

## Retroanálise de rompimento de pilar remanescente em câmara de lavra antiga pós recuperação de pilares.

Victor Lui Domingos Diniz Cambraia

Geólogo Geomecânico, Nexa Resources, Paracatu, Brasil, victor.cambraia.vc1@nexaresources.com

Leonardo Pereira da Silva

Coordenador de Geomecânica, Nexa Resources, Vazante, Brasil, leonardo.silva.ls5@nexaresources.com

Dan Mothé Silva

Estagiário de Geomecânica, Nexa Resources, Paracatu, Brasil, dan.silva@nexaresources.com

**RESUMO:** Operada pela Nexa Resources, a mina Morro Agudo utilizou durante anos a técnica de câmaras e pilares como principal método de lavra para extração dos minérios de zinco e chumbo. Recentemente, foram acrescentados os métodos sub-level stoping e recuperação de pilares remanescentes, os quais acarretam no abandono permanente da região não suportada pós lavra. Em outubro de 2023, a unidade experienciou um tremor de relevante intensidade e tempo de duração, provando, após constatação com dados do monitoramento sísmico, ser decorrente de um colapso de teto subsequente da perda de capacidade portante de um pilar remanescente em câmara de lavra antiga. Frente ao evento, iniciou-se uma investigação para dimensionar a evolução do deslocamento durante a fase de acomodação de tensões, quando estalos e desprendimento de fragmentos menores são frequentes até que o estado de tensões entre em equilíbrio novamente. Durante esse período, dados do monitoramento sísmico e inspeções geotécnicas constantes aliadas à modelagem numérica forneceram uma retroanálise acerca da tendência do deslocamento regional antes e depois da perda do pilar, tal como sua influência no crownpillar e escavações permanentes próximas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rompimento de Pilar, Deslocamento, Câmara Remanescente, *Crownpillar*, Modelagem Numérica.

**ABSTRACT:** The Morro Agudo mine, operated by Nexa Resources, applied the room and pillar technique for years as the main mining method for extracting zinc and lead ore. However, recently the company also introduced methods of sublevel stopping and pillar recovering, which results in permanent leaving the unsupported post-mining chamber. In October 2023, Morro Agudo experienced a tremor of significant intensity and duration, which, after verifying seismic monitoring data, proved to be due to a roof collapse after losing support capacity of a remaining pillar in an old chamber. In view of the event, an investigation began to measure the displacement's evolution meanwhile stress accommodation, when popping and fragment detachments are frequent until stresses reach equilibrium again. During this time, seismic monitoring data and constant geotechnical inspections combined with numerical modeling provided a back-analysis on regional displacement's tendency before and after the pillar's loss, as well as its influence on crownpillar and nearby permanent excavations.

**KEYWORDS:** Pillar Break, Detachment, Remaining Chamber, Crownpillar, Numerical Modelling.

## 1 INTRODUÇÃO

No dia 2 de outubro de 2023, a unidade Morro Agudo da Nexa Resources experienciou um tremor de considerável intensidade (Magnitude Momento 1.5), sentido tanto na superfície quanto no subsolo. Este evento foi registrado pelos geofones do sistema de monitoramento sísmico, que, a partir dos dados coletados, conseguiu determinar a localização exata da origem da vibração na mina. (Figura 1).

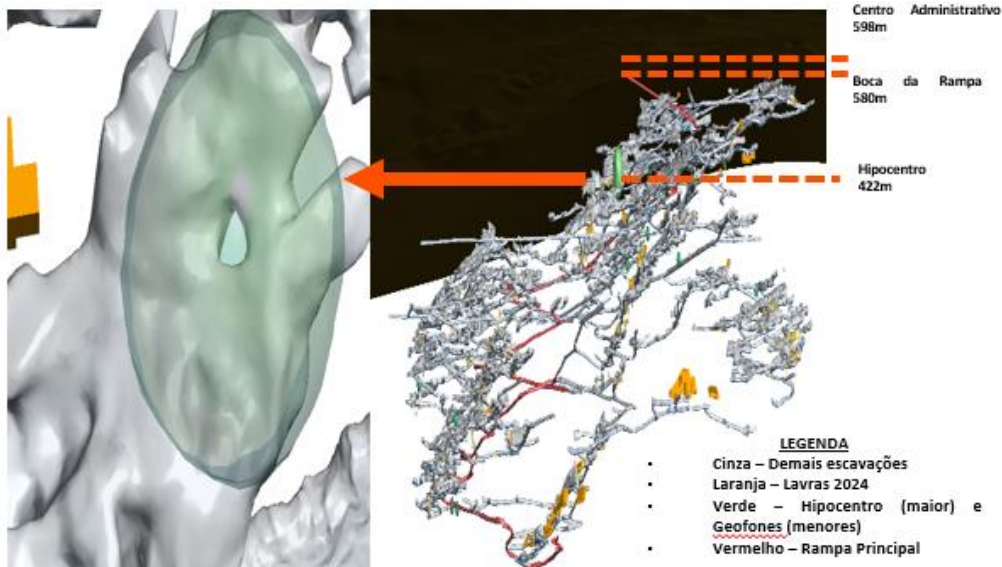


Figura 1: Imagem em planta da localização do hipocentro do tremor captado e visão geral da mina com a localização do hipocentro.

A análise da vibração constatou o rompimento de um pilar remanescente em uma câmara antiga, situada entre os níveis 116 e 183 (aproximadamente 160 metros abaixo da superfície). No passado, a lavra foi realizada neste local utilizando o método de câmaras e pilares, e posteriormente os pilares remanescentes foram lavrados, deixando o local sem acesso.

A averiguação em campo confirmou um grande volume de rocha deslocado do teto ao longo do contato litológico presente (dolarenito e sequência argilo-dolomítica) (Figura 2), subsequente à perda de sustentação causada pelo pilar rompido.



Figura 2: Visita em campo ao local pós ruptura do pilar.

A partir deste evento tornou-se necessário realizar estudos como a tendência da evolução do deslocamento, possível perda dos demais pilares remanescentes na câmara e estabilidade do crown pillar acima. O objetivo, era verificar a influência do evento na superfície e nas escavações vizinhas com acesso de pessoas, uma vez que o monitoramento sísmico continuava captando vibrações menores com frequência no

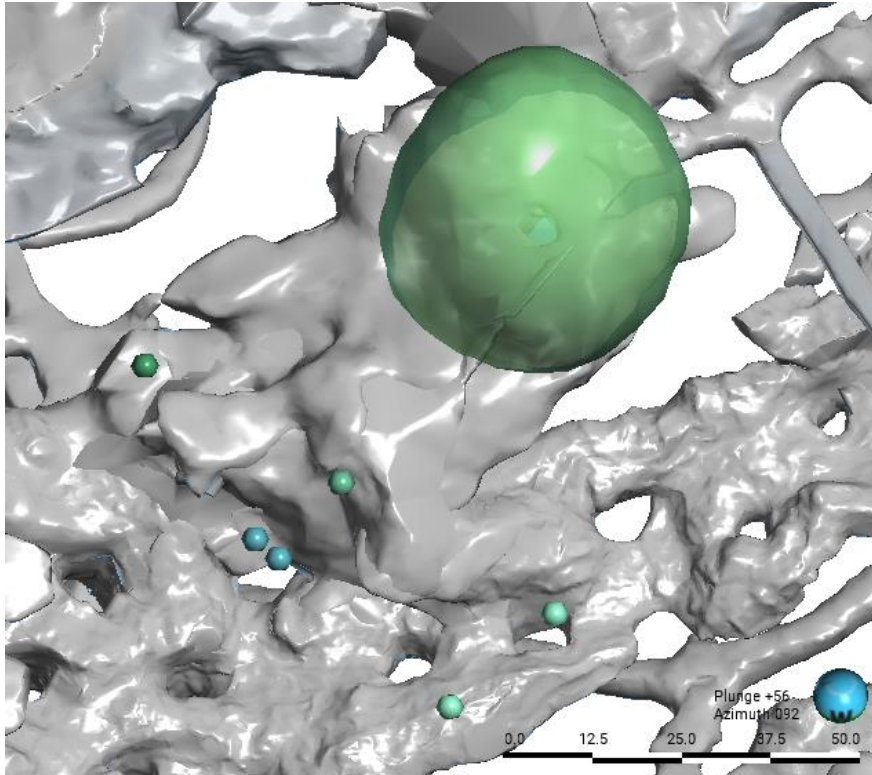


Figura 3: Imagem em planta representativa da ocorrência da perda do pilar e novos eventos menores captados na mesma região

local. nos meses seguintes (Figura 3).

Frente a necessidade de garantir a estabilidade regional dos níveis citados, adotou-se a estratégia de construir um modelo numérico baseado em análise de elementos finitos com uso do software RS3, par que fosse possível verificar o estado de tensões confinantes e de relaxamento ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) e deslocamento total previsto para o momento pós ruptura do pilar nos anos seguintes. Adicionalmente, foram realizadas inspeções geotécnicas constantes na região, de modo que fosse possível validar as tendências apresentadas pelo modelo com as observações em campo.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Sistema de Monitoramento

Para localizar rapidamente o foco da vibração em uma mina antiga e de grandes dimensões, como a de Morro Agudo, foi essencial utilizar dados captados pelo monitoramento sísmico. Esse sistema tem como objetivo fornecer um entendimento das razões e causas das vibrações detectadas, sendo estas, deformações plásticas repentinas gerando ondas captáveis a partir de uma fonte. (MCGARR, 1992).

Segundo Hanks & Kanamori (1979), a unidade utilizada para ilustrar intensidade das vibrações em termos de energia liberada é chamada Magnitude Momento (MMS) possuindo a combinação do módulo de cisalhamento da rocha, área de ruptura da descontinuidade e deslocamento ao longo da mesma. Para quantificar a intensidade das vibrações, as ondas são captadas com uso de geofones uniaxiais e triaxiais, aparelhos que captam o movimento propagado no meio em 3 eixos, vertical, transversal e radial. A partir desta aquisição,

torna-se possível a localização do evento por meio da velocidade e diferença do tempo de captação da onda pelos aparelhos (MENDECKI, 1996).

$$\begin{aligned}
 M_0 &= \mu SD \\
 M_w &= \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 10,7 \\
 M_0 &= \text{Momento sísmico} \\
 \mu &= \text{Módulo de cisalhamento} \\
 S &= \text{Área de ruptura da descontinuidade} \\
 D &= \text{Deslocamento de S} \\
 M_w &= \text{Magnitude Momento}
 \end{aligned} \tag{1}$$

## 2.2 Modelagem Numérica e Análise de Elementos Finitos

De acordo com Jager & Ryder (1999) a modelagem numérica é uma ferramenta utilizada para avaliar o comportamento mecânico de maciços rochosos por meio de equações matemáticas, com representações de geometrias coerentes com a realidade da mina estudada frente a condições submetidas, como estado de tensões e geração de novos vãos de escavação.

A modelagem numérica ainda pode ser subdividida em integrais (elementos de contorno) ou diferenciais (elementos finitos). Para o presente estudo, optou-se pelo uso da análise de elementos finitos. Jager & Ryder (1999) definem a modelagem numérica diferencial como um método de modelar uma porção do maciço dividindo o mesmo com elementos interconectados através de uma malha de pontos, por onde atribui-se as diversas propriedades mecânicas desejadas (em função dos diferentes tipos de materiais presentes). Por fim, para este tipo de modelagem, é necessário atribuir um limite ao mesmo de forma que a computação matemática esteja limitada à zona de interesse do estudo.

## 2.3 Parâmetros de Ruptura

Para iniciar o estudo do comportamento do maciço rochoso através de modelagem numérica é necessário possuir dados referentes à resistência das litologias presentes. Se tratando de análises de comportamentos elasto-plásticos, se utiliza as constantes iniciais como módulo de Young, que mede a rigidez do corpo através da relação entre tensão e deformação em regime de elasticidade, e coeficiente de Poisson, que representa a razão entre alteração dimensional em um eixo frente a contração imposta no eixo oposto.

De acordo com os dados de resistência dos materiais disponíveis acerca das litologias presentes na câmara em questão e mecanismo de falha identificado em campo, optou-se em utilizar o parâmetro de ruptura desenvolvido por Hoek & Brown (1998), onde através da envoltória de ruptura, o modelo é capaz de determinar tensões máximas e mínimas que definem a plasticidade do maciço em questão, tal como deslocamento estimado em função das dimensões do vão presente.

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_1}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \\
 m_b &= m_i e^{\frac{GSI-100}{28}} \\
 s &= e^{\frac{GSI-100}{9}} \\
 \alpha &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{GSI}{15}} - e^{\frac{20}{3}} \right) \\
 \sigma_1 &= \text{Esforço principal máximo para ruptura.} \\
 \sigma_3 &= \text{Esforço principal mínimo para ruptura.} \\
 \sigma_{ci} &= \text{Resistência da rocha intacta a compressão uniaxial.} \\
 m_b, s \text{ e } \alpha &= \text{Constantes do material analisado e dependentes da qualidade da rocha (GSI).} \\
 m_i &= \text{relação entre a resistência a compressão uniaxial e a resistência a tração.}
 \end{aligned} \tag{2}$$



### 3 Desenvolvimento

Para dar início a construção do modelo, foram utilizados dados de escaneamentos antigos da câmara de lava, com o devido tratamento computacional. A partir disso, inseriu-se os dados de entrada referentes às propriedades mecânicas do maciço (Tabela 1).

A partir das observações em campo das inspeções geomecânicas, constatou-se que as litologias presentes possuem tendências elasto-plásticas, de forma que suportam deformações decorrentes das escavações até certo momento, quando atingem o ponto de ruptura. Tal fato, aliado aos dados disponíveis, levam à construção de um modelo baseado no parâmetro de ruptura generalizado de Hoek e Brown, que possibilitará a definição das tensões mínimas e máximas que configuram a envoltória de ruptura para as litologias presentes.

Tabela 1: Dados de entrada para o modelo

| Dados de Input - Resistência dos Materiais |                                      |                         |                 |               |       |       |     |
|--|--------------------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|-------|-------|-----|
| Litologia                                  | Peso Específico (MN/m <sup>3</sup> ) | Coefficiente de Poisson | Módulo de Young | UCS (intacta) | mb    | s     | a   |
| Dolarenito (DAR)                           | 0.0297                               | 0.27                    | 63374.1         | 210           | 3.438 | 0.02  | 0.5 |
| Sequência Argilodolomítica (SAD)           | 0.03                                 | 0.21                    | 38707.2         | 192           | 1.869 | 0.007 | 0.5 |

Ainda antecedendo a etapa de computar os dados e geometrias inseridas no modelo, foi necessário ajustar o domínio do tempo. Ressalta-se que não há registro do início e do fim das lavras no local, portanto, o tempo foi dividido em quatro etapas: A primeira compreende a câmara já completamente escavada, a segunda representa o rompimento do pilar e a terceira e quarta a evolução do deslocamento na região, com um possível recalque em superfície.

Com os primeiros dados definidos, foi dado seguimento a etapa de configuração do estado de tensões, no qual optou-se por tensões gravitacionais. Uma vez que o estado de tensões foi medido em relatório oficial da Golder (2011) obteve-se K1 e K2 através das tensões horizontais e vertical (3.32 e 1.17 respectivamente) juntamente com a orientação do vetor principal. Após o tratamento das geometrias, foi gerada a caixa limitante do modelo (external box) e definidos os limites em que os deslocamentos seriam calculados (restrains). Optou-se por deixar o limite superior aberto, para considerar o possível deslocamento do crown pillar, e limitar os planos apenas com o vetor perpendicular, permitindo que a energia se disperse ao longo das direções paralelas aos limites do modelo. Por fim, a malha de pontos (mesh) foi criada e verificada, ajustando-a bem e minimizando possíveis erros para que os cálculos referentes ao critério de ruptura fossem precisos. (Figura 4).

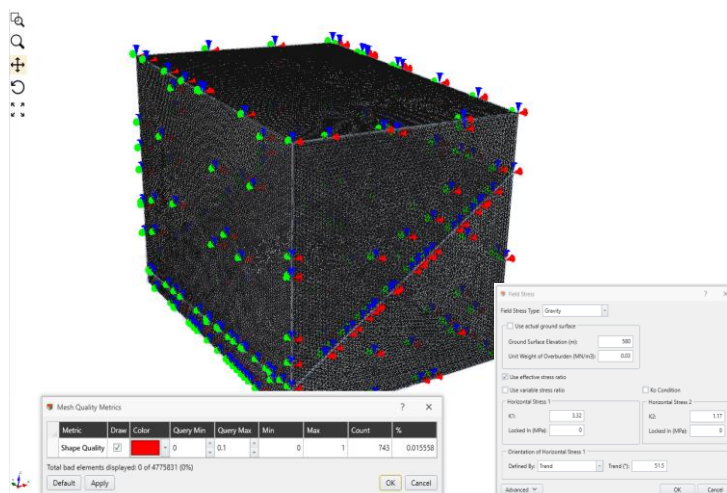


Figura 4: Mesh do modelo, verificação de erros e campo de tensões.

## 4 RESULTADOS

Com a computação dos parâmetros inseridos no modelo, foram criados 5 perfis (Figura 5) afim de observar com mais detalhamento as mudanças no estado de tensão das regiões de interesse na câmara e escavações permanentes. Decidiu-se detalhar o pilar rompido em dois eixos, além dos demais pilares na parte inferior da câmara, e também os pilares próximos à região onde foram captados estalos recorrentes pelo sistema de monitoramento sísmico (Figura 3).

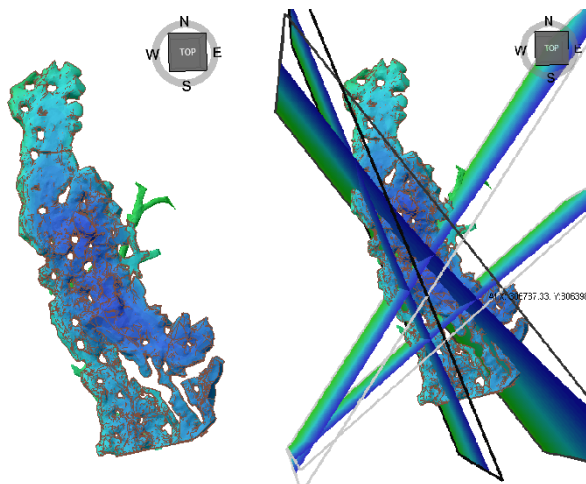


Figura 5: Resultado geral do modelo e perfis gerados.

Na retroanálise focada no pilar rompido, ao avaliar valores abaixo de 0 em  $\sigma_3$ , observa-se uma tendência grande de relaxamento acima do mesmo, seguindo a direção do mergulho do acamamento que se estende para NW (Figura 6). Além disso, a condição de tensão negativa aparenta estar condicionada ao contato litológico entre DAR e SAD, evidenciado por uma linha retilínea nos perfis, indicando que o deslocamento identificado em campo pode ter ocorrido em virtude da diferença de reologia entre os litotipos, que, ao ser submetidos por um desconfinamento da escavação, cedeu por gravidade ao longo do contato. Avaliando o contexto de  $\sigma_3$  nos demais perfis, fica ainda mais perceptível que a condição de relaxamento do maciço intensifica-se em locais onde o teto das escavações está localizado próximo do contato litológico, novamente evidenciado pelo padrão retilíneo da zona destacada no modelo (apenas valores negativos de  $\sigma_3$ ) e circulado em preto na figura 7.

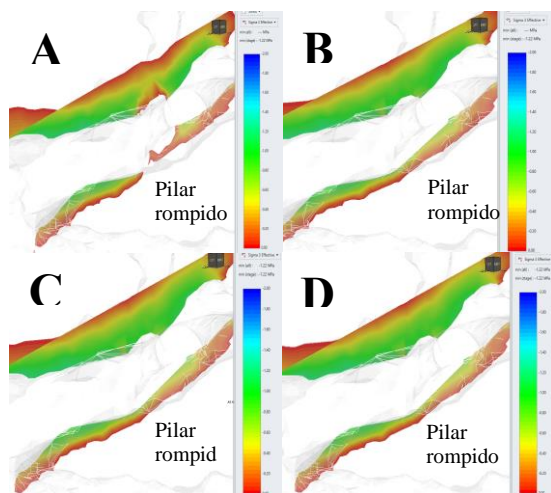


Figura 6: Análise da evolução do relaxamento no maciço acerca do pilar rompido.

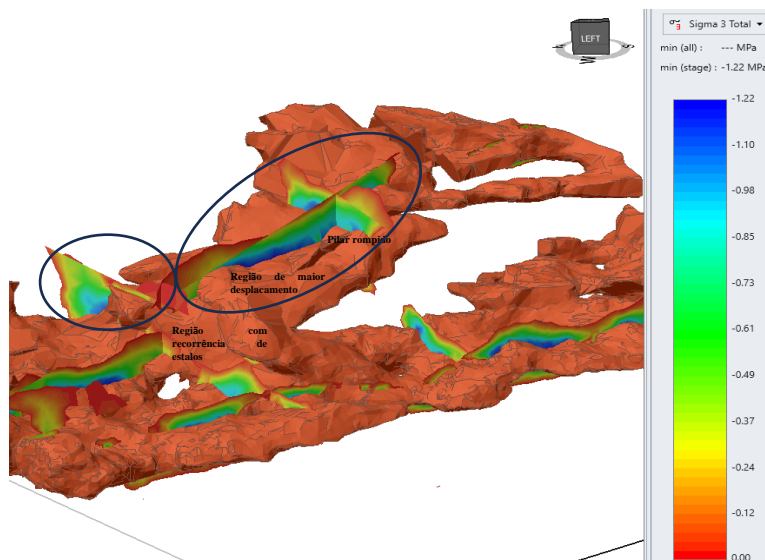


Figura 7: Análise de sigma 3 nos demais pilares.

Seguindo o estudo para avaliar a condição do vetor de tensão principal (Figura 8a), é possível concluir que não houve acúmulo de tensão significativo, uma vez que o modelo fornece valores relativamente baixos (de 20 a 30 MPa) no pilar rompido, o que reforça a ideia anterior onde a causa do rompimento pode ter sido em decorrência do peso acumulado do teto relaxado ao longo de anos, excedendo a capacidade sustentação do pilar. Avaliando as condições de *sigma* 1 nos demais pilares em todas as etapas, percebe-se que reflete a mesma tendência citada e reafirma que não há acúmulo de tensão na câmara, mas sim condição de relaxamento, mesmo tratando-se do vetor de tensão principal (Figura 8b e 8c).

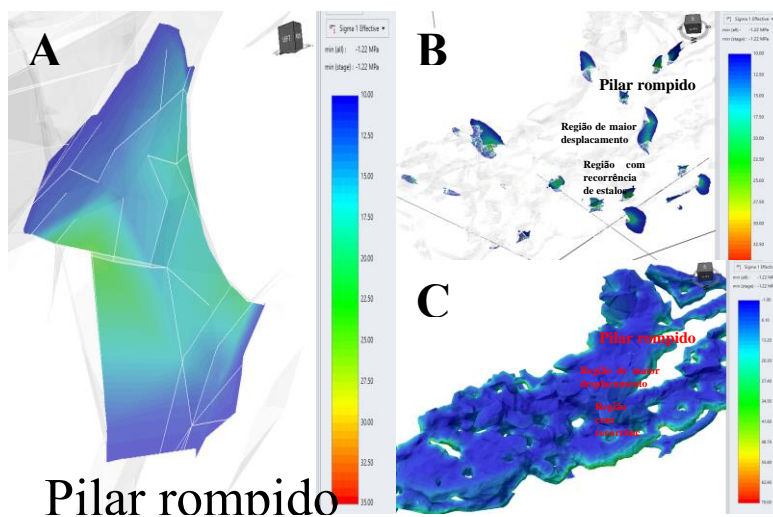


Figura 8a: Sigma 1 no pilar rompido. 8b: Sigma 1 nos demais pilares. 8c: Sigma 1 na escavação total.

Por fim, foi proposto averiguar a condição de deslocamento prevista para o *crownpillar* na última etapa temporal do modelo (Figura 9a). Para averiguar de forma efetiva um possível recalque em superfície é necessário destacar apenas valores negativos no eixo Z, uma vez que este reflete em deslocamento orientado para baixo. Sendo assim, considerando que o limite superior do perfil possui a cota da superfície, conclui-se que deve haver subsidência de 2cm (0.02m) apenas na porção mais SE do modelo. Já as escavações permanentes também não apresentam condição de relaxamento acentuada (Figura 9b).

Também foi verificada a condição de *Strength Factor* ao longo das escavações, no entanto, uma vez que o confinamento em geral é baixo o SF tende a valores satisfatórios.

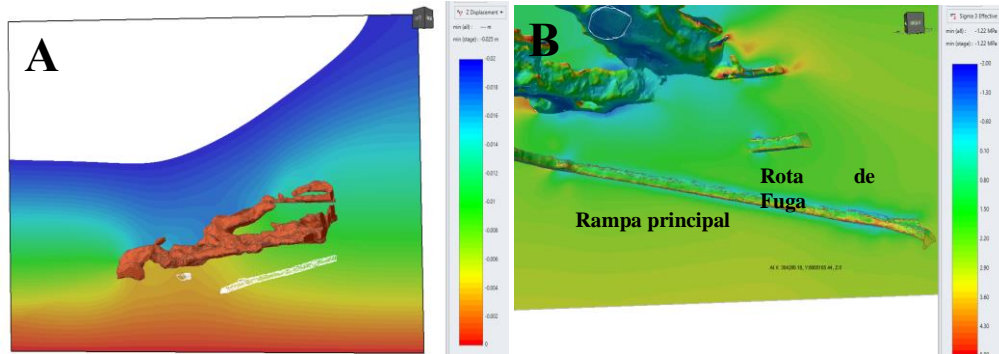


Figura 9a: Deslocamento total no crownpillar. 9b: Sigma 3 em escavações permanentes.

## 5 CONCLUSÕES

Ainda que no passado os métodos de análise fossem menos precisos que os atuais e, tendo em vista que a região estudada foi devidamente isolada após a atividade de recuperação de pilares, não é possível concluir que a lavra tenha sido mal dimensionada, uma vez que rompimentos de matriz rochosa, estalos e deslocamentos experenciados na mina de Morro Agudo ocorrem e permanecem contidos dentro da câmara pós lavra, onde não há acesso de pessoas ou equipamentos, não gerando recalque em superfície e tampouco afetando estruturas permanentes como a rampa principal. Tal situação é confirmada por inspeções em campo e no modelo aqui apresentado. Contudo, ainda que os resultados para escavações permanentes tenham sido positivos, é importante aumentar o nível de segurança por meio de instrumentação em caso de instabilidades.

Como deduzido que algumas regiões da câmara possuem a mesma tendência dos arredores do pilar rompido, é possível que no futuro mais eventos como esse ocorram. Logo, é interessante que se evoluam os estudos acerca do tema através da simulação da possível perda de mais pilares que apresentam a tendência apontada, a fim de verificar um aumento da subsidência prevista para superfície.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todos colaboradores da Nexa Morro Agudo por todo apoio durante o momento de investigação e inspeções na região do pilar rompido (N150 e 183), aos demais autores deste artigo, ao Gabriel Resende e Lucas Guimarães.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hanks, T.C.; Kanamori, H. (1979). *A moment magnitude scale*. Journal of Geophysical Research. p.84.
- Hoek, E.; Brown, E. (1998). *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Engineering Sciences, v.34: p.1165–1186.
- Mendecki, A. J. (1996). *Seismic monitoring in mines*. Springer Science & Business Media. (Ed.).
- Jager, A. J.; Ryder, J. A. (1999). *Rock Engineering Practice – a handbook for tabular hard rock mines*. Johannesburg: The safety in mines research advisory committee (SIMRAC), 371p.
- Golder Associates. (2011). *Medições de Tensões In Situ em Morro Agudo (10-1119-0013)*. Relatório Técnico RT-002\_109-515-3014\_00-B.
- McGarr, A. (1992). *An implosive component in the seismic moment tensor of a mining-induced tremor*. Geophysical Research Letters, 19(15):1579–1582.