



## ANAIS do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia

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



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

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

BRANDI, I; BARBOSA, M.; CALUX, A.; ARAUJO, R.N.. Geotecnia aplicada à previsibilidade de impactos na integridade física de cavidades naturais subterrâneas, Carajás - PA. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. *Anais...* Campinas: SBE, 2015. p.533-541. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe\\_533-541.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_533-541.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)

# GEOTECNIA APLICADA À PREVISIBILIDADE DE IMPACTOS NA INTEGRIDADE FÍSICA DE CAVIDADES NATURAIS SUBTERRÂNEAS, CARAJÁS- PA

GEOTECHNICAL KNOWLEDGE APPLIED TO THE PREDICTABLE IMPACTS OF PHYSICAL INTEGRITY OF NATURAL CAVES, CARAJÁS- PA

Iuri BRANDI; Marcelo BARBOSA; Allan CALUX; Ramon Nunes ARAÚJO

Vale SA, Carajás PA.

Contatos: [iuri.brandi@vale.com](mailto:iuri.brandi@vale.com); [marcelo.roberto.barbosa@vale.com](mailto:marcelo.roberto.barbosa@vale.com); [allan.calux@vale.com](mailto:allan.calux@vale.com).

## Resumo

O presente trabalho tem como objetivos apresentar os resultados obtidos com a instrumentação geotécnica remota da cavidade natural subterrânea N4E-0026, localizada na Mina N4E Norte, operada pela Vale, na Serra dos Carajás (PA), e discutir a sua utilização na previsibilidade da distância mínima de segurança que as operações de lavra poderão avançar em direção às cavidades em litologias ferríferas sem causar impactos negativos irreversíveis na sua integridade física. O trabalho discute a validade dos 250m de entorno adicional de proteção para as cavidades, estabelecidos pela legislação atual, com a função de proteger a sua integridade física e o equilíbrio ecológico. As medidas de deformação, horizontal e vertical, na cavidade em análise, foram realizadas com o uso de um *crackmeter* e de um *convergencemeter*, instalados no interior da cavidade. Os resultados obtidos mostraram que mesmo quando submetida a esforços resultantes das operações de lavra a 75 metros de distância, a cavidade manteve-se estável, sem processos de reativação e movimentação no seu interior.

**Palavras-Chave:** instrumentação geotécnica em cavidades; monitoramento de cavidades; mineração e cavidades.

## Abstract

*This study aims to present the remote geotechnical instrumentation results in cave N4E-0026, located in Mine N4E, an iron ore mine operated by Vale in Serra dos Carajás (PA), and discuss the minimum distance that mining operations may occur without causing irreversible negative impact on caves. This paper also raises a discussion about the validity of 250m cave protection distance, required by current legislation, as an area that no significant environmental impact activities, as blasting with explosives, can be implemented. The structural movements within the cave were continuously monitored by crackmeters and convergencemeters with remote data transmission, via web, to the database server. This approach allowed that mining operations could reach 75 meters distance from the cave with no structural damage.*

**Key-words:** natural caves monitoring, geotechnical instrumentation, natural caves surrounding mining.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com a atual legislação, a cavidade natural subterrânea enquadrada por estudos espeleológicos no grau de relevância máximo, por seus atributos físicos, biológicos, ecológicos, históricos e culturais, não pode ser objeto de impactos negativos irreversíveis, sendo que a utilização do seu entorno deve fazer-se somente dentro de condições que assegurem sua integridade física e a manutenção do seu equilíbrio ecológico (Decreto 6.640/2008). Essa determinação do Decreto inclui, além da própria cavidade, a sua área de influência.

A área de influência de uma cavidade natural subterrânea foi definida pela Portaria IBAMA 887/90 (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis) e, posteriormente, reafirmada pela Resolução CONAMA 347/2004, como a área que compreende os recursos ambientais, superficiais e subterrâneos, dos quais dependem a integridade física ou o equilíbrio ecológico da cavidade. Define, ainda, que a área de influência deve ser determinada por estudos específicos e que, até que esses estudos se realizem, ela deverá ser identificada a partir da projeção em superfície do desenvolvimento linear da cavidade ao qual será somado um entorno adicional de proteção de, no mínimo, 250 metros.

Na legislação, não há uma justificativa técnica para os 250 metros estabelecidos como "entorno adicional de proteção". Tão pouco a literatura científica especializada, tanto no Brasil quanto no exterior, apresenta argumento que justifique este limite. Este é, entretanto, um número que pode afetar sensivelmente o planejamento do seqüenciamento da lavra, imobilizando por vezes reservas expressivas de minério.

A geração de ondas sísmicas pelo uso de explosivos para o desmonte de rochas, com vistas ao avanço da lavra é, sem dúvida, o maior impacto em potencial de uma atividade de mineração sobre a integridade física de uma cavidade. Nesse contexto, o conhecimento acerca das reais fragilidades estruturais, tanto das cavidades quanto dos maciços rochosos em que elas se inserem, identificando deformações ou movimentos não visíveis (internos à rocha) ou pouco perceptíveis (microfissuras), bem como a quantificação da resistência mecânica dos diferentes tipos litológicos, são fundamentais para estabelecer análises preditivas mais precisas sobre o comportamento estrutural das cavidades com a aproximação das operações de lavra.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos com a instrumentação geotécnica remota de uma cavidade natural subterrânea localizada na Mina N4E Norte, operada pela Vale, na Serra dos Carajás, Estado do Pará, e discutir a sua utilização na previsibilidade da distância mínima que as operações de lavra poderão avançar em direção a essa cavidade e similares, em mesma litologia, sem causar impacto negativo irreversível à sua integridade física. Pretende ainda, diante dos resultados obtidos, discutir a validade dos 250 metros de entorno adicional de proteção.

O conjunto de estudos aqui apresentados e discutidos incluem a instrumentação geotécnica, ambiental e sismográfica remota, levantamentos geofísicos e mapeamentos geomecânicos. No caso específico do presente trabalho serão discutidos os resultados obtidos com a instrumentação geotécnica, sismográfica e ambiental remotas.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados por meio da instrumentação remota e monitoramento da cavidade natural subterrânea N4E-0026, localizada no distrito espeleológico de Serra Norte, Província Espeleológica de Carajás, Estado do Pará. Todo o projeto foi devidamente autorizado e acompanhado pelo IBAMA, órgão competente para o

licenciamento da mineração dentro da FLONACA (Floresta Nacional de Carajás). Os monitoramentos foram realizados concomitantemente ao avanço controlado da frente de lavra.

### 2.1. CARACTERIZAÇÃO DO AVANÇO CONTROLADO DA LAVRA

O avanço da lavra na direção da cavidade N4E-0026 foi realizado de 50 em 50 metros, em 04 fases distintas, a partir dos 250 metros de distância preconizados pela atual legislação.

Ao todo foram realizados 75 furos no entorno da cavidade. O explosivo utilizado foi a emulsão bombeável IBENITE, numa porcentagem de composição emulsão/anfo de 70/30 ( $d_c=1,5$ ). A malha de perfuração, os parâmetros de detonação, e os tipos de acessórios, variaram em cada um dos desmontes primários, dentro dos seguintes parâmetros:

- i. diâmetro dos fundos de 10", 6", 4" e 3,5";
- ii. carga por espera variando de 30 a 250 Kg;
- iii. distância do ponto de detonação em relação à projeção horizontal das cavidades variando de 250 até 75 metros;

A técnica de escalonamento da carga máxima por espera em 1 e em 2 *decks* foi utilizada em 19 experimentos, com detonador eletrônico e sem sistema elétrico.

Foi adotado, inicialmente, em todos os experimentos o valor limite de velocidade de pico de partículas ( $V_p$ ) de 20,7mm/s, considerando estudos anteriores realizados em formações ferríferas, mostrando que as ondas sísmicas se propagam, em geral, em faixa de baixa frequência (DIAS et al., 2012) e os limites estabelecidos para  $V_p$  na Norma Técnica Brasileira ABNT - 9.653/2005 – “*Guia para a avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*”. Os limites de  $V_p$  foram medidos no interior das cavidades e nas áreas dos seus entornos por sismógrafos de engenharia marca INSTANTEL.

Considerou-se que 95% das velocidades máximas de pico de partícula, medidas no interior das cavidades, deveriam ser mantidos no limite estabelecido de 20,7mm/s no interior das cavidades. Para qualquer percentual acima dos 95% procedia-se a uma adequação das cargas explosivas antes do prosseguimento do avanço da lavra.

## 2.4. Equipamentos geotécnicos

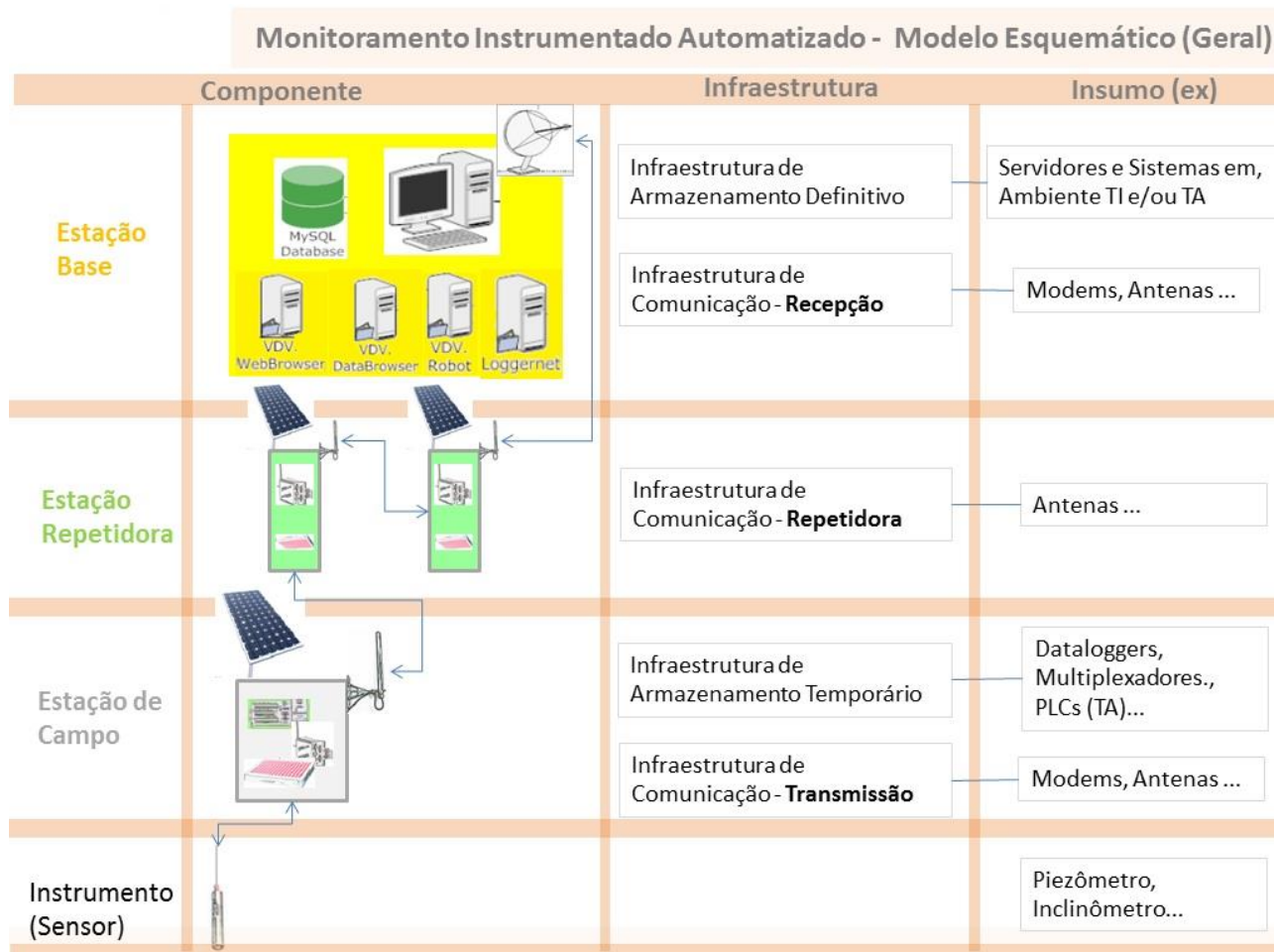
A identificação de formação ou movimentação estrutural não visível (interno à rocha) ou pouco perceptível (microfissura) em paredes e tetos das cavidades situadas no setor norte da mina N4E foi feita a partir de mapeamentos tradicionais e inspeções visuais, à medida que a lavra avançava em direção às cavidades.

O registro dos dados foi feito por instrumentos geotécnicos instalados no interior da cavidade N4E-0026, com transmissão via *web* através de estações de telemetria e repetidoras, que enviam dados de forma contínua, em tempo real, para o servidor de banco de dados. Os dados são percebidos por um *software* especialista (Vista Data Vision) que trata e atualiza relatórios e gráficos de controle automaticamente, disponibilizando os resultados via internet, disparando alertas para celulares, caso haja alguma movimentação estrutural discrepante dos valores base previamente definidos.

Os principais instrumentos e equipamentos instalados e suas aplicações foram:

- Ω *Crackmeter Geokon 4420* (medidor de fraturas): registra alteração de qualquer tipo de abertura estrutural. Adequado para monitorar fendas, fraturas ou fissuras em paredes e tetos rochosos;
- Ω *Convergencemeter Geokon 4425* (medidor de recalque): registra alteração de qualquer tipo de deformação estrutural vertical. Adequado para monitorar movimentos teto – piso;
- Ω Sismógrafo de engenharia marca Instatel: registra vibrações sísmográficas;
- Ω Transmissor de Temperatura e Umidade marca *Geokon*;
- Ω Câmera de Vídeo online: registra imagens, disponibilizando vídeos em períodos pré-determinados. Adequado para monitoramento de áreas de maior fragilidade.

Todos os amostradores de dados foram configurados para registrar dados a cada 10 segundos. A Figura 1 a seguir apresenta a estrutura de transmissão.



**Figura 1.** Diagrama tecnológico simplificado da instrumentação geotécnica remota instalada no projeto.



### 3. CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO ESPELEOLÓGICO

A cavidade N4E-0026 desenvolve-se no contato brusco e ondulado entre a canga e a hematita friável (**Erro! Fonte de referência não encontrada.** 2), marcado por descontinuidade erosiva. Desta forma é possível observar teto em canga ou em hematita. As paredes e piso são predominantemente em hematita. A cavidade é rasa, com profundidade média inferior a 10 metros.

A formação ferrífera que hospeda a cavidade apresenta níveis compactos alternados com níveis porosos ou com a trama original totalmente destruída formando agregados de cristais de hematita. Possui *trend* de fraturas N30E/SV, E-W/SV e N-S/SV que condicionam as paredes das galerias da cavidade (Figura 2). A formação ferrífera bandada apresenta-se dobrada (dobras tipo *kink*), com atitude da foliação geral N40W/60NE.

Os perfis geológicos (Figura 3-A), interpretados a partir dos furos de sondagem próximos à cavidade N4E-0026 (Figura 3-B), demonstram que a rocha máfica serve de substrato para as sequências ferríferas. Nota-se mergulho geral para oeste com jaspilitos em profundidade. O contato do jaspilito com a hematita friável é brusco. No interior das hematitas friáveis há corpos de hematita manganesífera. Cortando toda a sequência surgem diques e *sills* em rocha máfica. Estes diques apresentam-se intemperizados mesmo em profundidade. Abaixo da canga geralmente tem-se a hematita friável, mas pode ocorrer também hematita compacta. Observam-se também *sills* de rocha máfica decomposta cortando as sequências de hematita e jaspilito. No meio da hematita ocorrem bolsões de jaspilito.

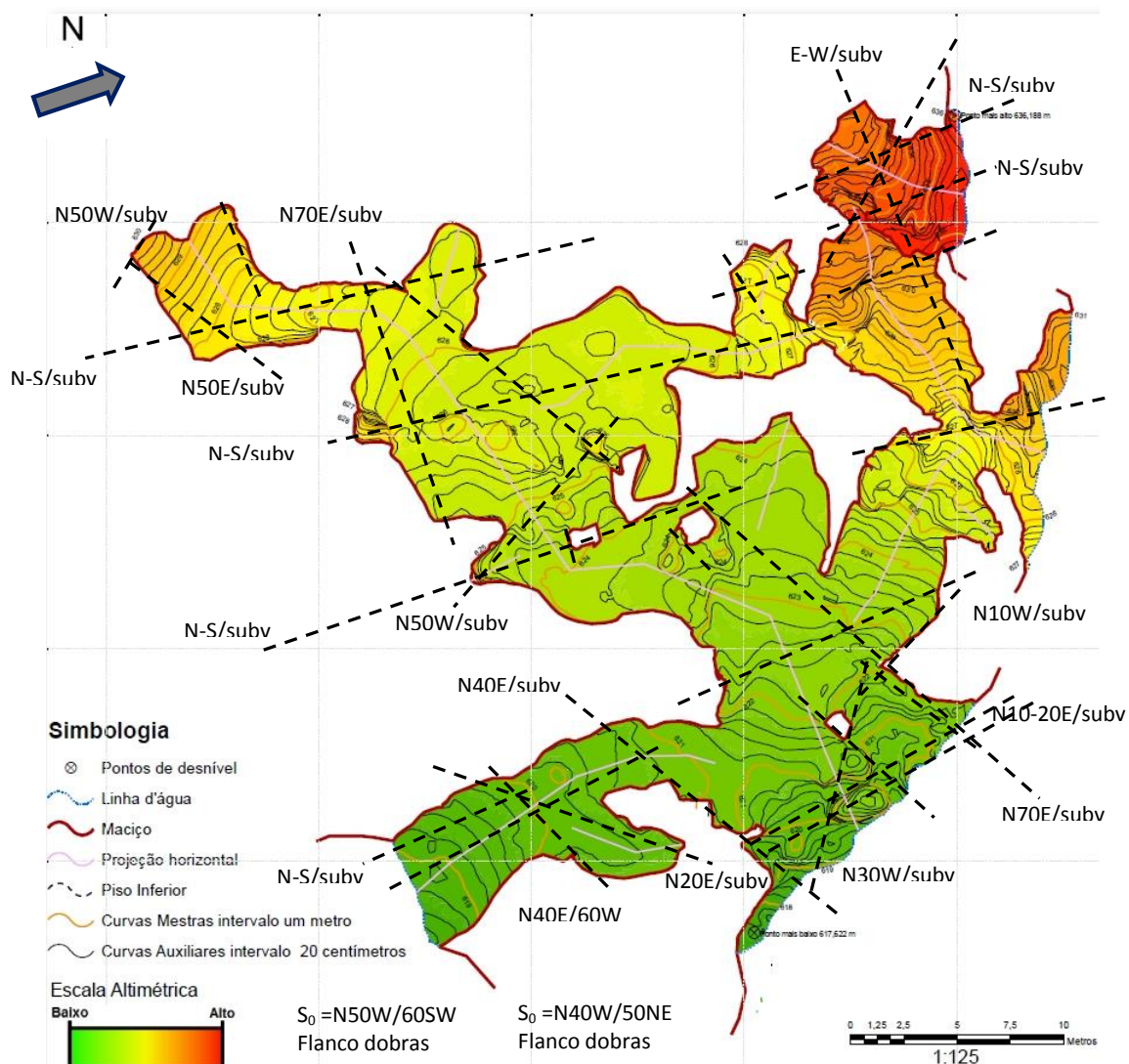
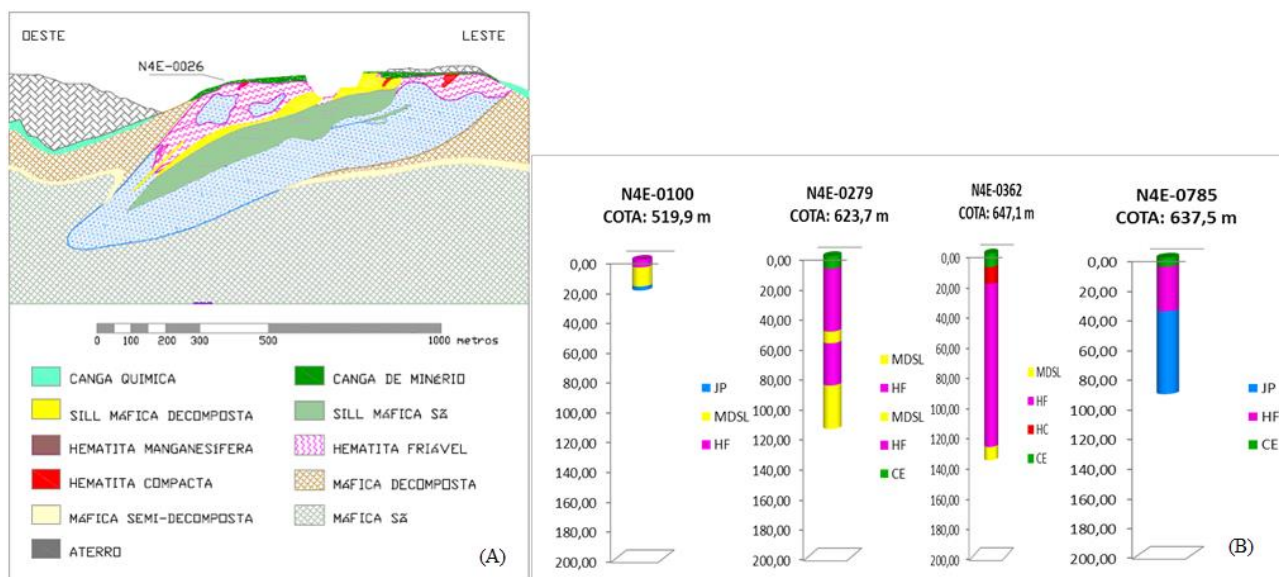


Figura 2. Principais descontinuidades observadas na cavidade N4E-0026.



**Figura 3.** (A) Perfil litológico com a localização da cavidade N4E-0026; (B) Furos de sondagem nas proximidades da cavidade N4E-0026. Legenda: CE = canga estruturada; HC = hematita compacta; HF = hematita friável; JP = jaspilito; MDSL = sill de máfica decomposta.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O monitoramento de fratura existente no teto da entrada da cavidade, realizado com o *crackmeter*, entre meses de setembro e dezembro de 2014, mostrou que os valores de deslocamento tiveram uma variação máxima em torno de 0,003mm, indicando que as estruturas estão estáveis, sem processos de reativação e movimentação no interior da cavidade, muito embora as detonações da lavra estivessem ocorrendo em um raio de 75 metros de distância da cavidade, ou seja, 175 metros a menos do que tem sido considerado como a distância mínima de proteção às cavidades.

Uma constatação importante obtida com os resultados de medidas de fratura foi a sua dependência em relação à temperatura ambiente. Comparando os dados obtidos em períodos diferentes, com oscilações de temperatura distintas, observou-se que a diminuição da temperatura provoca um aumento nos valores medidos no *crackmeter* e vice-versa. Essa diferença foi atribuída à sensibilidade do sensor do equipamento. A Figura 4 apresenta o gráfico de deformação da fratura monitorada na entrada 3 da cavidade, em 01/09/2014, e a Figura 5 os dados do período de 11 a 14 de dezembro de 2014, mostrando o deslocamento da fratura nos dois períodos e a influência da temperatura ambiente nas medidas obtidas.

A constância dos valores registrados e a correlação com a sazonalidade temporal (estações secas e úmidas) indicam que existe uma tendência de manutenção dos dados registrados sem grandes variações significativas, uma vez que a influência das ondas sísmográficas sobre as estruturas das cavidades no setor de experimentos da mina tende a diminuir com o aprofundamento da lavra.

A mesma condição de estabilidade foi observada nas medidas de deformação vertical obtidas por meio do *convergencemeter* (medidor de recalque). A Figura 6 traz o gráfico de deformação vertical em 01/09/2014 de um conduto do Salão dos Morcegos da cavidade N4E-0026.

Note-se que esses dados serão interpretados buscando-se um padrão de valores de deformação e uma relação de intervalos críticos para incluir no sistema de alerta online, onde acima de um determinado deslocamento pode haver comprometimento sobre a resistência da estrutura. Ainda, a eles deverão ser incorporados os dados de estudos geomecânicos e geofísicos gerando relatórios automáticos, que contemplem o cruzamento das diversas variáveis. Esse conjunto de informações será interpretado no *dashboard*, um software especialista da Vista Data Vision. A Figura 7 apresenta um exemplo da tela *dashboard* com os gráficos de monitoramento em tempo real a partir de todas as informações obtidas na cavidade N4E-0026.

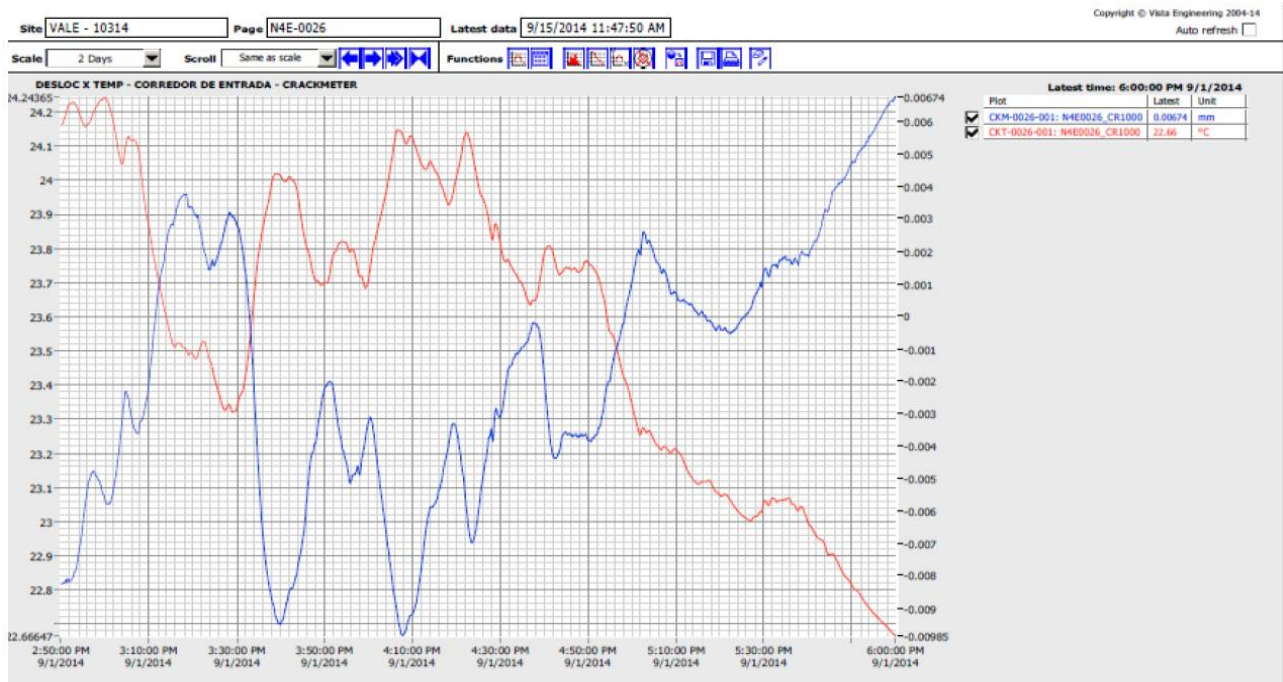


Figura 4. Gráfico de deformação por *crackmeter* de uma fratura monitorada no teto da entrada 3 da cavidade N4E-0026. Linha em azul: movimentação da estrutura em mm e linha vermelha variação da temperatura. Dados obtidos em 01/09/2014.

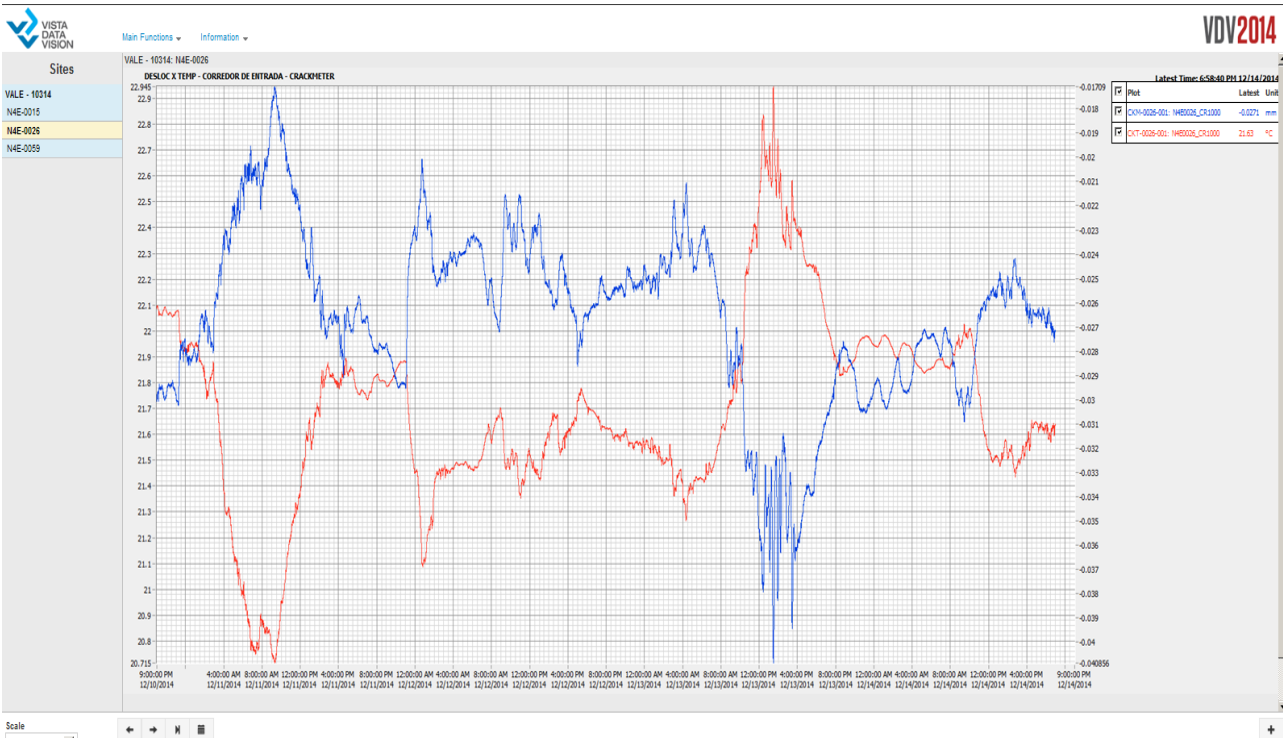


Figura 5. Gráfico de deformação por *crackmeter* de uma fratura monitorada no teto da entrada 3 da cavidade N4E-0026. Linha em azul: movimentação da estrutura em mm e linha vermelha variação da temperatura. Dados obtidos entre 11 e 14/12/2014.



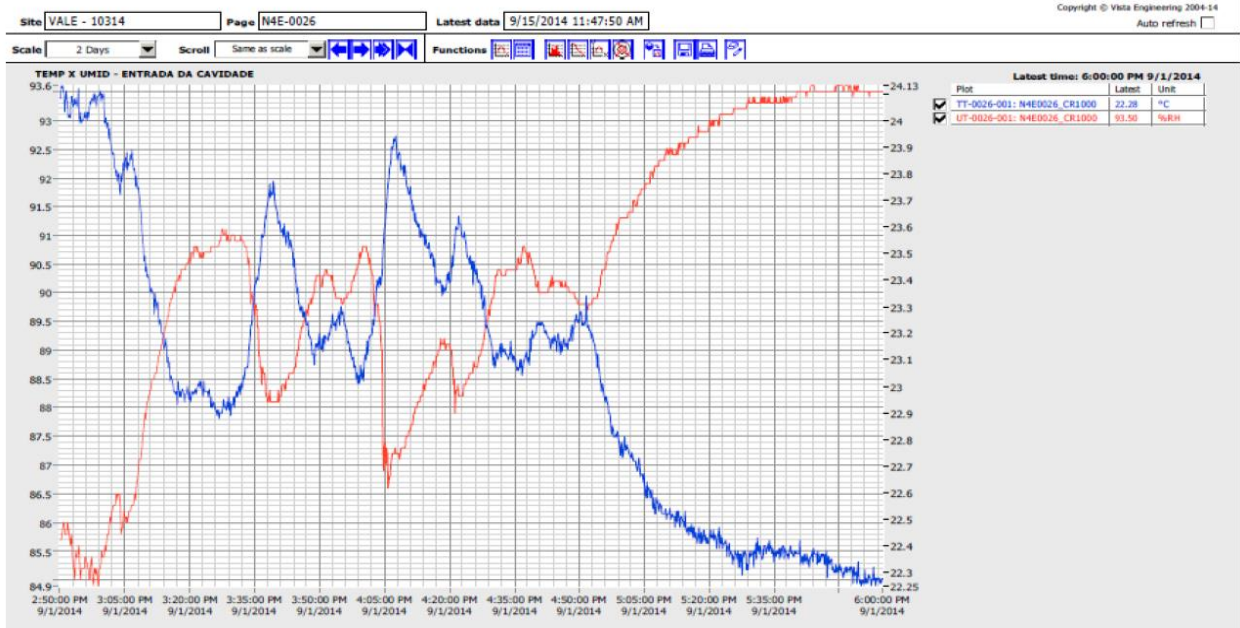


Figura 6. Gráfico de temperatura e umidade de um ponto próximo à entrada da cavidade N4E-0026. Linha em azul: movimentação da estrutura em mm e linha vermelha variação da temperatura. Dados de 01/09/2014.

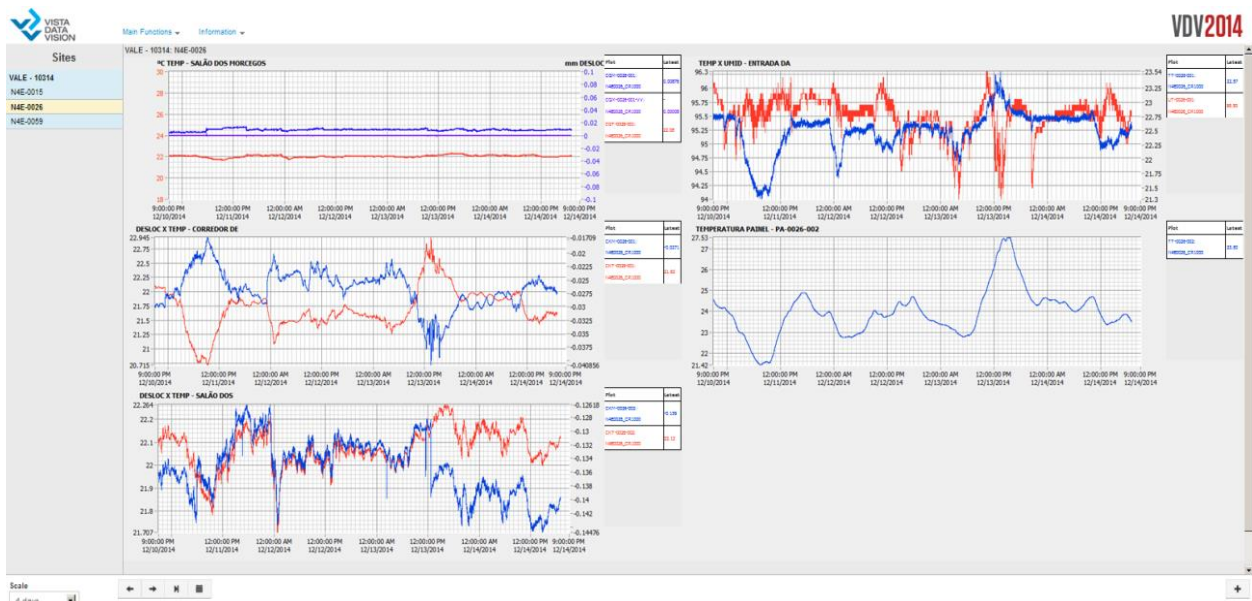


Figura 7. Tela dashboard com os gráficos de monitoramento remoto em tempo real a partir dos dados dos instrumentos instalados na cavidade N4E-0026.

Os valores medidos de velocidade de pico de partícula acima dos valores referenciados inicialmente ( $V_p = 20,7$  mm/s) e a manutenção da integridade física das cavidades demonstram a importância dos estudos e tecnologias de monitoramentos geoestruturais em andamento, o que está permitindo um aumento de cargas adequadas à produtividade da mina, estabelecendo novos parâmetros limites de vibração para a segurança e estabilidade das cavidades.

As cavidades mantêm, mesmo com a proximidade da lava, a característica sazonal das

águas; no período chuvoso surgem goteiras e escorrimentos temporários que cessam de um a dois meses após o término das chuvas. Ou seja, a dinâmica hídrica da cavidade está preservada.

Por fim, faz-se importante ressaltar, que a câmera *online* vem demonstrando grande utilidade, mostrando, em tempo real, o interior de áreas específicas na cavidade, permitindo visualizar diretamente zonas consideradas frágeis e possíveis padrões, além de comportamentos da fauna cavernícola durante os eventos de detonação, conforme mostrado na Figura 8.



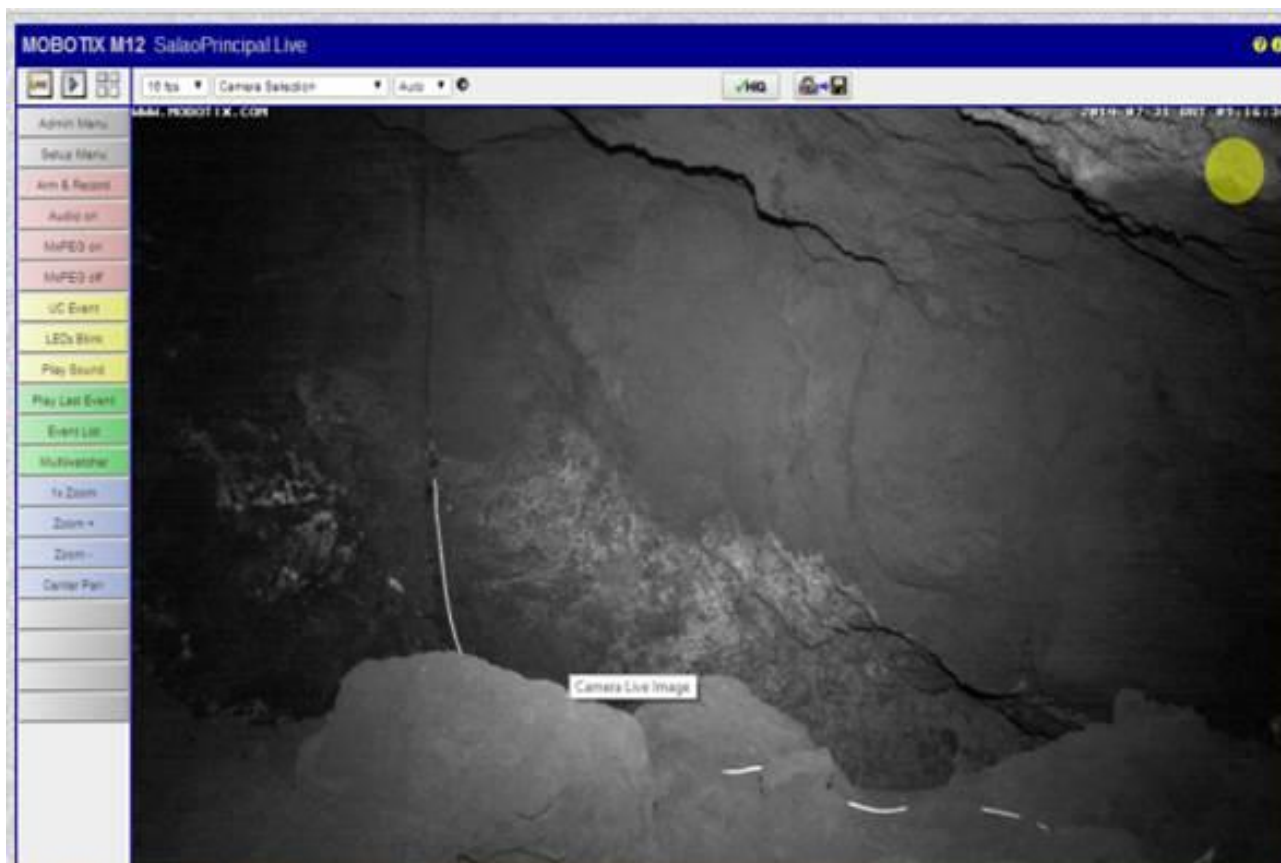


Figura 8. Imagem de um dos salões da cavidade N4E-0026 monitorado online.

#### 4. CONCLUSÕES

O uso de instrumentação geotécnica remota para o monitoramento de zonas estruturalmente frágeis de cavidades naturais subterrâneas, submetidas ao impacto de vibrações provenientes do desmonte de rochas com explosivos, mostrou-se altamente funcional e contribuiu para dar maior segurança ao avanço controlado das operações de lavra, com proteção às cavidades.

No caso específico da cavidade N4E-0026, utilizada como estudo de caso no presente trabalho, medidas de deformação horizontal e vertical, realizadas com o *crackmeter* e o *convergencemeter*, respectivamente, mostraram uma variação máxima de deslocamento de 0,003mm, quando a cavidade foi submetida a vibrações sísmicas, provocadas por desmonte de rochas com explosivos realizado a 75 metros de distância. Este resultado indica que as suas estruturas permaneceram estáveis, sem processos de reativação e movimentação no interior da cavidade, quando submetidas a esses impactos, colocando “em cheque” os 250 metros exigidos pela atual legislação como a distância mínima permitida entre uma atividade de significativo impacto ambiental e uma cavidade natural subterrânea de máxima relevância para proteção da sua integridade física.

Quanto ao monitoramento biológico, não evidenciadas discrepâncias entre as espécies alvo das cavidades foco do trabalho e cavidades controle situadas em uma região isenta de esforços antrópicos da mineração e com mesmas espécies biológicas da cavidade N4E-0026. Da mesma forma não houve alterações significativas dos registros climáticos (temperatura e umidade relativa do ar) das cavidades foco do projeto quando comparadas às cavidades controle. Desta forma, não há evidências que indiquem alterações nas comunidades e no ambiente epígeo, decorrentes das atividades no entorno das cavidades N4E-0026 e N4E-0086.

Tem destaque, neste estudo, a implementação de procedimentos para tomada de medidas geomecânicas inovadoras para ambientes cavernícolas em minério de ferro, focando questões relacionadas à mecânica das rochas e estabilidade geotécnica das cavidades naturais, trazendo conceitos e tecnologias de monitoramento instrumentado da mineração subterrânea. Estes estudos estão trazendo elementos técnicos que permitirão maior previsibilidade de resultados e segurança na estabilidade das cavidades naturais subterrâneas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – NBR-9.365 - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento, 10 p, 2005.
- CARSTE, Espeleologia EIA Global Serra Norte (N4/N5). Diagnóstico e Análise de Relevância, Relatório interno da Vale, 2013.
- DIAS, C. R. C.; ANTONINI, A.; MUNARO, P.; DUTRA, G.; TELES, C. A. S.; BRANDI, I. V.. Equações prognósticas da atenuação das vibrações causadas pelo uso de explosivos em minas de ferro na Serra dos Carajás. In: 46 Congresso Brasileiro de Geologia, Santos - SP, 2012.
- FIELD, M.S.. The QTRACER2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems (Supersedes EPA/600/R-98/156a and 156b, 2/99) Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 179 p., 2002.
- FIELD, M.; WILHELM, R. G.; QUINLAN, J. F.; ALEY, T. J.. An Assessment for the potential Adverse Properties of Fluorescent Tracer Dyes used for Groundwater Tracing. Environmental Monitoring and Assessment 38: 75-96, 1995.
- FILHO, J. G.. Design do objeto: bases conceituais. São Paulo: Escrituras Editora, 2006.
- HILDRETH-WERKER, V. Photographs as Cave Management Tools. In: Cave Conservation and Restoration. 2006 Edition. Huntsville: National Speleological Society, Inc.p. 203-214.
- HOFSTAD, R. S.; DAVIS, S.. Thurston County Intensive Dye-Tracing Method for On-Site Sewage System Evaluations, 8th Northwest On-Site Wastewater treatment Short Course and Equipment Exhibition. Seattle, WA, University of Washington and Department of Health. 1995.
- MILANOVIC, P.. Karst Hydrogeology. Water Resources Publications, Littleton, Col., 434 p., 1981.
- Mohr C.E. & Poulson T.L., 1966 - The Life of the Cave: Our Living World of Nature. McGraw Hill, 232 pp.
- MULL, D.S.; LIEBERMANN, T.D.; SMOOT, J.L.; WOOSLEY Jr., L.H.. Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes, Rep. EPA 904/6-88-001, U.S. Environmental Protection Agency, Atlanta, Ga., 103 p., 1988.
- Poulson T.L. & White W.B., 1969 - The cave environment. Science 165 (3897): 971-981.
- QUINLAN, J.F.. Qualitative water-tracing with dyes in karst terranes, in Quinlan, J.F., ed., Practical karst hydrogeology, with emphasis on groundwater monitoring (course manual): National Water Well Association, Dublin, Ohio, v. 6, p. E1-E24, 1987.
- Woodman R and Others. 2004. Cave Cricket Monitoring Protocol for Mammoth Cave National Park, Kentucky: DRAFT. National Park Service. Mammoth Cave, Kentucky. Unpublished Report-2192467. Unpublished Report. Acessível em: <<http://www.science.nature.nps.gov/im/units/cupn/monitor/cavecrickets.cfm>>.