

Avaliação da segurança estrutural de cavidade cárstica de máxima relevância, visando geoconservação, por meio métodos geofísicos e geotécnicos

Em etapa prévia às atividades de implantação de rodovias localizadas em regiões com potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas é necessário realizar a prospecção, identificação e caracterização do grau de relevância de cada cavidade encontrada a distância de até 250 metros para cada lado da rodovia projetada, de modo a avaliar os possíveis riscos de impactos ao patrimônio espeleológico e sua respectiva área de influência durante a instalação e operação do empreendimento. Neste estudo utilizou-se a combinação de métodos investigativos geofísicos, em segmento não pavimentado da rodovia BR-135/BA, no município de São Desidério, no oeste baiano. A região é considerada de alto potencial espeleológico devido ao contexto geológico cárstico. A interpretação dos resultados combinados dos métodos geofísicos permitiu localizar a posição, as características geométricas, as dimensões e a profundidade das cavidades em relação a superfície, possibilitando a elaboração de mapas e perfis da subsuperfície sob o eixo da rodovia projetada. Combinaram-se os resultados dos métodos geofísicos de prospecção com análises geotécnicas preliminares, incluindo simulações de uso de rodovia. Os resultados, considerados como de caracterização, permitiram identificar a distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas ao maciço rochoso, para orientação de estudos geológicos e geotécnicos de detalhe seguintes que visem estimar a segurança estrutural das cavidades e reduzir as probabilidades de ocorrência dos modos de ruptura das rochas. Os resultados preliminares indicam que é possível determinar com certa segurança as distâncias para a proteção estrutural de cavidades.

Palavras-chave: Área de proteção estrutural; Patrimônio geológico; Cavernas.

Evaluation of the structural safety of the most relevant karst cavity, aiming at geoconservation, through geophysical and geotechnical methods

In a stage prior to the implementation of highways located in regions with potential for the occurrence of natural underground cavities, it is necessary to prospect, identify and characterize the degree of relevance of each cavity found at a distance of up to 250 meters for each side of the projected highway, in order to evaluate the possible risks of impacts to the speleological patrimony and its respective area of influence during the installation and operation of the enterprise. This study used a combination of geophysical investigative methods, in an unpaved segment of the BR135 highway, São Desidério, Bahia. The region is considered to have high speleological potential due to the karst geological context. The interpretation of the combined results of the geophysical methods allowed to locate the position, the geometric characteristics, the dimensions and the depth of the cavities in relation to the surface, allowing the elaboration of maps and profiles of the subsurface under the axis of the projected highway. The results of geophysical prospecting methods were combined with preliminary geotechnical analyzes, including simulations of road use. The results, considered as characterization, allowed to identify the distribution of pressures caused by overloads applied to the rock mass, to guide the following geological and geotechnical studies of detail that aim to estimate the structural safety of the cavities and reduce the probabilities of the rupture modes of the rocks. The preliminary results indicate that it is possible to determine with certainty the distances for the structural protection of cavities.


Keywords: Structural protection area; Geological heritage; Caves.


Topic: **Tecnologia, Modelagem e Geoprocessamento**


Reviewed anonymously in the process of blind peer.


Received: **02/04/2021**

Approved: **29/04/2021**

Durval Nascimento Neto 
Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4104867024823908>
<http://orcid.org/0000-0002-1988-5430>
durvalambiental@gmail.com

Cristhyano Cavali da Luz 
Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2689181976828005>
<http://orcid.org/0000-0002-2688-3863>
criscluz@hotmail.com

Luiz Alberto Fernandes 
Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4959270301217109>
<http://orcid.org/0000-0002-0718-5154>
lufernandes@ufpr.com

Eduardo Ratton 
Universidade Federal do Paraná, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/1582314027487253>
<http://orcid.org/0000-0002-1309-0063>
ratton.eduardo@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0055

Referencing this:

NASCIMENTO NETO, D.; LUZ, C. C.; FERNANDES, L. A.; RATTON, E..
Avaliação da segurança estrutural de cavidade cárstica de máxima relevância, visando geoconservação, por meio métodos geofísicos e geotécnicos. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.4, p.712-736, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0055>

INTRODUÇÃO

Entende-se por cavidade natural subterrânea todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde eles se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante (BRASIL, 2008).

Os sistemas cársticos e as cavernas têm peculiaridades que as tornam mais vulneráveis às interferências humanas mal planejadas, que podem gerar impactos adversos e degradação do patrimônio espeleológico. Neste contexto, antes da construção de rodovias em áreas onde se sabe da existência de cavidades naturais, devem ser avaliados os riscos de impactos negativos sobre este geopatrimônio protegido pela legislação ambiental.

Neste contexto, a legislação brasileira obriga a avaliação dos possíveis riscos de impactos sobre o patrimônio espeleológico, durante a construção e a operação de empreendimentos lineares. As autorizações ou licenças ambientais, na hipótese de cavidade natural subterrânea relevante ou de sua área de influência, dependerão no processo de licenciamento, de anuência prévia do órgão ambiental.

Conforme CONAMA (2004), a área de influência sobre o patrimônio espeleológico será definida pelo órgão ambiental competente que poderá, para tanto, exigir estudos específicos, às expensas do empreendedor. Entretanto, até que se efetivem estes estudos específicos, a área de influência das cavidades naturais subterrâneas será a projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de 250 metros, em forma de poligonal convexa.

A cavidade será classificada de acordo com seu grau de relevância em máximo, alto, médio ou baixo, determinado pela análise de atributos ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob enfoque regional e local. Por sua vez, a cavidade natural subterrânea determinada com grau de relevância máximo e sua área de influência, não podem ser objeto de impactos negativos irreversíveis, sendo que sua utilização deve fazer-se somente dentro de condições que assegurem sua integridade física e a manutenção do seu equilíbrio ecológico (BRASIL, 2008).

No meio técnico, atualmente ainda se discute quanto a um método objetivo para determinar a segurança estrutural para a preservação das cavidades impactadas pela construção e operação de empreendimentos lineares, bem como sobre a validade do estabelecimento de uma distância padrão que assegure essa segurança. Partiu-se, então, da hipótese de que seria possível determinar uma sequência metodológica por meio da combinação de métodos geofísicos e geotécnicos para avaliar a segurança estrutural das cavidades desenvolvidas em rochas carbonáticas, buscando prevenir impactos ocasionados pela implantação e operação de uma rodovia, particularmente em cavidades de relevância máxima.

REVISÃO TEÓRICA

Área de estudo

A área de estudo coincide com a diretriz do traçado previsto para a rodovia federal BR-135/BA, entre

os km 207 e 226, no município de São Desidério, oeste da Bahia (Figura 1). O seu desenvolvimento ocorre sobre um relevo composto por rochas carbonáticas do Grupo Bambuí (Neoproterozoico), susceptíveis à formação de cavernas, sobrepostos por arenitos do Grupo Urucuaia (Cretáceo). Esta rodovia é um importante eixo de ligação para o transporte de cargas e passageiros entre os estados do Piauí e Minas Gerais.

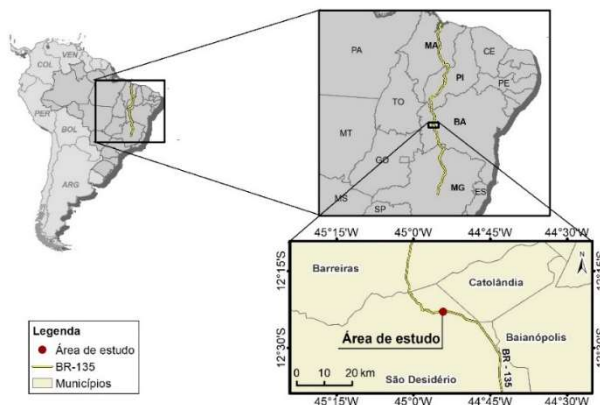


Figura 1: Localização da área de estudo.

A área está situada no noroeste da província geológica denominada Cráton São Francisco. O substrato regional é constituído por rochas metacálcárias neoproterozoicas da Formação São Desidério, do Grupo Bambuí, subjacentes a arenitos cretáceos do Grupo Urucuaia (Figura 2). As rochas carbonáticas possuem aptidão ao desenvolvimento de cavidades subterrâneas, pela dissolução parcial ou total de seus componentes minerais. Isso caracteriza a região como de alto potencial espeleológico pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio, 2014).

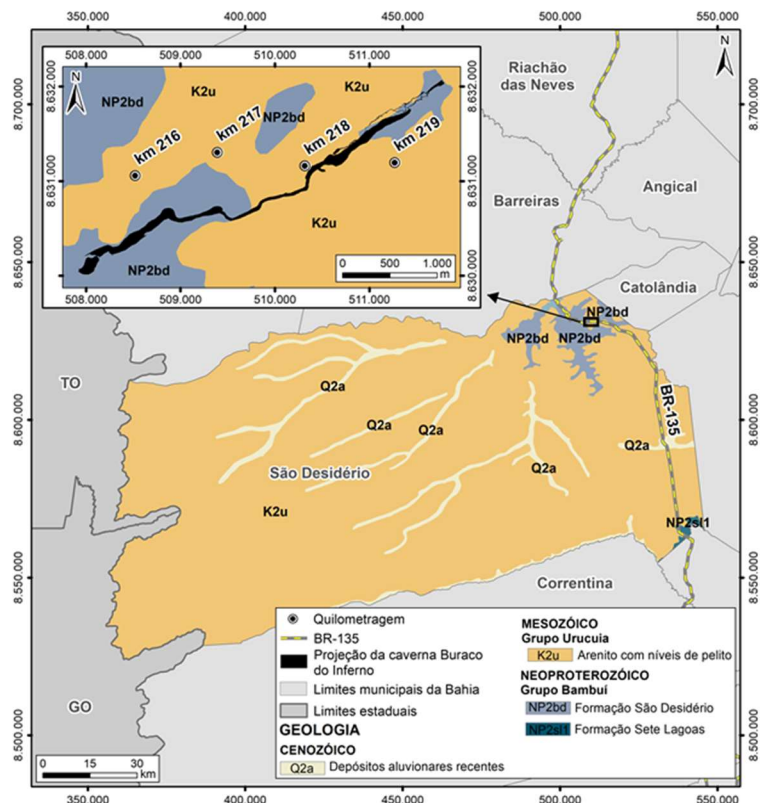


Figura 2: Contexto geológico do segmento rodoviário da BR-135/BA, sobre rochas de metacalcários do Grupo Bambuí sobrepostos por arenitos do Grupo Urucuaia. Fonte: Adaptado de CPRM (2004).

No segmento entre os km 207 e 212, atualmente o transporte de veículos ocorre precariamente sobre segmento em leito natural (Figura 3A) e entre os km 212 e 226, a rodovia se desenvolve sobre segmento com a implantação iniciada, mas paralisada, por questões ambientais (Figura 3B).



Figura 3: Área de estudo, segmento em leito natural (A) e segmento com a implantação iniciada e paralisada (B).

MATERIAIS E MÉTODOS

As informações utilizadas neste trabalho foram obtidas em etapas distintas: (1) pesquisa bibliográfica para obtenção de dados e estudos realizados na região cárstica de interesse; (2) campanhas para aquisição de dados geofísicos de polarização induzida e resistividade; (3) campanha para coleta de dados bidimensionais de alta resolução da superfície rasa do terreno em estudo, com georadar (*ground penetrating radar*); (4) campanha de levantamentos microgravimétricos, de fontes rasas, com objetivo de identificar feições cársticas em um ambiente dominado por calcários com cobertura de arenito; (5) campanha de monitoramento das vibrações induzidas, com método sísmico; e (6) campanha geológico-geotécnica, com a obtenção de corpos de prova com amostras de rochas locais para a confecção de análise petrográfica, ensaio de compressão uniaxial e de módulo de elasticidade estático.

Delimitação da área de estudo

Para delimitar a área de estudo, de modo a definir a possível projeção em superfície da caverna, considerando a prerrogativa da mesma ser classificada de grau de relevância máxima, foram utilizados dados obtidos em estudos anteriores, a saber: levantamentos aéreos realizados com aeronaves remotamente pilotadas e processados nos trabalhos de Nascimento Neto et al. (2017), Zonta et al. (2017) e Luz et al. (2017); bases cartográficas do IBGE, mapas geológicos (CPRM, 2004; PASSO et al., 2010), entrevistas com moradores e integrantes de grupos de espeleologia locais, informações disponíveis na Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) e no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV).

Utilização de métodos geofísicos para identificação de vazios (cavidades)

Após a delimitação da área de estudo, considerando que uma cavidade natural subterrânea identificada com grau de relevância máximo e sua área de influência não podem ser objeto de impactos negativos irreversíveis, optou-se por realizar levantamentos geofísicos, utilizando métodos não destrutivos, para identificação das feições e estruturas do substrato, incluindo vazios subterrâneos criados pela

dissolução das rochas carbonáticas.

Combinaram-se, inicialmente, três métodos investigativos geofísicos não destrutivos. O primeiro foi a perfilagem com radar de penetração no solo ou georadar (GPR – *ground penetrating radar*), que permitiu obter seções de subsuperfície por meio da indução de ondas eletromagnéticas de altas frequências. O segundo método, gravimétrico, permitiu discriminar diferentes estratos do subsolo em perfis, com base na variação de densidades das unidades rochosas, possibilitando a localização de possíveis vazios, identificados como cavidades. O terceiro, de resistividade elétrica e polarização induzida, permitiu discriminar estratos distintos com base em sua constituição, sendo os condutivos, associados com os metacalcários, e os não condutíveis, como sendo as possíveis cavidades.

O imageamento por GPR é um método geofísico não destrutivo, de alta resolução, que permite obter uma imagem de subsuperfície rasa do substrato, por reflexões de ondas eletromagnéticas de altas frequências, oscilando entre 10 MHz a 3,5 GHz, similar ao princípio das técnicas de reflexão de sísmica e sonar (PORSANI, 1999; ANNAN, 2002).

O método consiste na transmissão de ondas eletromagnéticas repetidamente radiadas para o interior do terreno por uma antena transmissora situada na superfície. Existindo uma mudança em pelo menos uma das propriedades físicas (condutividade elétrica, constante dielétrica e permeabilidade magnética) dos materiais da subsuperfície essas ondas refletem. Então, parte do sinal das ondas, que sofreram reflexão, é captada por outra antena, também na superfície do terreno, denominada de receptora (Figura 4). Esta energia refletida é medida e registrada em função do tempo de propagação da onda, amplificada, digitalizada e armazenada em uma unidade de controle, e depois processadas em softwares específicos, gerando imagens em alta resolução (DAVIS et al., 1989).

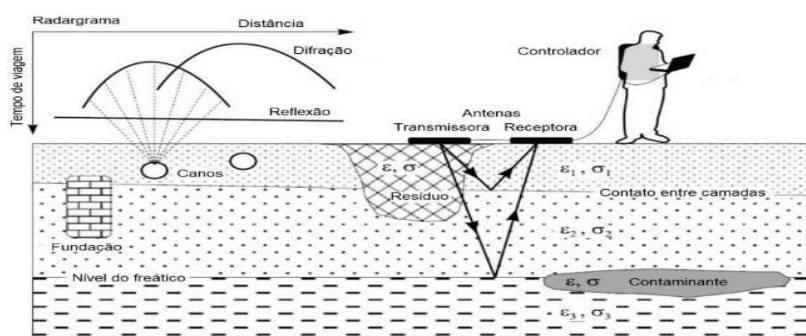


Figura 4: Princípios do funcionamento do método GPR e suas aplicações. Fonte: Adaptado de Annan (2002).

A aquisição dos dados deste estudo foi realizada em perfis entre os km 209 e 226 da BR-135/BA, totalizando 20.070 m de perfilagem de dados bidimensionais de alta resolução, distribuídos em 15 perfis, sendo 13 ao longo da diretriz do traçado atual, ainda não pavimentado da rodovia, e dois em estradas vicinais transversais não pavimentadas. Foi utilizado o equipamento SIR3000, marca Geophysical Survey Systems (Figura 5), e acoplado a uma antena blindada de 270 MHz, utilizando a técnica common offset. Os parâmetros de campo utilizados foram: espaçamento entre os traços de 1,0 cm, 512 e 1024 amostras por traço, intervalo de amostragem temporal de 0,52 ns e 0,20 ns (para as respectivas amostras por traços) e janela temporal de

270 e 200 ns.

A velocidade média de propagação da onda eletromagnética foi determinada pelo método de ajuste hiperbólico, tendo obtido a velocidade de 0,14 m/ns, a qual foi utilizada na conversão dos registros de tempo para profundidade real de todos os dados. Os dados foram processados no *software ReflexW, versão 7.0*. O processamento de dados do GPR incide no conjunto de procedimentos de tratamentos de sinais aplicados aos dados digitalizados, com o intuito de torná-los adequados à interpretação visual, produzindo seções mais nítidas e com melhor resolução temporal.



Figura 5: GPR: A) equipamento utilizado; B) caminhamento para aquisição de dados em campo.

A gravimetria é um método geofísico baseado na diferença de densidade entre os diversos materiais que compõem a crosta terrestre. Nesta pesquisa, optou-se por um levantamento microgravimétrico de fontes rasas com objetivo de identificar feições cársticas em um ambiente dominado por calcários com cobertura de arenito, como possíveis cavidades, preenchidas ou não por sedimentos e água, por meio do contraste de densidade entre os meios.

O levantamento gravimétrico foi executado em perfis paralelos com extensão variada, espaçados de 25 metros, em média, e densificados com espaçamento de 5 metros sobre as zonas de interesse, além de pontos de conexão entre as linhas, totalizando 2.519 estações (Figura 6). A base de referência utilizada para o transporte do valor da gravidade foi a base cujo código é 8094033 (RN2778T), pertencente à Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira e materializada por meio de uma chapa fixada no piso (Figura 7A), em Barreiras/BA.

Os dados foram adquiridos por um gravímetro relativo modelo CG-5 (Figura 7B), da fabricante *Scintrex Limited*, com resolução de 0,001 mGal, deriva menor que 0,02 mGal/dia. O *Autograv meter CG-5* faz leituras automaticamente, com base em um microprocessador, permitindo obter registros numa faixa de 7000 mGals, resolução 0,005 mGal, deriva de 0,02 mGal/dia. O tempo de tomada dos registros da gravidade foi de 120 segundos, sendo a leitura final representativa do valor médio das amostras acompanhado de seu respectivo desvio padrão; Ao final deste processo, a leitura foi armazenada na memória do equipamento simultaneamente com outras variáveis: número da estação, desvio padrão da média, duração da leitura, correção de maré terrestre, número de amostras rejeitadas e as inclinações nos eixos X e Y. Para a calibração do instrumento, a operação no modo cíclico foi feita por um período superior a 12 horas, gerando um conjunto de dados que permitiram calcular um novo fator de correção automática de drift, o qual foi

atualizado no equipamento antes do início do levantamento. Foram verificados, periodicamente (antes, durante e após o levantamento dos dados), a compensação da temperatura de operação do equipamento e o erro de zero dos sensores de inclinação.

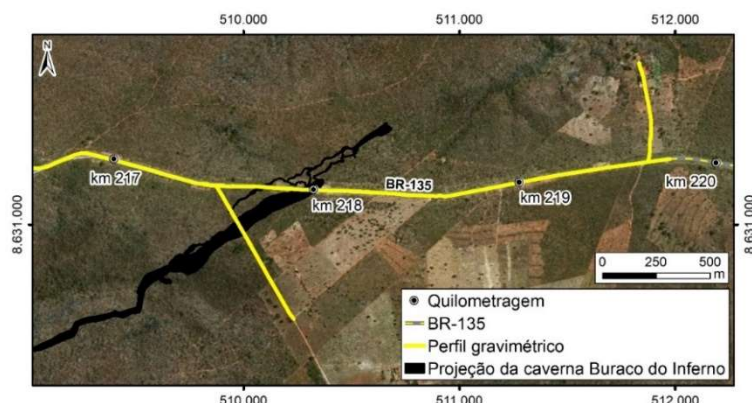


Figura 6: Localização dos perfis gravimétricos executados na área de estudo.



Figura 7: Identificação da base de referência para o valor de gravidade (A) e do gravímetro utilizado (B)

O processamento primário envolveu duas etapas: a correção de deriva instrumental estática e dinâmica (*Drift*) e a obtenção dos valores absolutos da gravidade (g) de cada estação. A correção de maré foi executada automaticamente no programa interno do gravímetro a partir das fórmulas de Longman (LONGMAN, 1959), com os parâmetros de entrada, latitude e longitude referidas ao *Datum* Córrego Alegre, e a diferença de fuso em relação a *Greenwich* inseridos antes da medida em campo, para cada estação.

As correções de derivas instrumentais foram calculadas com o auxílio de uma planilha do programa *Microsoft Office Excel*, sendo que a deriva estática ocorre por variações nos parâmetros internos do instrumento quando este se encontra parado, não executando leitura, durante o período de pernoite ou mais de uma hora diurna em período estático. Já a deriva dinâmica ocorre por variações nos parâmetros internos do instrumento, quando este se encontra em campo executando leituras (choques, variações de temperatura).

Após as três primeiras etapas, a diferença de leitura de cada estação em relação à base foi somada ao valor absoluto da gravidade desta base, obtendo-se assim, o valor absoluto da gravidade de cada estação levantada. Para os dados processados foram gerados mapas e perfis de anomalias de *Bouguer* e, quando fosse o caso, mapas e perfis residuais, derivadas verticais, etc. Os “*grids*” para elaboração dos mapas foram

gerados por interpolação numérica pelo método da curvatura mínima (BRIGGS, 1974) e triangulação.

As malhas (*grids*) foram interpoladas a um quarto do espaçamento médio de aquisição entre estações, respeitando a frequência de Nyquist. As anomalias de *Bouguer* refletem fontes situadas a várias profundidades, desde as mais rasas (altas frequências) até as mais profundas (baixas frequências), a separação regional-residual consistiu em extrair dos dados de *Bouguer* os valores regionais (fontes profundas), obtendo os dados que refletem fontes mais rasas, denominados de resíduos. Numericamente, a separação regional-residual foi realizada pelo método polinomial. Esta operação envolveu a subtração de uma superfície de tendência de graus um aos dados de *Bouguer*, resultando nas anomalias regionais e residuais.

Os ensaios geofísicos utilizando o método de resistividade elétrica e polarização induzida foram realizados ao longo de quatro caminhamentos lineares, totalizando 3.600 m de perfilagem sobre a diretriz do traçado da rodovia federal BR-135/BA, na área de cruzamento desta com o Sistema Cárstico do Rio João Rodrigues, que abriga a cavidade Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério (Figura 8).

Os dados de resistividade e polarização induzida foram adquiridos nas Linhas L1 a L4, conforme ilustrado na Figura 8, com o arranjo dipolo-dipolo ($AB=MN=50$ m) e seis níveis de profundidade de investigação. Os equipamentos utilizados na aquisição dos dados geofísicos para o estudo do comportamento da cargabilidade e da resistividade na área incluem um sistema completo de polarização induzida e resistividade, fabricados pela *Iris Instruments*, composto dos seguintes módulos: um transmissor de alta potência *VIP3000W*, alimentado por um gerador *Honda EM5000S* e um receptor multicanal e *espectral ELREPro* (Figura 9). O processamento básico dos dados geofísicos foi realizado no campo, em ambiente computacional, através dos softwares *Oasis MontajTM* e *Zonge 2D Inversion for InteractiveTM IP*, ambos da *Geosoft/Interpex*.

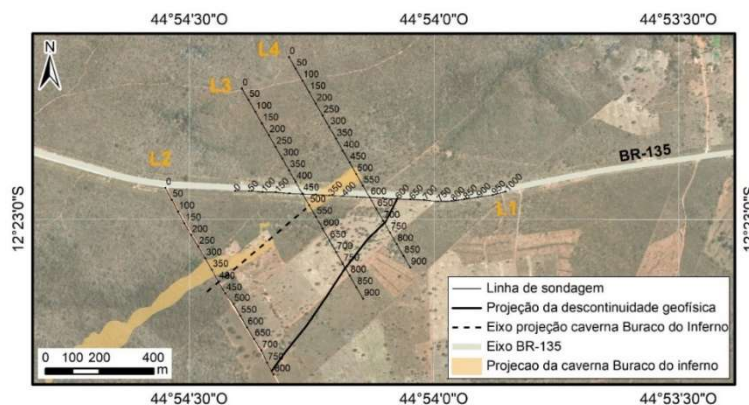


Figura 8: Mapa de localização dos locais de ensaios de resistividade elétrica e polarização induzida.

A execução dos dados referentes às vibrações provocadas pelo tráfego de veículos foi realizada, em 2017, entre os km 216 e 218 da rodovia federal BR-135/BA, por meio da instrumentação da caverna de grau de relevância máxima denominada de Buraco do Inferno e de pontos da superfície próximo ao eixo do leito natural não pavimentado da rodovia.

Para a preservação do patrimônio espeleológico, seja qual for o tipo rocha ou contexto geológico de

formação, deve-se entender a manutenção de valores de velocidade de vibração de partícula de pico (máximo valor instantâneo da velocidade de uma partícula em um ponto durante um determinado intervalo de tempo) abaixo dos valores que possam causar qualquer tipo de dano irreversível às estruturas cársticas que o compõem.



Figura 9: Equipamentos e instalações. A) sistema transmissor VIP3000W; b) transmissor e bobinas corrente; c) gerador EM5000S; d) sistema receptor de marca ELRECPRO.

A instalação dos sismógrafos seguiu os procedimentos técnicos usuais de fixação e nivelamento dos sensores. Respeitando-se as características do piso de cada local de instalação, os geofones foram fixados com gesso, nas paredes da caverna (Figura 10A) ou cravados no solo, ao lado da rodovia (Figura 10B).

O monitoramento de vibrações foi realizado em nove diferentes locais, sendo dois deles no interior da caverna, na interseção desta cavidade com a rodovia federal BR-135/BA, e os demais distribuídos quase perpendicularmente à BR-135/BA, entre os km 217 e 2018 (Figura 11).



Figura 10: A) geofone fixado na parede lateral da caverna b) geofone cravado no chão, ao lado da rodovia.

A passagem dos veículos foi registrada com horário, tipo e velocidade desenvolvida próxima do local de instalação dos sismógrafos. Os sismógrafos utilizados foram preparados para medições de maneira contínua, ou seja, configurados no modo “histograma”, e instalados a partir de um ponto localizado no leito natural não pavimentado da rodovia e a intervalos de 50 e 100 metros, a fim de avaliar o fator de atenuação

da onda vibratória, numa faixa de 250 metros da rodovia, em forma de poligonal convexa, área teoricamente considerada como acréscimo à projeção horizontal da cavidade natural subterrânea (CONAMA, 2004). No modo “histograma” os resultados são apresentados graficamente por barras indicando os picos de velocidade de partícula registrados a cada minuto.

Para realização da pesquisa, os veículos que circulam no leito natural não pavimentado da BR-135/BA, foram classificados em leves, médios e pesados (Figura 12). Foram registradas as intensidades dos picos das componentes ortogonais da velocidade de vibração de partícula; vertical (V1), longitudinal (L2) e transversal (T3) (Figura 13). A direção da componente longitudinal é definida pelos pontos de geração da vibração e de captação (sismógrafo), enquanto que a direção da componente transversal é definida como a direção perpendicular à direção longitudinal no plano horizontal e a direção da componente vertical é aquela perpendicular ao plano definido pelas demais.

O monitoramento foi efetuado utilizando sismógrafos da marca Geosonics®, modelo SSU 3000 EZ+, com geofone composto de três transdutores posicionados tri-ortogonalmente (L, T e V), capaz de realizar medições de pico de velocidade de vibração de partícula de até 130 mm/s, em sua versão padrão, e de até 250 mm/s ou 500 mm/s, em suas versões personalizadas, na faixa de frequência de 2 Hz a 250 Hz.

A caracterização petrográfica mesoscópica feita em campo foi complementada por análise microscópica de seção delgada por luz transmitida, com microscópio petrográfico *Carl Zeiss*, modelo *AXIO Imager.A2m*, com sistema de captura e tratamento de imagem *AxioVision*. O objetivo desta análise petrográfica preliminar foi caracterizar e classificar as rochas, para uso na avaliação do comportamento de tensões e deformações existentes no maciço rochoso.

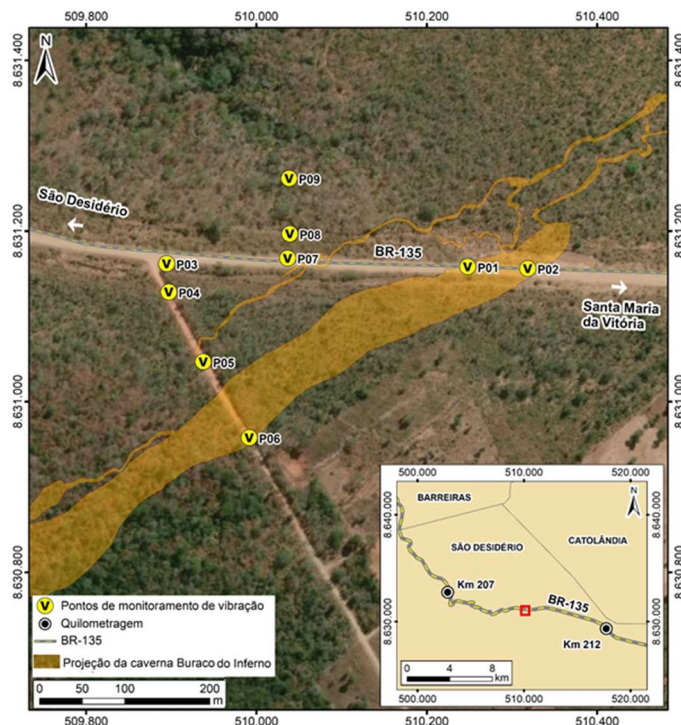


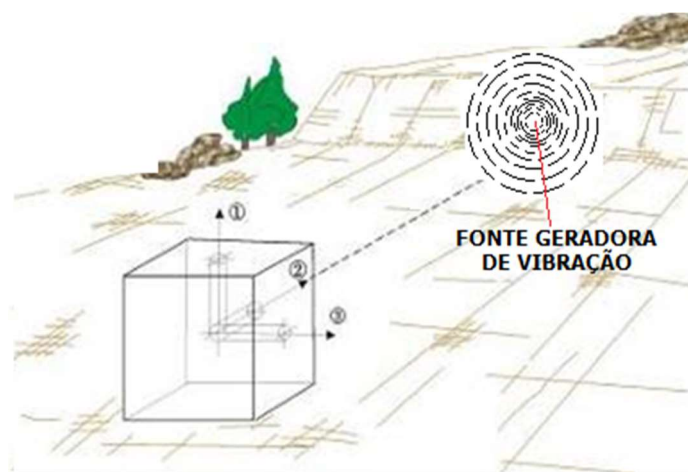
Figura 11: Locais de instalação dos receptores de sinais (geofones) utilizados no monitoramento de vibrações induzidos.

Em campanha de campo para caracterização geológico-geotécnica preliminar coletaram-se seis

corpos de prova de matacões de rocha, encontrados ao longo do traçado projetado da rodovia, os quais foram submetidos aos ensaios de compressão uniaxial, pela NBR 15.845, e de módulo de deformação estático e do diagrama de tensão – deformação da rocha matriz, conforme NBR 10.341. O objetivo destes ensaios foi obter valores para análise da deformabilidade do maciço entre o teto da cavidade e o leito natural da rodovia, que, de forma conservativa (simplificada), pode ser analisado como um meio elástico, e, assim, representada através do módulo de elasticidade (ou deformabilidade) e coeficiente de Poisson.



Figura 12: Fontes de vibração: A) veículo leve; B) veículo médio (utilitário/caminhonete); C) veículo pesado.



- 1 - Componente Vertical
- 2 - Componente Longitudinal
- 3 - Componente Transversal

Figura 13: Tipos de registros de captação do geofone.

Na sequência, buscou-se avaliar as tensões e deformações existentes no topo da cavidade de grau de relevância máxima, de modo a garantir a sua conservação mediante a manutenção da sua integridade estrutural. Diversos autores desenvolveram métodos já consagrados para a avaliação de tensões e das deformações decorrentes da escavação de túneis, em maciços de solos e/ou rochas, sejam estes homogêneos ou heterogêneos, ante ao não conhecimento de teorias de cálculo para avaliação de estabilidade de cavernas. Destacam-se aqueles que permitem a análise das condições de equilíbrio no estado limite (ou ruptura), tais como os de Bierbaumer (1813) e Terzagui (1949), que realizam uma avaliação empírica das tensões máximas causadas por uma carga pontual, aplicada em um semiespaço infinitamente grande, em qualquer ponto de um meio homogêneo, elástico e isotrópico.

De forma resumida, essas teorias de análise das condições de equilíbrio permitem determinar o coeficiente de segurança (FS) da cavidade, definido pela relação entre a resistência ou capacidade de carga (q_a) dos maciços e as tensões atuantes (q_z) na profundidade (z), em qualquer ponto do maciço. Em análises conservadoras, são considerados como suficientes para a avaliação da estabilidade de maciços rochosos em relação ao risco de ruptura, e os valores mínimos do coeficiente de segurança superiores a 3,0 ($FS > 3,0$). Neste sentido, têm-se duas variáveis: capacidade de carga e o valor de tensão atuante.

Para a definição da capacidade de carga (q_a) do tipo de material em questão, identificado pela análise petrográfica como metacalcário metamórfico, tem-se os valores apresentados por diversos autores: Berberian (1996), 12 kgf/cm²; Milton Vargas (1982), 70 kgf/cm²; Parry (1978), 12 kgf/cm²; Norma DIN 1054 (1997), 15 kgf/cm² e NBR 6122, 15 kgf/cm². Na análise deste estudo foi considerado, então, o valor médio de 27,8 kgf/cm² e como valor mínimo 12 kgf/cm².

O valor da tensão atuante (q_z), na profundidade “z”, depende da geometria de distribuição da sobrecarga e da posição da cavidade, bem como do método proposto por cada autor, onde se considera o estado de equilíbrio geostático existente e as tensões induzidas pelo acréscimo de carga. Portanto, foi necessária a escolha de um método que permitisse a avaliação do acréscimo de tensões em qualquer profundidade, em decorrência de uma sobrecarga na superfície. Assim sendo, a determinação do coeficiente de segurança (FS) será: $FS = (q_a)/(q_z)$.

Dentre os métodos de análise de acréscimo de tensões, fundamentados em uma análise elástica, o que permite uma melhor compreensão do fenômeno, para qualquer ponto inserido na área de influência do maciço, é o método desenvolvido por Boussinesq (1885), que desenvolveu as equações para cálculo dos acréscimos de tensões efetivas verticais, radiais e tangenciais, causadas pela aplicação de uma carga pontual agindo perpendicularmente na superfície do maciço.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Definição da cavidade de relevância máxima e da área de influência para as prospecções

Na primeira etapa da pesquisa pode-se definir a caverna do Buraco do Inferno e sua projeção na superfície do terreno, na diretriz da rodovia federal BR-135/BA como a área de estudo principal da presente pesquisa. A caverna faz parte do Sistema cárstico João Rodrigues (Figura 14), que se trata de um sistema com feição geomorfológica de orientação nordeste-sudoeste. Tal sistema constitui um conjunto de cavidades interligadas, situado em uma região de relevo de baixas amplitudes, com morros de topo arredondado, rede de drenagem com pouco entalhamento das vertentes e afloramento de rochas ruiformes em meio a paisagem de cerrado (GODINHO et al., 2013). Assim, pode-se identificar o local exato de interseção da projeção da caverna Buraco do com a rodovia BR-135/BA, nas proximidades do km 218.

Pode-se afirmar que a caverna Buraco do Inferno trata-se da maior cavidade do Sistema Cárstico João Rodrigues. Rubbioli et al. (2019) determinaram as dimensões principais da cavidade em: 4.710 metros de projeção horizontal, 34 metros de desnível, 132.824 m² de área de projeção e volume aproximado de

1.716.000 m³. A caverna apresenta atributos necessários para classificá-la com o grau de relevância máxima, tais como: extensão de dimensões notáveis em extensão, área e volume; possuir espeleotemas únicos; ser habitat para a preservação de populações geneticamente viáveis de espécies de troglóbios endêmicos ou relictos; ser habitat de troglóbio raro e também por ser considerada como uma cavidade testemunho.

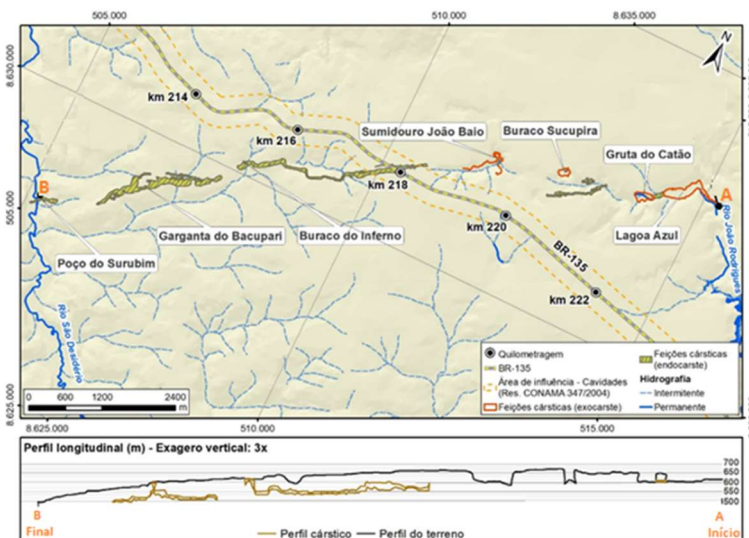


Figura 14: Localização do Sistema cárstico João Rodrigues, da diretriz da rodovia BR-135/BA e uma seção longitudinal regional da área.

Identificação da projeção da cavidade por meio de métodos geofísicos

A interpretação dos dados adquiridos com GPR forneceu a profundidade do perfil de solo, a posição do topo rochoso, delimitação de prováveis zonas de fraturamento e de dissolução nos metacálcarios. As possíveis cavidades foram interpretadas como pequenas dissoluções, muitas delas associadas a zonas de faturamento subverticais e todas localizadas no maciço rochoso (Figura 15). Cavidades de grandes dimensões não foram identificadas como feições geofísicas nos perfis executados, devida à profundidade máxima de investigação, que oscilou entre 6 e 10 metros.

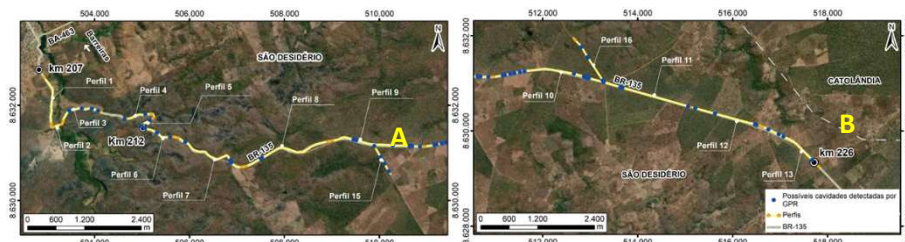


Figura 15: Resultados dos perfis GPR e indicação de possíveis cavidades detectadas na diretriz da rodovia.

Os resultados obtidos indicaram que as anomalias gravimétricas de Bouguer exibem tendências de fontes regionais e delimitam as grandes estruturas geológicas na região (Figura 16A), destacando os calcários do Grupo Bambuí em alta densidade (em vermelho) e grande comprimento de onda, contrastando com fontes de menor densidade (em verde e azul) dos arenitos Uruçuia.

O mapa de anomalia residual de segunda ordem retira o efeito regional e os seus resíduos são indicam os altos e baixos gravimétricos (Figura 16B). Como as rochas da área de estudo formam um contexto

geológico homogêneo, de metacalcários com cobertura de arenitos, é de se esperar que os baixos gravimétricos correspondam a vazios no sistema cárstico em questão, ou seja, cavidades em profundidade de origem natural associadas as falhas de direção NE.

O perfil gravimétrico (Figura 17) foi modelado a partir de valores de anomalias residuais de segunda ordem e esboça as principais cavidades existentes entre os km 215 e km 218 da diretriz do traçado da rodovia BR-135/BA. Calculou-se o problema inverso da gravimetria (inferindo a massa anômala a partir do baixo gravimétrico) e se obteve os valores por métodos iterativos (variando a área de influência e sua profundidade), resultando em um ajuste que representa o efeito medido.

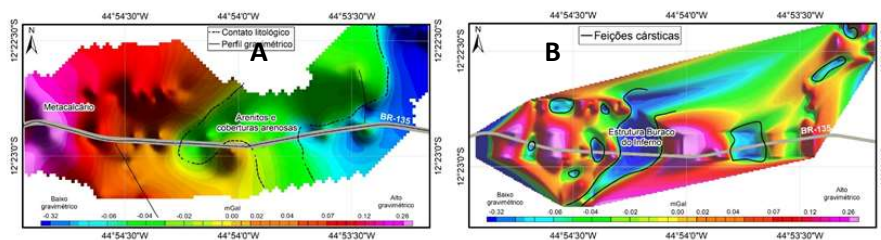


Figura 16: A) Resultado de anomalia residual de 2º grau; B modelagem do perfil gravimétrico indicando as feições profundas.

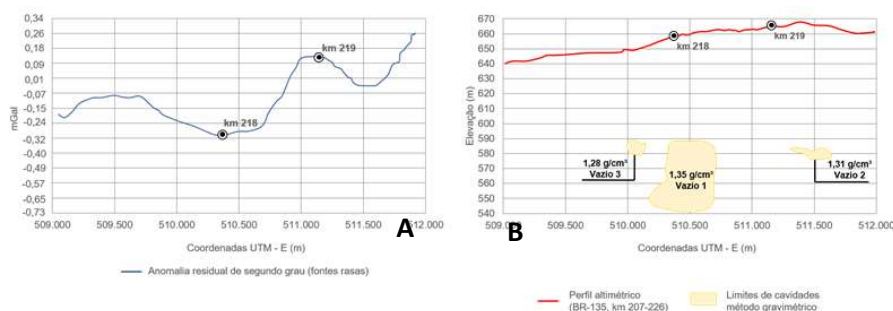


Figura 17: A) resultado da anomalia residual de 2º grau; B) modelagem do perfil gravimétrico indicando cavidades.

A aplicação deste método permitiu identificar a existência de três cavidades, duas de pequenas dimensões, e uma terceira maior, que se correlaciona com a estrutura do Buraco do Inferno. A análise gravimétrica indicou uma anomalia correspondente a uma cavidade de aproximadamente 50 m de altura, a uma profundidade de aproximadamente 70 m em relação a superfície do terreno até seu teto.

A espessura, estimada pelo baixo gravimétrico, da referida cavidade é de, aproximadamente, 300 m, pois o eixo principal da rodovia neste local é de direção E-W, enquanto a estrutura que comporta o Buraco do Inferno é um alinhamento associado a falhas de direção N40-50E. Assim sendo, deve-se considerar como largura da área de influência de anomalia gravimétrica, aproximadamente, 200 m por 50 m de altura. Cabe salientar que os vazios identificados podem não ser contínuos, visto que o método não permite esta identificação.

Os contrastes de densidade são compatíveis com o modelo apresentado, isto é, os metacalcários são da ordem de $2,62 \text{ g/cm}^3$ e a cavidade do Buraco do Inferno igual a $1,35 \text{ g/cm}^3$, sugerindo seu preenchimento, em partes, com água e sedimentos. Os resultados de perfilagem por polarização induzida e eletrorresistividade na zona de influência da caverna do Buraco do Inferno permitiram investigar

profundidades maiores e corroboraram os resultados obtidos pelo método gravimétrico. Detectou-se uma cavidade a, aproximadamente, 80 m de profundidade, sendo que, aproximadamente, 45 m correspondem ao manto de alteração de arenitos sobrepostos a 35 m de metacalcários (Figura 18).

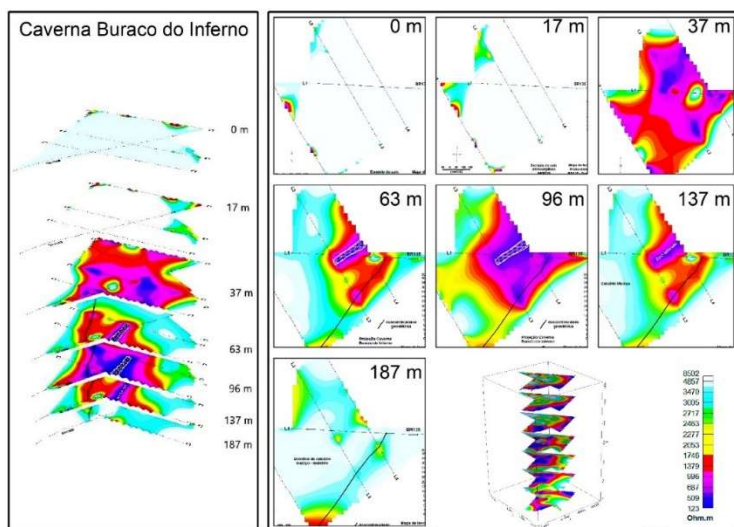


Figura 18: Perfil das linhas de estações de medição de eletrorrestividade sobre a caverna do Buraco do Inferno sob a BR-135/BA.

A projeção da caverna do Buraco do Inferno foi inferida com eixo centrado na estação 500, das linhas L3 e L4, e estação 325 da Linha L1. Outra feição destacada é uma descontinuidade geolétrica de baixa resistividade, a qual pode estar relacionada com as feições de dissolução subparalela ao eixo principal da cavidade dentro do Sistema cárstico do Rio João Rodrigues (Figura 19). A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados de pico de velocidade de vibração de partícula obtidos nos monitoramentos das fontes de vibração transientes (tráfego de veículos) e suas respectivas frequências.

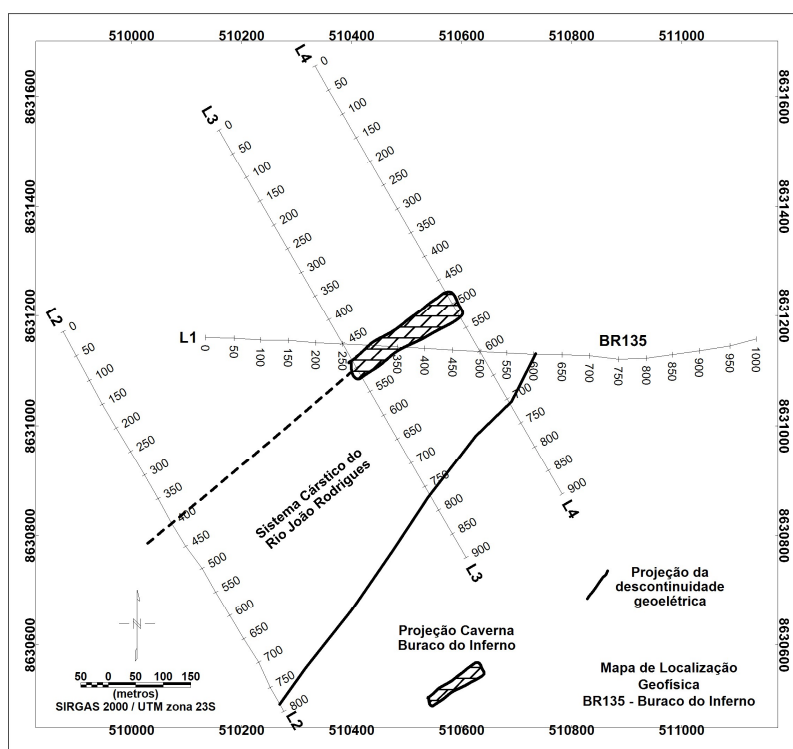


Figura 19: Resultado da interpretação geofísica indicando o local da cavidade.

Tabela 1: Resultados do monitoramento sismográfico da vibração de partículas causada por fonte de vibração transientes (tráfego de veículos) e respectivas frequências.

DATA	PERÍODO		PONTO	DIST. (m)	LONGITUDINAL		TRANSVERSAL		VERTICAL	
	INÍCIO	FIM			PICO (mm/s)	(Hz)	PICO (mm/s)	(Hz)	PICO (mm/s)	(Hz)
01/10	12:25	-	P01	cav.	0,19	0,5	0,19	0,8	0,13	100
01/10	15:00	-	P02	cav.	0,13	25	0,19	0,3	0,19	0,4
02/10	10:13	12:00	P03	2	1,21	31,3	1,02	27,8	0,89	19,2
02/10	10:27	12:04	P04	50	0,19	0,4	0,19	0,6	0,13	62,5
02/10	10:38	12:07	P05	150	0,19	0,4	0,25	0,3	0,19	0,4
02/10	10:49	12:08	P06	250	0,38	125	0,44	125	0,19	50
03/10	13:55	15:39	P07	2	0,95	38,5	0,57	14,3	0,51	21,7

Incertezas de Medição (U): Canal Longitudinal, Transversal e Vertical = 0,01 in/s (0,254 mm/s). A incerteza expandida de medição (U) relatada é declarada como a incerteza padrão multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2,00$, o qual para uma distribuição t com ν_f (graus de liberdade efetivos) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

Para avaliar os resultados, utilizou-se o critério estabelecido por ICMBio (2016), que determina os seguintes limites de vibração, em função do tipo de atividade geradora (longa, média ou curta duração), a saber: vibração intermitente igual a 5,0 mm/s; vibração transiente igual a 3,0 mm/s; e vibração contínua igual a 2,5 mm/s.

Para os pontos P01 (Figura 20A) e P02 (Figura 20B), localizados na parte interna da caverna Buraco do Inferno, e sob o eixo da rodovia, não foram registrados picos de vibração, indicando que as vibrações geradas pelo tráfego de veículos na rodovia sem pavimentação, são amortecidas pela espessa camada de cobertura identificada nos estudos geofísicos, e não geram riscos aparente à estrutura física da cavidade.

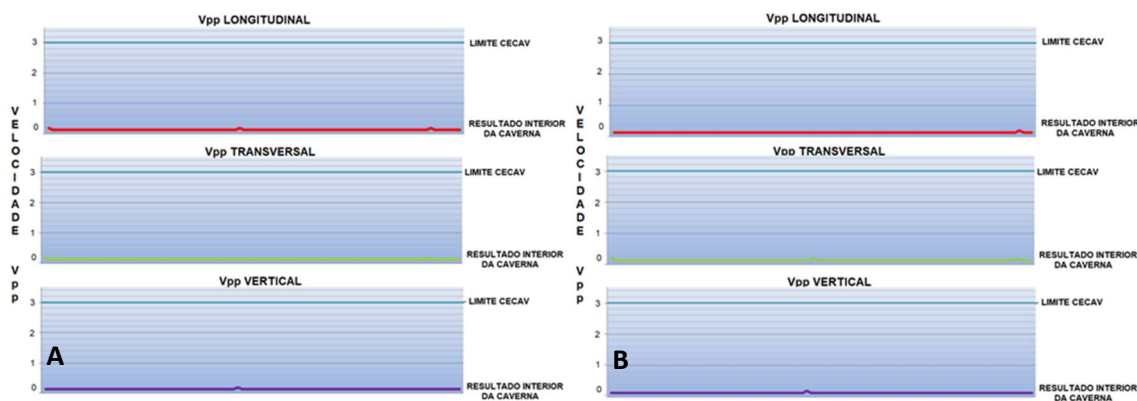


Figura 20: Velocidade de vibração de partícula de pico no interior da cavidade: A) Ponto P01; B) Ponto P02.

No ponto P03 (Figura 21A), situado a dois metros da rodovia, em leito natural não pavimentado, é possível observar dois picos de vibração em cada canal, no início do monitoramento. Este resultado se justifica pela passagem de um caminhão, às 10:13h com uma velocidade de 17km/h, e outro caminhão, às 10:15h com uma velocidade de 53 km/h, nos mesmos horários em que ocorreram os referidos picos registrados pelos sismógrafos.

No ponto P07 (Figura 21B), instalado a 2 metros de distância da rodovia e distante 150 metros do ponto P03, observa-se picos de vibração em cada canal, com destaque para um pico de 0,95 mm/s registrado no canal Longitudinal às 15:31h. Neste horário foi registrada a passagem de um caminhão com uma velocidade de 43 km/h.

Nos demais pontos monitorados, (P04, P05, P06, P08 e P09) não foram obtidos registros significativos de vibração nos pontos de monitoramento. Destacam-se apenas os registros efetuados nos pontos P03 e P07, que, por estarem a apenas dois metros de distância da margem da rodovia sem pavimentação, apresentaram picos discretos de vibração, embora os valores de velocidade de partícula de pico estejam abaixo do valor transiente definido pelo ICMBio (2016).

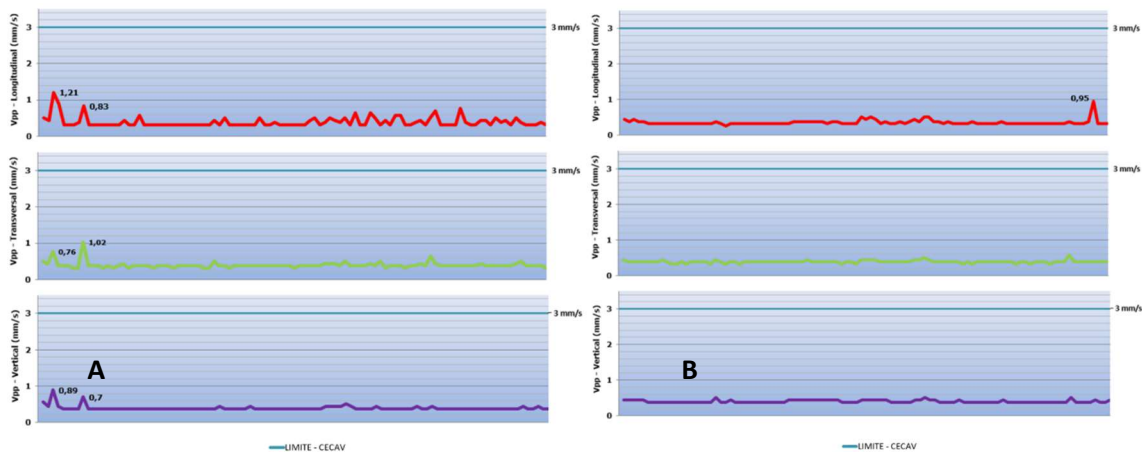


Figura 21: Velocidade de vibração de partícula de pico no interior da cavidade: A) Ponto P03; B) Ponto 07.

Desta forma, é possível concluir que os níveis de vibração gerados pela passagem de veículos, tanto leves quanto pesados, não indicam a possibilidade de provocarem danos estruturais à cavidade do Buraco do Inferno, nem a quaisquer outras que se encontrem em uma faixa entre 50 e 250 m do eixo da rodovia. Por se tratar de análise preliminar, recomenda-se que outros estudos sejam realizados para que se certifique que cavidades menores e/ou mais próximas da superfície, não detectadas pelos diversos métodos aplicados, não sejam afetadas. Deve-se certificar também se as vibrações contínuas e/ou recorrentes, ainda que reduzidas, podem ou não causar eventuais instabilidades nas cavernas do sistema.

Com a pavimentação da rodovia, pode-se afirmar que as vibrações na superfície devem ser muito inferiores em relação às registradas neste estudo. Nesse contexto, ressalta-se que os efeitos da vibração devido às atividades de implantação do empreendimento (desmonte de rochas, compactação de aterros e movimentação de maquinário pesado) devem ser monitorados ao longo das suas execuções de modo a assegurar a proteção estrutural da caverna.

Segurança estrutural do maciço por meio de métodos geológico-geotécnicos

As cavidades existentes em maciços cársticos surgiram em decorrência da dissolução gradativa das rochas metacálcárias, causada pelo fluxo de águas subterrâneas por zonas mais fraturadas, onde o fenômeno evoluiu ao longo do tempo geológico. Como consequência, as eventuais redistribuições de tensões internas ao maciço já ocorreram e pode-se dizer que, na escala temporal desde sua origem, o maciço encontra-se em equilíbrio geostático.

Situação diferenciada seria aquela causada pela abertura momentânea de uma cavidade, como no caso da construção de um túnel internamente a um maciço, onde, de forma abrupta, poderiam ocorrer

redistribuições das tensões geostáticas e as deformações induzidas. Este comentário é importante para justificar-se que, ante o não conhecimento de teorias de cálculo para avaliação de estabilidade de cavernas, utilizam-se os métodos desenvolvidos para o cálculo de túneis que, em geral, conduz a resultados de redistribuição de tensões e de deformações muito maiores.

Assim, com os dados obtidos pelo do uso conjunto das técnicas de investigação geofísica, que permitiram determinar a posição aproximada da cavidade Buraco do Inferno sob o eixo da rodovia BR-135/BA, bem como estimar suas características geométricas, dimensões, profundidade, espessura dos estratos sedimentares, descontinuidades e identificação de contatos geológicos, foram aplicados métodos geológico-geotécnicos para calcular segurança estrutural do maciço na seção onde a cavidade intercepta perpendicularmente, em profundidade, a projeção da implantação da rodovia na superfície.

A distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas em maciços com cavidades subterrâneas dependem de vários fatores, dentre os quais se destacam a geometria da situação (arranjo espacial das propriedades), ou seja, a forma e a posição da cavidade, sua profundidade e seu preenchimento; a resistência à compressão e a deformabilidade do maciço que, de forma conservativa, pode ser analisado como um meio elástico, portanto, representada pelo Módulo de Deformabilidade (E) e pelo Coeficiente de Poisson (ν) da rocha encaixante, sendo, então, possível considerar a intensidade da sobrecarga aplicada na superfície, no intuito de se verificar os efeitos da repetição de cargas e da eventual propagação dos efeitos decorrentes de vibrações que possam ocorrer.

Dependendo das dimensões e da posição das cavidades os efeitos da sobrecarga, muitas vezes são dissipados no maciço sem provocar deformação ou desenvolvimento de tensões sobre este. Melhor explicando, ocorre uma redistribuição das tensões internas do maciço, de sorte que os acréscimos de tensão em cada ponto podem ser infinitesimais em relação às tensões geostáticas existentes. Nos maciços rochosos, as tensões e as deformações induzidas decrescem com o aumento da profundidade. Com o acréscimo de tensões devido às sobrecargas na superfície pode-se compará-las com resistência de ruptura da rocha, permitindo a avaliação do risco de ruptura a cada profundidade.

Diante do arranjo geométrico e características física do conjunto, da distribuição da sobrecarga, constituída por uma rodovia que será pavimentada acrescida das cargas móveis do tráfego de veículos, pode-se afirmar que o objeto de análise se comporta como uma faixa de carga vertical de largura finita e com comprimento infinito uniformemente distribuída. Em outras palavras, pode-se imaginar que o acréscimo de tensão vertical da rodovia é semelhante a uma sobrecarga aplicada com largura igual à da plataforma rodoviária (aproximadamente 18 m), apoiada sobre um leito elástico e contínuo, que se de forma em superfície conforme as hipóteses de Winkler (1867), sobre apoio contínuo sobre molas.

O maciço foi considerado horizontal na superfície, composto por uma camada de arenitos com espessura de 30 m sotoposta ao metacalcário, sendo que o teto da cavidade está estimado a uma profundidade de 80 m a partir da superfície. Além dos já descritos ensaios geofísicos de campo, foram realizados ensaios em laboratório para se determinar as características físicas das rochas, inclusive de sua

resistência à ruptura por compressão simples e triaxial.

Para se equacionar matematicamente o problema, em um meio elástico, admitiu-se que o substrato se deforma em decorrência dos acréscimos de tensão a cada profundidade e, obviamente, dependendo da maior ou menor compressibilidade do maciço. Desta forma, ao se aplicar uma determinada carga na superfície do terreno, a distribuição das tensões no substrato não se dá unicamente segundo a projeção desta, mas, diminuem com a profundidade em decorrência de que a área atingida pela sobrecarga aumenta com a profundidade. Se unirmos os pontos que representam o mesmo percentual da sobrecarga, definem-se os chamados “bulbos” de distribuição de tensões.

Com base em diversos ensaios de laboratório, com vários tipos de solos e para simplificar esse cálculo, considera-se que a dissipação da sobrecarga ao longo da profundidade (z) se dá de forma simétrica e segundo planos definidos. Seguindo esse raciocínio da análise elástica e aplicando o Método de Boussinesq, (1887), que determina o acréscimo da tensão vertical $q_{(z)}$ a uma profundidade (z), provocada por uma sobrecarga uniformemente distribuída na superfície (q), com largura (b) e comprimento infinito, pode-se determinar os acréscimos de tensão em qualquer ponto do maciço em análise.

Para o problema em análise, em que a espessura do maciço sobre a cavidade em aproximadamente 80 metros, conforme resultado obtido nos ensaios geofísicos, ainda, que a sobrecarga que é dada pelo peso do aterro que configura a plataforma de terraplanagem e o pavimento (q_1), com 2,0 metros de altura e largura de 18,0 metros de projeção, além de uma carga de multidão (q_2) móvel de $0,6 \text{ tf/m}^2$, tem-se

Fonte de referência não encontrada.:

$$q = q_1 + q_2$$

$$q = g \cdot h + q_2 = (2,2 \cdot 2,0) + 0,6 = 5,0 \text{ tf/m}^2 \quad (1)$$

De acordo com a geometria da situação, pode-se avaliar o acréscimo de tensões “ $q_{(z)}$ ” na profundidade “z”, decorrente da sobrecarga aplicada na superfície, através da seguinte expressão:

$$q_{(z)} = \frac{q}{PI} \left[\left(\frac{B1 + B2}{B2} \right) \cdot (\Theta1 + \Theta2) - \left(\frac{B1}{B2} \right) \cdot \Theta2 \right]$$

Onde:

q = sobrecarga aplicada na superfície (aterro + carga de multidão)

B1 e B2 = dimensões (em m)

$\Theta1$ e $\Theta2$ = ângulos (em radianos)

Sendo:

$\Theta1 = (\text{arc tg } (B1 + B2) / z) - (\text{arc tg } (B1 / z))$

$\Theta2 = \text{arc tg } (B1 / z)$

Ou seja, considerando-se os acréscimos de tensões atuantes (q_z), na profundidade “z”, decorrentes da aplicação de cargas aplicadas na superfície correspondentes ao aterro de até 2,0 m de altura (q_1), somadas a uma carga móvel (q_2) e, ainda, os limites possíveis de valores de ruptura (q_a) para as camadas de arenito ($22,03 \text{ tf/m}^2$) e de rochas calcárias ($62,08 \text{ tf/m}^2$), obtidos através de ensaios de ruptura em corpos de prova destas rochas que compõem o maciço, obtém-se os Coeficientes de Segurança (FS) para um diversas profundidades até o topo da cavidade, conforme apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Valores de Coeficiente de Segurança (F.S.) de ruptura e profundidade, carga aplicada (q) na superfície de 5,0 TF/m² (50 KPA) na vertical sobre a caverna.

Profundidade (m)	Material	Θ_1 (rad)	Θ_1 (rad)	$q(z)$ (tf/m ²)	$q(a)$ (tf/m ²)	Fator de segurança $q(a)/q(z)$
05	Arenito	0,5232	0,5404	2,1090	22,03	10,44
10	Arenito	0,4414	0,2914	1,5174	22,03	14,52
20	Arenito	0,2740	0,1488	0,8909	22,03	24,72
30	Arenito	0,1918	0,0996	0,6163	22,03	35,74
40	Metacalcário	0,1465	0,0748	0,4686	62,08	132,48
50	Metacalcário	0,1182	0,0599	0,3775	62,08	164,45
60	Metacalcário	0,0989	0,0499	0,3154	62,08	196,83
70	Metacalcário	0,0857	0,0428	0,2726	62,08	227,73
80	Metacalcário	0,0750	0,0375	0,2387	62,08	260,05

Conforme se observa, considerando-se os acréscimos de tensões calculadas $q(z)$ para os pontos situados na vertical do centro da sobrecarga, e sobre o eixo da caverna existente, com profundidade medidas a partir da superfície (z), o Coeficiente de Segurança contra a ruptura (FS) assume valores de mais de 10 (na profundidade de $z = 5,0$ m), atingindo 260 (no topo da caverna $z = 80,0$ m).

Portanto, nesta avaliação concluiu-se que, ante a sobrecarga máxima aplicada (q) na superfície, no valor de 5,0 tf/m², que os riscos de ruptura e colapso da cavidade são baixos. Na camada de arenitos, que corresponde aos primeiros 30 m de profundidade, o coeficiente de segurança à ruptura variou entre 10,44 e 35,74, enquanto que na camada de metacalcários estes valores variaram entre 132,48 (aos 40 m de profundidade) e 260,05 no topo da caverna (aos 80 m de profundidade).

Ainda, analisando os resultados numéricos da análise geotécnica apresentada, observa-se que o acréscimo de tensão na profundidade de 80 m, portanto, no teto da caverna, resultou em um valor de 0,2387 tf/m², ou seja, de 23,7gf/cm².

Tais valores numéricos também foram corroborados pelos estudos de Zampieri (2017), que considerando o substrato estratificado, composto por arenitos nos primeiros 30 m e por metacalcários abaixo desta profundidade, analisou as tensões e deformações distribuídas em uma seção vertical, com a cavidade. Os valores obtidos refletem uma abordagem preliminar. Não podem ser tratados como representativos para cálculos e estimativas da realidade, geologicamente mais complexa. Para cálculos de segurança estrutural e parâmetros geotécnicos mais seguros faz-se necessária coleta sistemática dados e estudos de detalhe, tais como: 1) análise estrutural, envolvendo densidade, preenchimento e atitudes do fraturamento, tipos e posição espacial de deformações tectônicas, atitudes de camadas; 2) mapeamento litofaciológico, suas anisotropias composicionais e grau de alteração das rochas; 3) comportamento do fluxo de águas subterrâneas, entre outros.

Observa-se que o emprego conjunto destas técnicas de investigação geofísica permitiu estimar a posição do elemento de patrimônio espeleológico, suas características geométricas, dimensões, profundidades, espessura dos estratos sedimentares, discontinuidades geológicas e identificação de contatos, dentre outras características que podem orientar a elaboração de projetos rodoviários (NASCIMENTO NETO, 2016).

Os resultados obtidos em estudos de caracterização de alguns parâmetros geotécnicos do maciço

rochoso mostraram-se úteis, quando integrados aos geofísicos. Permitiram a avaliação preliminar de riscos de danos e proposição de formas de conservação, incluindo simulações de atividades de construção da rodovia. Possibilitaram ainda analisar a distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas ao maciço rochoso para determinação do limite de segurança estrutural do patrimônio espeleológico (NASCIMENTO NETO et al., 2017).

Quantificar a resistência ou capacidade de carga do maciço, assim como as tensões atuantes na profundidade onde se encontram cavernas requer análises sistemáticas e de detalhe. Estudos geotécnicos de resultados quantitativos são complexos e envolvem caracterização detalhada do maciço, amostragem e análises laboratoriais sistemáticas, e bem controladas pelas variações litológicas e estruturais (sua representatividade, realização de ensaios *in situ*, posicionamento espacial das descontinuidades, relação com anisotropias do maciço, instrumentalização e monitoramento). Com uso de malha de amostragem de acordo com as anisotropias de composição, intensidade e direção de fraturamento, grau de intemperismo, com métodos específicos conjugados, que não foram realizados nesta pesquisa.

Desempenho dos métodos empregados para a geoconservação da cavidade cárstica

A geoconservação tem como objetivo conservar a diversidade natural dos processos geológicos, geomorfológicos e de solos, garantindo a manutenção da história de sua evolução. Ela deve ser impulsionada pela necessidade de se conservar a geodiversidade, dado o seu valor e as suas ameaças reais devido à falta de proteção e gestão (e.g. GRAY, 2005; BRILHA, 2005; 2016)

Nas últimas décadas o avanço da discussão sobre o patrimônio espeleológico subsidiou o estabelecimento de instrumentos legais contendo diretrizes para o licenciamento dos locais a serem protegidos ou conservados. Cabe destacar, como legislação específica sobre o tema, a Portaria do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis nº 887/90 (IBAMA, 1990); Decreto Federal nº 99.556/90 (BRASIL, 1990); Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente nº 347/04 (CONAMA, 2004); Decreto Federal nº 6.640/08 (BRASIL, 2008) e a Instrução Normativa nº 02/17 (BRASIL, 2017).

No entanto, ainda pouco se discutiu, no âmbito do uso e ocupação de áreas cársticas por empreendimento lineares, como rodovias, potencialmente impactantes ao patrimônio espeleológico. Não existe um protocolo de ações que oriente que estudos devem ser realizados para determinar os impactos negativos desta modificação de ambiente, e que, permitam a adoção de medidas preventivas ou atenuantes dos efeitos negativos derivados de sua implantação.

A identificação e caracterização das cavidades em áreas, direta e indiretamente, afetadas pela instalação do empreendimento são etapas iniciais importantes, para posterior a classificação de relevância das cavidades naturais subterrâneas, observando os critérios estabelecidos na Instrução Normativa nº 02/2017 (BRASIL, 2017). Tal avaliação pode tornar-se determinante, tanto para o reconhecimento prévio da necessidade de conservação final da caverna quanto para o futuro da obra. Intervenções que podem produzir impactos ao acervo espeleológico deverão ter alterações de posição e/ou apresentar alternativas

tecnológicas para garantir a conservação da cavidade avaliada como relevante.

Conforme o Art. 4º da resolução CONAMA 347/2004, torna-se obrigatória a avaliação dos possíveis riscos de impactos sobre o patrimônio espeleológico durante a construção e a operação de empreendimentos lineares. O § 1o, cita que as autorizações ou licenças ambientais, na hipótese de cavidade natural subterrânea relevante ou de sua área de influência, na forma do Art. 2o, § 2º, dependerão, no processo de licenciamento, de anuência prévia do IBAMA. A área de influência de uma caverna é determinada na legislação mediante delimitação de uma área preventiva e proteção ao redor da caverna. No Art. 4º, o § 2o cita que a área de influência sobre o patrimônio espeleológico será definida pelo órgão ambiental competente que poderá, para tanto, exigir estudos específicos, a expensas do empreendedor. E de acordo com o § 3o, do Art. 4º, até que se efetivem os estudos específicos, a área de influência das cavidades naturais subterrâneas será a projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de 250 metros, em forma de poligonal convexa.

No meio técnico, atualmente ainda se discute quanto a um método objetivo para determinar o limite de segurança estrutural das cavidades impactadas pela construção e operação de rodovias, bem como sobre a validade do estabelecimento de uma distância padrão que assegure essa segurança. Mantém-se então, tal valor arbitrário de distância, não sendo possível assegurar se ela é adequada, insuficiente ou superestimada para proteção. Na prática, o que se observa é que a determinados empreendimento o atendimento aos os 250 m não causam prejuízos econômicos e prontamente são adotados como medidas finais. Em outros, fica inviável a realização do projeto, como por exemplo, quando exigem alterações do traçado previsto em relação aos raios de curvas e inclinações de rampas, que seguem normas específicas para segurança do transporte em estradas e ferrovias (ICMBio, 2013).

De acordo com Lopes et al. (2011), como todo recurso natural, a geodiversidade possui valores e está sujeita à dinâmica da natureza, mas principalmente às intervenções humanas e conseqüentemente às suas ameaças, desta forma é necessário estabelecer medidas que permitam o seu uso de forma sustentável.

CONCLUSÕES

É frequente a sobreposição de interesses entre as atividades de ocupação do território e a conservação do patrimônio natural como, neste caso, o espeleológico. Esforços têm sido empregados para a sua proteção, entre elas, ações empreendidas no sentido de conservação e gestão deste patrimônio geológico e dos processos naturais a ele associados.

A definição de uma faixa de interesse para o estudo de instalação de rodovia é uma etapa essencial para identificar locais que podem gerar potenciais problemas construtivos. A aplicação de métodos indiretos (geofísicos) se mostrou viável na pesquisa realizada para indicar locais favoráveis de ocorrência de carst em ambiente geológico constituído por complexo de rochas carbonáticas regional. O estudo do contexto geológico e geomorfológico associado aos métodos investigativos geofísicos e geotécnicos cumpriram o papel de reconhecimento preliminar da região cárstica na área diretamente afetada pela construção futura

da rodovia BR-135/BA.

O emprego conjunto de técnicas de investigações geofísicas possibilitou melhor definição da posição e estimar dimensões das cavidades da área investigada na pesquisa, um estudo de caso. Os resultados obtidos na caracterização da caverna e seu contexto físico não seriam possíveis utilizando-se apenas, por exemplo, o método de caminhamento de prospecção convencional. Nele se utiliza o caminhamento e busca ativa de aberturas correspondentes de entradas de cavidades em raio de 250 metros de distância do empreendimento. A interpretação dos resultados geofísicos obtidos permitiu estimar a posição dos elementos do patrimônio espeleológico, suas características geométricas, preliminares, dimensões aproximadas, profundidades e espessura dos estratos, indicação de ocorrência de anisotropias geológicas como contatos, zonas fraturadas e outras discontinuidades, dentre outras características para orientar a elaboração de projetos rodoviários.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados na cavidade principal, situada a cerca de 80 metros de profundidade, indicaram que as vibrações provenientes da passagem de veículos devem ser reduzidas após a implantação do pavimento asfáltico ou de concreto. Todavia, outras cavidades e estruturas cársticas menores, e/ou menos profundas, não foram avaliadas e tampouco se a vibração contínua, ainda que reduzida, pode ou não causar eventuais instabilidades em cavernas. Tais resultados devem ser adotados com cautela, até que se tenha uma análise geotécnica do sistema cárstico com o devido detalhe. Deve-se assegurar, por exemplo, até que profundidade alcançam as vibrações em diferentes rochas e contextos tectônicos/estruturais. Avaliar sua capacidade de instabilizar partes do maciço fraturado, que também apresenta discontinuidades litológicas, por vezes acentuadas por processos intempéricos, de inclinação variada.

A pesquisa indicou que existem recursos técnicos que incluem estudos geotécnicos sistemáticos que permitem avaliar o risco de impacto na construção de estradas calculando-se a distribuição de pressões causadas por sobrecargas aplicadas ao maciço rochoso, determinando o limite de segurança estrutural para manter a integridade da cavidade. O modelo utilizado, tratando o maciço apenas como elástico-linearmente uniforme e homogêneo possibilitou uma análise preliminar da situação. Para maior precisão dos resultados de modelagem no comportamento da cavidade e seu entorno, assim como os riscos de impactos e modificações, é necessário considerar análises sistemáticas adicionais, de detalhe, que compreendam os fatores que interferem na estabilidade da cavidade, tais como: identificação dos sistemas de esforços, posição e frequência das discontinuidades estruturais e litológicas, existência ou não de preenchimentos, percolação de água, deformações plásticas em maciço fraturado, caracterização geomecânica de tipos litológicos, sua distribuição e anisotropias decorrentes.

Por fim, a sequência metodológica de procedimentos e métodos utilizada pode contribuir para a avaliação preliminar de riscos de impactos e tomada de decisões dos órgãos ambientais quanto aos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos rodoviários e similares, para o correto uso do solo e proteção do patrimônio espeleológico.

AGRADECIMENTOS: Esta pesquisa foi realizada mediante Termo de Cooperação entre a Universidade Federal do Paraná e o Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre. Os autores agradecem aos pesquisadores do Instituto de Transportes e Tecnologia de Infraestrutura da Universidade Federal do Paraná, ao Grupo de pesquisa do CNPq/UFPR em Geoconservação e Patrimônio Geológico, ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada da UFPR, a Universidade Federal de Barreiras (BA) e ao Governo Federal, representado pelo Ministério da Infraestrutura, pelo apoio prestado de diversas maneiras ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANNAN, A. P.. **Ground Penetration Radar Workshop Notes.** Sensors & Software Inc., Internal Report. 1992.
- ANNAN, A. P.. GPR - History, Trends, and Future Developments. **Subsurface Sensing Technologies and Applications**, v.3, p.253-270, 2002.
- BRASIL. **Decreto n. 99.556 de 1º de outubro de 1990.** Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. Brasília, 1990.
- BRASIL. **Decreto n. 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 1o de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, 2008.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Instrução Normativa n. 2, de 30 de agosto de 2017.** Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5º do Decreto no 99.556, de 1º de outubro de 1990. Brasília: MMA, 2017.
- BRIGGS, I. C.. Machine contouring using minimum curvature. **Geophysics**, v.1, n.39, p.39-48, 1974.
- BRILHA, J.. **Patrimônio Geológico e Geoconservação: A conservação da natureza na sua vertente geológica.** Braga: Palimage Editores, 2005.
- BRILHA, J.. **Inventário e avaliação quantitativa de geossítios e locais de geodiversidade: uma revisão.** Braga: Geoheritage, 2016.
- BOUSSINESQ, L.. **Essai sur la théorie des eaux courantes.** Paris: Imprimerie Nationale, 1877.
- CONAMA. **Resolução n. 347, de 10 de setembro de 2004.** Brasília: CONAMA, 2004.
- CPRM. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo.** Escala: 1:1.000.000. CPRM, 2004.
- DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P.. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v.37, p.531-551, 1989.
- GRAY, M.. **Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature.** Chichester: Wiley, 2004.
- IBAMA. **Portaria IBAMA n. 887, de 15 de julho de 1990.**
- Dispõe sobre o uso das cavidades naturais subterrâneas. Brasília: IBAMA, 1990.
- ICMBio. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Centro Nacional de Estudo. Proteção e Manejo de Cavernas. **Oficina sobre Áreas de Influência de Cavidades Naturais Subterrâneas: Relatório Final.** Brasília: ICMBio, 2013.
- ICMBio. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Centro Nacional de Estudo. Proteção e Manejo de Cavernas. **Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: orientações básicas à realização de estudos ambientais.** Brasília: ICMBio, 2016.
- LONGMAN, I. M.. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. **Journal of Geophysical Research**, v.64, n.12, 1959.
- LOPES, L. S. O.; ARAÚJO, J. L. L.. Princípios e Estratégias de Geoconservação. **Revista Eletrônica de Geografia**, v.3, n.7, p.66-78, 2011.
- LUZ, C. C.; NASCIMENTO NETO, D.; RATTON, E.; CARDOSO, S. H.; SOUZA JUNIOR, T. F.. Técnicas de Identificação e Análise de Estruturas Geológicas Associadas à Relevos Cársticos Visando a Implantação de Empreendimentos Rodoviários. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 11. **Anais.** Bento Gonçalves: GEOSUL, 2017. p.1-8.
- NASCIMENTO NETO, D.. Metodologia e Estratégias para a Conservação de Patrimônio Espeleológico. In: SEMINÁRIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA, 19. **Anais.** Curitiba: PPGEOL UFPR, 2016. p.21.
- NASCIMENTO NETO, D.; FERNANDES, L. A.; LUZ, C. C.; RATTON, E.. Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado - Vant - Como Ferramenta na Prospecção Espeleológica. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 10. **Anais.** Curitiba: SBG, 2017. p.113.
- NASCIMENTO NETO, D.. Método de Determinação do Limite de Segurança Estrutural de Patrimônio Espeleológico em Sistemas Cársticos Carbonáticos. In: SEMINÁRIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA, 20. **Anais.** Curitiba: PPGEOL UFPR, 2017. p.125-126.
- PASSO, D. P.; CASTRO, K. B.; MARTINS, E. S.; GOMES, M. P.; REATTO, A.; LIMA, L. A. S.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.. **Caracterização geomorfológica do município de São Desidério, BA, escala 1:50.000.** Planaltina:

Embrapa Cerrados, 2010.

PORSANI, J. L.. **Ground Penetrating Radar (GPR):** Proposta Metodológica de Emprego em Estudos Geológico-Geotécnicos nas Regiões de Rio Claro e Descalvado - SP. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 1999.

GODINHO, L. P.; PEREIRA, R. G. F. A.. Caracterização Geomorfológica Preliminar do Sistema Cárstico do rio João Rodrigues, São Desidério – BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32. **Anais** Barreiras: SBE, 2013. p.341-351.

RUBBIOLI, E.; AULER, A.; MENIN, D.; BRANDI, R.. **Cavernas-Atlas do Brasil Subterrâneo**. Brasília: ICMBio, 2019.

WINKLER, E.. **Theory of elasticity and strength**. Dominicus Prague, Czechoslovakia. 1867.

ZAMPIERI, M.. **Estudo geotécnico de tensões e deformações no solo na presença de cavidades subterrâneas ao longo da BR-135/BA, trecho São Desidério a Correntina**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ZONTA, J. T.; LUZ, C. C.; SACHET, J. V.; MORO, R. C.; LUZ, N. C.; NASCIMENTO NETO, D.; RATTON, E.. Utilização de veículo aéreo não tripulado como ferramenta auxiliar na identificação e quantificação de áreas degradadas na faixa de domínio de rodovias. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 11. **Anais**. Curitiba: SOBRAGE, 2017. p.58.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.