do patrimônio espeleológico brasileiro frente à instalação e operação de atividades com potencial de impactar estes ambientes singulares.

Nesse contexto, torna-se importante o desenvolvimento e o aprimoramento de métodos para a execução do mapeamento geoestrutural-geotécnico em cavernas de FFB e Canga. Esta caracterização permite gerar subsídios para a mitigação e o posterior acompanhamento de eventuais impactos ambientais ocasionados no interior das cavernas por quaisquer intervenções humanas ou por eventos naturais, além de se tratar de um método capaz de gerar modelos geoestruturais e geotécnicos preditivos do ponto de vista da segurança destas cavidades, como mapas de risco.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo a aplicação e o aprimoramento de métodos para o mapeamento geoestrutural-geotécnico de cavernas de FFB e Canga. Como objetivos específicos, este trabalho buscou: (i) identificar, por meio de um método amostral, as descontinuidades no interior de cavidades de FFB e Canga, registrando elementos

estruturais e litológicos fundamentais para o estabelecimento de zonas de fragilidade internas, produzindo mapa geoestrutural-geotécnico da caverna; (ii) aplicar o método em um estudo de caso da Gruta Fecho do Funil, localizada no município de São Joaquim de Bicas, Estado de Minas Gerais.

## 3. MÉTODO

### 3.1. Revisão bibliográfica

Para o melhor conhecimento acerca dos atributos geológico-estruturais, geotécnicos, geomorfológicos e geoespeleológicos relacionados ao objeto de estudo, foi importante a realização de uma revisão bibliográfica sistemática abrangendo a região onde se localiza a cavidades do estudo de caso.

Estas informações foram obtidas por meio de consulta em bases de órgãos federais e estaduais como CETEC, SBE, RADAMBRASIL, IBGE, CECAV, COMIG, CODEMIG, CPRM, IGAM, ANA, SUPRAM, e em autores considerados referência na literatura espeleológica como SIMMONS (1963), AULER & PILÓ (2005), AULER A.S. *et al* (2021), DUTRA (2013), CALUX *et al* (2014), PALMER (2007), PILÓ & AULER (2009), entre outros. Os recentes trabalhos de VALENTIM (2016) e ARAÚJO (2016) também foram consultados a fim de subsidiar as discussões apresentadas neste trabalho.

### 3.2. Coleta de dados

A partir do conhecimento dos atributos supracitados concernentes à cavidade alvo do mapeamento, foram definidos os procedimentos de coletas de dados em campo.

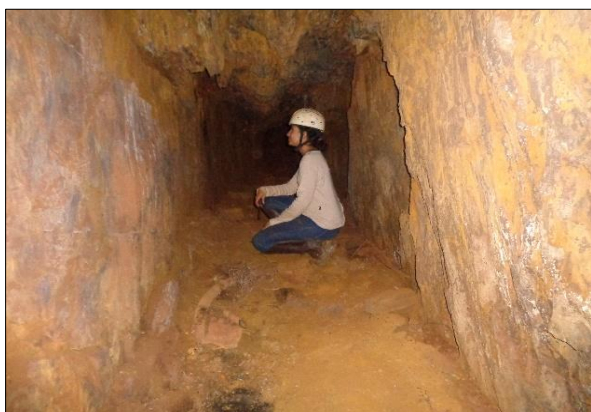
Primeiramente, elaborou-se uma ficha de campo, que contempla elementos geoestruturais (falhas, fraturas, dobras, atitude da foliação, juntas de alívio e litotipos) e geotécnicos-geomecânicos (alteração, resistência, grau de faturamento, padrão de fraturas, grau de saturação do maciço, persistência e preenchimento) (Figura 1).

Para tal, foram utilizadas as tabelas de referência indicadas pela Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas (*International Society for Rock Mechanics* – BROWN/ISRM, 1981).

**Figura 1** - Ficha de mapeamento geoestrutural-geotécnico utilizada para coleta de dados do estudo de caso apresentado neste artigo

PONTO: 01		CAVIDADE: FFB		EQUIPE: BRUNTON		DATA: 02/04/22	
LOCAL/SETOR: FFB		OBS ( )		POSIÇÃO:		TRENA:	
1 - CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS							
LITO 1: FFB				LITO 2: FFB			
ALTERAÇÃO: A3				ALTERAÇÃO: A3			
RESISTÊNCIA: R3				RESISTÊNCIA: R3			
FRATURAMENTO: F1				FRATURAMENTO: F1			
Nº DE FAMILIAS DE JUNTAS: 2				Nº DE FAMILIAS DE JUNTAS: 2			
CANGA DETRÍTICA: ( ) % matriz / ( ) % bl / frag				matriz: ( ) dura ( ) terrosa: ( ) Tam. Blocos:			
CONDIÇÃO HIDROLÓGICA							
SECO		UMIDO		GOTAMENTO		ESCOMENTO	
DESCONTINUIDADES							
ESTRUT.	ATTITUDE	PERS. (m)	RU	AP	PR	ESPC. (cm)	AB (mm)
S <sub>1</sub>	285/15	2	RU/285	3	RU/285	2	500
F <sub>1</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>2</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>3</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>4</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>5</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>6</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>7</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>8</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>9</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
F <sub>10</sub>	15/15	2	RU/15	3	RU/15	2	500
PT. FOT		ALVO		NUMERO MAQ		OBS	
FOTOS		FOTOS		PT. FOT		ALVO	
NUMERO MAQ		OBS		PT. FOT		ALVO	
NUMERO MAQ		OBS		PT. FOT		ALVO	
FEIÇÕES MORFOLÓGICAS / FRAGILIDADE							
<input checked="" type="checkbox"/> TETO		<input checked="" type="checkbox"/> PAREDE		<input checked="" type="checkbox"/> ENTRADA		<input checked="" type="checkbox"/> CONCLITO	
<input checked="" type="checkbox"/> PISO		<input checked="" type="checkbox"/> PONTÃO ESTRUT		<input checked="" type="checkbox"/> PAREDE DELGADA		<input checked="" type="checkbox"/> PENDENTE	
<input checked="" type="checkbox"/> PILAR		<input checked="" type="checkbox"/> PILAR		<input checked="" type="checkbox"/> PILAR		<input checked="" type="checkbox"/> PILAR	
<input checked="" type="checkbox"/> CLARABOIA		<input checked="" type="checkbox"/> CLARABOIA		<input checked="" type="checkbox"/> CLARABOIA		<input checked="" type="checkbox"/> CLARABOIA	
<input checked="" type="checkbox"/> ESPELEOTEMAS		<input checked="" type="checkbox"/> ESPELEOTEMAS		<input checked="" type="checkbox"/> ESPELEOTEMAS		<input checked="" type="checkbox"/> ESPELEOTEMAS	
PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO							
<input checked="" type="checkbox"/> ABATIMENTO		<input checked="" type="checkbox"/> QUESIDA		<input checked="" type="checkbox"/> RUPTURA PLANAR		<input checked="" type="checkbox"/> RUPTURA CUNHA	
<input checked="" type="checkbox"/> COLAPSO		<input checked="" type="checkbox"/> SUBSIDENCIA		<input checked="" type="checkbox"/> DESAGREGAÇÃO		<input checked="" type="checkbox"/> CARREAMENTO	
<input checked="" type="checkbox"/> RUPTURA CIRCULAR		<input checked="" type="checkbox"/> RUPTURA CIRCULAR		<input checked="" type="checkbox"/> RUPTURA CIRCULAR		<input checked="" type="checkbox"/> RUPTURA CIRCULAR	
<input checked="" type="checkbox"/> ASSOREAMENTO		<input checked="" type="checkbox"/> ASSOREAMENTO		<input checked="" type="checkbox"/> ASSOREAMENTO		<input checked="" type="checkbox"/> ASSOREAMENTO	
2 - POTENCIAL PARA RUPTURA / INSTABILIZAÇÃO							
POTENCIAL PARA QUEDA POR ROLAMENTO DO BLOCO		POTENCIAL PARA QUEDA POR ROLAMENTO DO BLOCO		POTENCIAL PARA QUEDA POR ROLAMENTO DO BLOCO		POTENCIAL PARA QUEDA POR ROLAMENTO DO BLOCO	
POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE		POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE		POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE		POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE	
POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE		POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE		POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE		POTENCIAL PARA QUEDA DE BLOCO NA PAREDE DA CAVIDADE	
OBS							

Por se tratar de um levantamento amostral é importante ressaltar que o estudo teve que ser pautado no estabelecimento de pontos de controle (denominados P01, P02, etc). Estes pontos, foram plotados em planta baixa, definidos por meio da observação do técnico responsável, que buscou descrever na ficha de campo aspectos predominantemente qualitativos, priorizando estruturas relevantes e frentes de alteração mais acentuadas no substrato rochoso (Figura 2).



**Figura 2** - Aferição da atitude do bandamento da FFB visualizado na porção inferior da parede da cavidade

Como ferramentas auxiliares, foram utilizados: receptor GPS; máquina fotográfica; bússola Brunton GEO 5010; fitas de marcação de alta durabilidade; trena (analógica ou a laser); e escalas fotográficas.

Optando pela adoção do princípio da precaução, o mapeamento realizado considerou intervenções de mínimo impacto sobre as cavernas. Assim, parâmetros geomecânicos como resistência e alteração, foram tomados segundo BROWN/ISRM (1981), uma vez que não foram realizados testes com a aplicação de golpes de martelo no interior das cavidades (Figura 3).



**Figura 3** - Avaliação qualitativa do maciço rochoso para preenchimento de ficha de caracterização.

Foi importante a realização de uma avaliação prévia nos materiais observados no maciço exterior a caverna. Essa estimativa foi útil para subsidiar a qualificação geral e hierarquização da qualidade dos maciços.

Cada ponto mapeado, bem como as feições geoestruturais identificadas foram lançadas no mapa geoestrutural-geotécnico da cavidade durante o tratamento dos dados coletados.

### 3.3. Tratamento dos dados

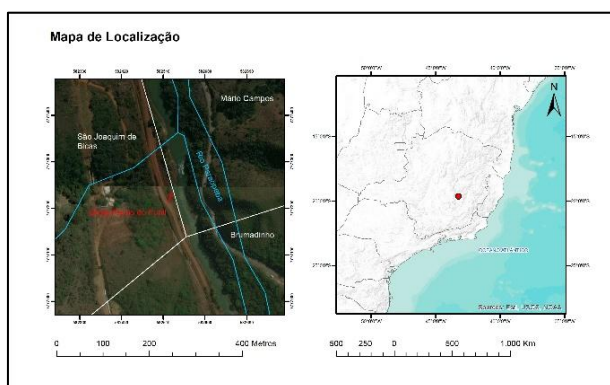
Primeiramente, os dados coletados em campo e anotados na ficha de mapeamento geoestrutural-geotécnico foram digitalizados, utilizando-se um software de planilha eletrônica, tal como o Microsoft Excel®.

Posteriormente, iniciou-se a elaboração do mapa geológico da caverna por meio da operação de ferramentas CAD. Após a tabulação dos dados geoestruturais, foi possível interpretá-los a partir de diagramas de roseta e estereogramas, elaborados com o auxílio do software *OpenStereo*® e do software *Dips*®. A construção destes gráficos

permitiu avaliar com mais clareza as estruturas mais persistentes e uma eventual relação destas com a morfologia da cavidade.

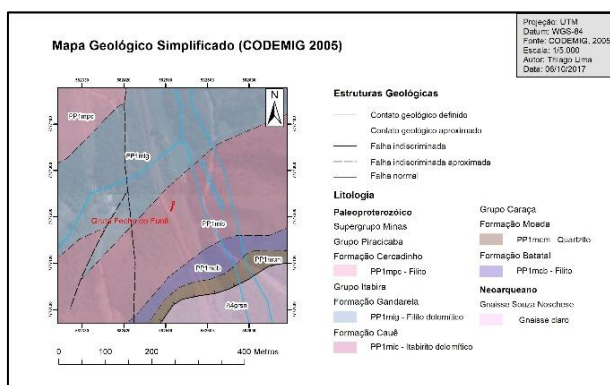
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Gruta Fecho do Funil, como citado no item 2, está localizada no município de São Joaquim de Bicas, região central do Estado de Minas Gerais, na margem direita do rio Paraopeba, em uma ruptura de relevo irregular, descontínua e paralela a inclinação da vertente local. (Figura 4).



**Figura 4** - Localização da Gruta Fecho do Funil no contexto do estado de Minas Gerais

Quanto à geologia local, a cavidade se desenvolve sob os Itabiritos dolomíticos pertencentes ao Supergrupo Minas, Grupo Itabira, Formação Cauê, de idade paleoproterozóica (CODEMIG, 2005) (Figura 5).



**Figura 5** - Mapa geológico simplificado da região onde se insere a Gruta Fecho do Funil (adaptado de CODEMIG, 2005)

As informações espeleométricas da Gruta são apresentadas na tabela a seguir (Quadro 1), correlacionadas a média espeleométrica regional da Unidade Espeleológica do Quadrilátero Ferrífero.

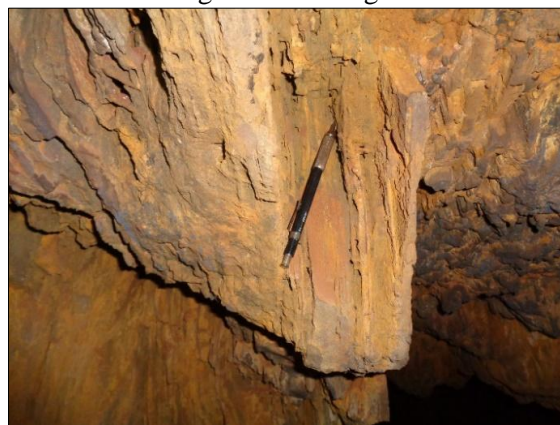
**Quadro 1** - Dimensões da Gruta do Funil diante da média de espeleometria regional (n=177) para cavernas hospedadas em litotipos ferríferos (CARSTE, 2011)

CORRELAÇÃO ESPELEOMÉTRICA		
Categoria	Média Regional (QF)	Gruta Fecho do Funil
PH (m)	29,9	21,2
Desnível (m)	2,9	2,4
Área (m <sup>2</sup> )	72,90	41,5
Volume estimado (m <sup>3</sup> )	89,30	102,5

Para a realização do mapeamento geoestrutural-geotécnico da cavidade e de sua respectiva caracterização geomecânica, foram definidos um total de 4 pontos descritivos, cuja distribuição pode ser observada no mapa geoestrutural-geotécnico que será apresentado no item “resultados” deste trabalho.

#### 4.1. Caracterização litológica

Foram descritos na Gruta Fecho do Funil dois litotipos distintos, sendo o primeiro predominante: Itabirito e canga detrítica. O Itabirito pertencente a Formação Cauê, é caracterizado por apresentar a típica intercalação entre lâminas hematíticas de espessura milimétrica a centimétrica, de coloração marrom-avermelhada e bandas silicosas, de mesmas dimensões e frequentemente friável (Figura 6). A foliação da rocha encaixante apresenta-se subverticalizada em toda a cavidade. No terço final da cavidade, nas paredes e no teto, observou-se a rocha moderadamente alterada (A3), e pouco resistente (R2+), diferentemente do setor de entrada da Gruta Fecho do Funil, onde identificou-se um acréscimo na resistência (R3) e um decréscimo na alteração (A2), caracterizando assim um setor mais estável em termos geotécnicos e geomecânicos.



**Figura 6** - Aspecto composicional do Itabirito

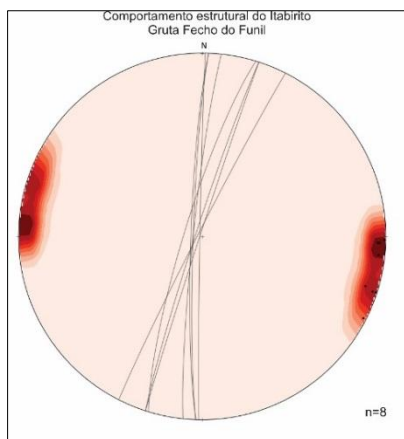
No teto, em meio a porção deslocadas da foliação composicional do Itabirito, observou-se um conglomerado, similar a uma canga detrítica, cuja gênese aparentemente está associada a um evento de deposição sedimentar promovida pela oscilação do nível freático do rio Paraopeba. Este litotipo é constituído por clastos subarredondados a arredondados, mal selecionados, compostos basicamente por hematita, quartzo e filito, de tamanho seixo a calhau, cimentados por matriz limonítica (Figura 7). Apresenta na porção distal da cavidade moderada alteração e resistência (A3/R3), oscilando para uma menos alteração (A2) e maior resistência (A4) nas proximidades da entrada da cavidade, onde o litotipo apresenta um acréscimo granulométrico (clastos de tamanho calhau e matacão).



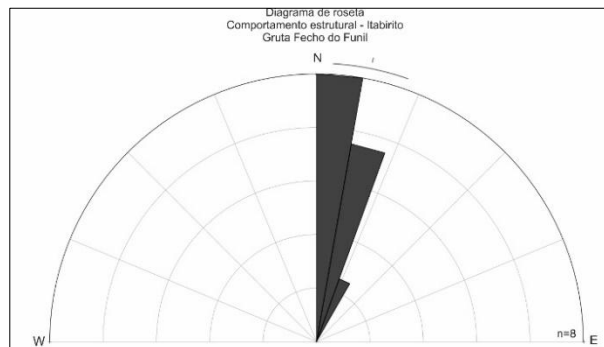
**Figura 7** - Aspecto textural do conglomerado observado no teto da cavidade

#### 4.2. Controle estrutural

A foliação exibe direção geral NNE-SSW com mergulho subvertical, em média de 86° (Figura 8 e Figura 9).

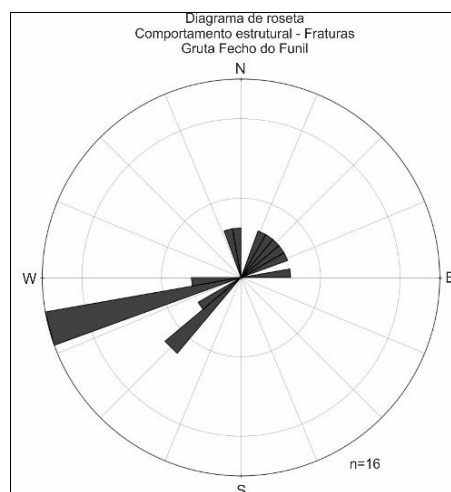


**Figura 8** - Estereograma apresentando o comportamento estrutural do Itabirito observado na cavidade



**Figura 9** - Diagrama de rosetas apresentando o comportamento estrutural do Itabirito observado na cavidade

Associadas ao Itabirito têm-se 5 famílias de fraturas identificadas, em geral de persistência centimétrica a métrica, planares/lisas e onduladas/rugosas, ocasionalmente preenchidas por matriz terrígena de coloração amarelada ou marrom-amarelada. Observa-se elevada dispersão de medidas, com predomínio da direção WSW-ENE, concordante com estruturas em escala regional, como apresenta o diagrama de rosetas na figura 10.



**Figura 10** - Direção preferencial das fraturas observadas na Gruta Fecho do Funil

Devido à restrição de ocorrência dos conglomerados, e de sua natureza genética (transporte), este litotipo não possui estruturas tectônicas. Juntas de contato litológico, ocasionadas pela diferença textural entre os litotipos podem ser observadas localmente, onduladas e rugosas.

#### 4.3. Particularidades hidrológicas

A dinâmica hidrológica da cavidade é intermitente, e sua atividade está relacionada com o processo de percolação das águas pluviais através das estruturas que compõe a porosidade secundária

da rocha. A atmosfera da cavidade apresenta maior umidade em trechos mais confinados, onde a rocha apresenta um maior grau de alteração e uma menor resistência mecânica. Processos de gotejamento podem ocorrer em toda a extensão cavidade durante eventos pluviais, entretanto, processos exudacionais e de condensação estão restritos ao terço final.

#### 4.4. Zonas de fragilidade

A cavidade possui pequeno porte e é constituída por basicamente um salão, conectado a um conduto retilíneo que prossegue no rumo SW. Seixos, calhaus e matacões abatidos no piso expõe a principal fragilidade da cavidade, que estão relacionada as áreas onde as discontinuidades são mais espaçadas e persistentes no maciço. No Itabirito os blocos são em geral decimétricos, formados pela intersecção de fraturas com o plano da foliação, além de desagregação/desplacamentos ocasionados pela alteração da rocha e seu elevado mergulho (subvertical). Os conglomerados são muito localizados, e ocorrem em núcleos individualizados no teto. O quadro 2 apresenta um resumo das informações geoestruturais, geotécnicas e geomecânicas coletadas durante a execução do levantamento.

**Quadro 2** - Resumo das informações geoestruturais, geotécnicas e geomecânicas da Gruta Fecho do Funil

DADOS GERAIS	
Município	São Joaquim de Bicas
Cavidade	Gruta Fecho do Funil
PH (m)	21,2
Pontos de mapeamento	4
DADOS LITOESTRUTURAIS	
Litotipo 1	
Litologia	Itabirito
Grau de alteração	A2/A3
Resistência	R2+/R3
Foliação (Atitude)	28/SV, 1/SV; 27/SV, 2/SV
Fraturas (Atitude)	228/11SE; 74/65NW; 245/38SE; 80/48NW; 167/67NE
Litotipo 2	
Litologia	Conglomerado
Grau de alteração	A2/A3

Resistência	R3/R4
-------------	-------

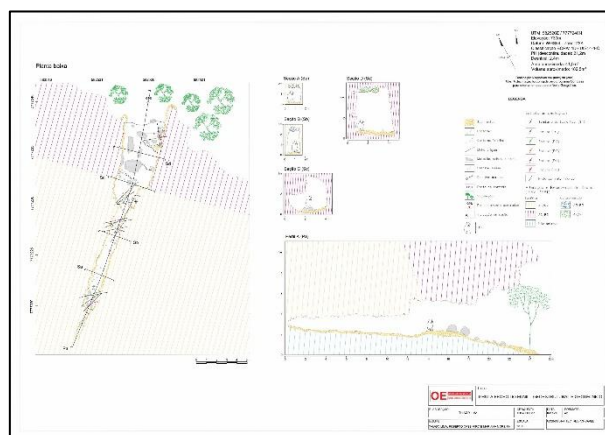
#### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que o esforço amostral direcionado ao mapeamento geoestrutural-geotécnico e a caracterização geomecânica da Gruta Fecho do Funil foi satisfatório, permitindo a elaboração de um mapa geoestrutural-geotécnico (Figura 11) que irá subsidiar estudos futuros na caverna e em seu entorno.

Foi mapeada uma série de descontinuidades (8 medidas de atitude da rocha e 16 atitudes de fraturas) e descritas zonas de maior alteração do maciço rochoso, que representam porções de maior fragilidade frente a eventos de natureza sísmológica, sejam eles ocasionados por atividades antrópicas (tráfego de veículos pesados, operação de ferrovia regional ou até mesmo visitação ocasional), ou por processos de evolução natural da cavidade (espeleogênese).

Localmente, observa-se associada ao Itabirito, porções mais fraturadas, mais alteradas, menos resistentes e em geral mais úmidas, indicando um processo de desagregação/erosão a partir do teto e/ou paredes. Esses abatimentos estão associados principalmente ao desconfinamento progressivo de estruturas como planos de fratura e da foliação da rocha.

É possível observar também, o controle estrutural exercido pela atitude do Itabirito na morfologia da cavidade, de padrão retilíneo. O alargamento do conduto que constitui a caverna também é controlado pela intersecção das famílias de fraturas aferidas.



**Figura 11** - Mapa geoestrutural-geotécnico da Gruta Fecho do Funil

O método proposto mostrou-se eficaz e aplicável frente ao objeto de estudo, apresentando como produto final um mapa contendo informações

geoestruturais e geotécnicas que, quando cruzadas com a caracterização geomecânica registrada em ficha, são fundamentais para o entendimento dos processos físicos que envolvem a evolução da caverna, permitindo a construção de um método de monitoramento que contemple as alterações físicas ocasionadas na Gruta Fecho do Funil frente às intervenções humanas e naturais. Estes dados também são importantes na preposição de um zoneamento RMR (*Rock Mass Rating*), adaptado de BIENIAWSKI (1989), subsidiando assim um melhor entendimento quanto ao comportamento do

maciço rochoso que hospeda a cavidade frente as interferências supracitadas.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao Srs. Wilfred Brandt e Emanuel Brandt pelas revisões propostas e pela constante parceria profissional. A Associação Civil Observatório Espeleológico, nas figuras do Sr. Roberto Cassimiro e da Sra. Mariana Moreira, pelo apoio em campo e posteriores discussões.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Ramon Nunes. Levantamento de parâmetros geomecânicos de uma cavidade natural subterrânea utilizando tecnologias de laser scanner 3D. Dissertação de Mestrado. UFOP, 2016.
- AULER, A. S., *et al.* *Silica and iron mobilization, cave development and landscape Evolution in iron formations in Brazil*. Elsevier/*Geomorphology* 398, 2021. 22p.
- AULER A. S. & PILÓ, L. B. *Introdução às cavernas em minério de ferro e canga*. *O Carste*, 2005.v.17, n.3, p.70-72.
- BIENIAWSKI, Z.T., *Engineering rock mass classifications*. New York Wiley, 1989.
- BRASIL. Atos do Poder Executivo. Decreto nº 10.935, de 12 de janeiro de 2022: Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/decreto-n-10.935-de-12-de-janeiro-de-2022-373591582>. Acesso em: 17 fev. 2022.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa nº 02 de 30 de agosto de 2017: Define metodologia para classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas (regulamenta o art. 5º do Decreto nº 99.556/1990). Brasília, 2017. Disponível em: [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19272154/do1-2017-09-01-instrucao-normativa-n-2-de-30-de-agosto-de-2017-19272042](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19272154/do1-2017-09-01-instrucao-normativa-n-2-de-30-de-agosto-de-2017-19272042). Acesso em: 10 set. 2020.
- BROWN, Edwin Thomas. *Rock characterization, testing & monitoring: ISRM suggested methods*. 1981.
- CARSTE CONSULTORES ASSOCIADOS. Diagnóstico e Análise de Relevância – Espeleologia – Projeto Aumento de Reserva, Samarco S.A. Relatório Técnico. 2011.
- DUTRA, Georgete. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. In: **Congresso Brasileiro de Espeleologia**. 2013. p. 415-426.
- MAURITY & KOTSCHOUBEY. *Evolução recente da cobertura de alteração no Platô NI – Serra dos carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas*. *O Carste*, 2005.v.17, n.3, p.78-91
- PALMER, Arthur N. **Cave Geology**. Dayton: Cave books, 2007.
- PILÓ, L. B & AULER A. S. *Cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG*. *O Carste*, 2005.v.17, n.3, p.92-105
- PILÓ, L. B & AULER A. S. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: **Congresso Brasileiro de Espeleologia**. 2009. p. 181-186.





SIMMONS, G.C. 1963. Canga caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. The *National Speleological Society Bulletin* 25: 66-72.

SOFTWARE OpenStereo obtido em: <http://www.igc.usp.br/index.php?id=395>.

VALENTIM, Raul Fontes. Classificação geomecânica de cavidade natural subterrânea BRU\_0005, município de São Gonçalo do Rio Abaixo - MG. Dissertação de Mestrado. UFOP, 2016.