

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/777

Análise Numérica De Mapeamento De Danos No Concreto Projetado - Mina Cuiabá, Sabará

Bruna Souza

Geotécnica, AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, bpsouza@anglogoldashanti.com.br

Rodrigo Padula

Especialista em Geotecnia, AngloGold Ashanti, Nova Lima, Brasil, ropadula@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: O termo *squeezing* é utilizado para caracterizar grandes deformações que dependem do tempo, estão relacionadas ao excesso de tensão ao redor das escavações e ao tipo litológico associado (ISRM, 1995). A mina Cuiabá, localizada na cidade de Sabará, Minas Gerais, atualmente desenvolve galerias a mais de 1000m de profundidade, região na qual o maciço tem apresentado *squeezing*, gerando danos ao concreto projetado que atualmente é o principal suporte de superfície aplicado na mina. Nas áreas de maior deformação existe a necessidade de aplicação do telamento devido à alta plastificação do maciço rochoso, consequentemente do concreto projetado em decorrência do *squeezing* promovido pela alta deformação.

Esse trabalho tem foco no estudo de caso da rampa localizada no nível 15 do corpo de minério Balancão (15 BAL RP), a qual está submetida por *squeezing* e apresenta danos com quebras significativas no concreto projetado. Dessa forma, foi estabelecida a metodologia para avaliar o nível de danos no suporte de superfície aplicado ao longo da rampa (concreto e tela), cujo resultado fora utilizado para calibração do modelo numérico realizado no programa MAP3D, parâmetro Rock Condition Factor (RCF), que relaciona a redistribuição de tensão ao redor de uma escavação circular perfeita com o UCS (Uniaxial Compressive Strength) da rocha localizada ao redor da escavação. Portanto, o trabalho permitiu prever pontos da rampa BAL planejada em profundidade, aos quais poderão ocorrer atrasos operacionais com retrabalhos e também apontar a necessidade de estudar uma possível mudança no tipo de reforço-suporte, com capacidade de absorver maior deformação.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Numérica, Mapeamento Geotécnico, Suporte de Superfície, Concreto Projetado, *Squeezing*.

ABSTRACT: *Squeezing* is the term used to characterize large deformations that depend on time, are related to excess stress around the excavations and the associated lithological type (ISRM, 1995). Cuiabá mine, located in Sabará city, Minas Gerais, currently develops galleries at a depth of more than 1000m, a region with *squeezing* mechanism over the rock mass that causes damage on the shotcrete, that is the main surface support applied at mine. In areas with high deformation is applied mesh due to the reduction of the rock mass quality, cracks on the shotcrete as a result of the *squeezing* promoted by the high deformation.

This paper focuses on the case study of the ramp located at level 15 of the Balancão orebody (15 BAL RP), which has *squeezing* conditions and presents damage with significant cracks on the shotcrete. In this way, the methodology was established to evaluate the level of damage to the surface support applied along the ramp (shotcrete and mesh), the result of which was used to calibrate the numerical model carried out in the MAP3D program, parameter Rock Condition Factor (RCF), which relates the redistribution of stress around a perfect circular excavation to the UCS (Uniaxial Compressive Strength) of the rock located around the excavation. Therefore, the research allows to predict regions of the BAL ramp planned in depth, at which operational delays with rework may occur and also highlighted the need to study a possible change in the type of reinforcement-support, with the capacity to absorb greater deformation.

KEYWORDS: Numerical Modelling, Geotechnical Mapping, Surface Support, Sprayed Concrete, *Squeezing*.

1 INTRODUÇÃO

A partir do aprofundamento das escavações subterrâneas, espera-se que o nível de danos no maciço e suporte de superfície aplicado sejam maior que em regiões mais rasas devido ao aumento da tensão, sendo ela natural ou induzida a partir de mais escavações ao redor. Durante o desenvolvimento da rampa Balancão (BAL) entre os níveis 15.1 e 16.1, por volta de 1000 metros de profundidade, as atividades de desenvolvimento

foram interrompidas diversas vezes devido ao nível de quebra, risco de queda dos blocos de concreto e necessidade de reabilitação com reaplicação de concreto projetado.

Com a chegada da rampa do corpo BAL a 1000 metros de profundidade, nível 15, interpretou-se que as galerias entraram em uma zona de tensão mais elevada que as áreas anteriormente conhecidas nos níveis superiores desse mesmo corpo de minério, condição a qual foi experimentada apenas no nível 18 dos corpos Fonte Grande Sul (FGS) e Serrotinho (SER). Comparativamente, a rampa do corpo BAL é desenvolvida em um xisto bastante foliado e com venulações de quartzo (52 MPa), enquanto as rampas dos corpos FGS e SER são desenvolvidos em um metabasalto, menos foliado e com o dobro de resistência média (104 MPa). Baseado nisso, espera-se que nos corpos BAL sejam vivenciados níveis de estresse mais elevados que FGS e SER em profundidades equivalentes.

Com o intuito de quantificar o dano observado nas galerias, foi aplicada a metodologia de Mapeamento de Danos de Suporte de Superfície, a qual considera parâmetros de danos no concreto projetado e nas telas instaladas. Além disso, para dimensionar o dano na rampa planejada em profundidade, com objetivo de prever retrabalhos e atrasos no plano de produção, foi realizado um modelo numérico elástico no programa MAP3D que foi calibrado a partir do mapeamento de danos realizado no 15 BAL rampa.

2 METODOLOGIA

2.1 Mapeamento de Danos de Suporte de Superfície

Com o intuito de aumentar a compreensão sobre o comportamento do maciço rochoso, foi aplicada uma metodologia para medir a evolução dos danos no suporte de superfície dos níveis 15 a 16, 1000 a 1100 metros de profundidade, respectivamente. Neste método é dada uma classificação a quatro parâmetros: zona de dano coberta pelo concreto projetado, espessura das fissuras, carregamento da malha e exposição dos parafusos; no final, a soma da classificação é associada a uma zona de dano. Nas Tabelas 1 e 2 é possível observar os parâmetros e suas classificações e a zona de dano.

Tabela 1 . Parâmetros usados para classificação de danos no Mapeamento de Danos de Suporte de Superfície.

SUPORTE DE SUPERFÍCIE											
CONCRETO PROJETADO					TELA			REFORÇO (TIRANTES RESINADOS)			
Zona de dano do concreto	%	Nota	Trincas	Espessura (cm)	Nota	Carregamento	Deslocamento	Nota	Dano	Exposição	Dano
	0	40		0	40		<1 m	20		Sem dano	20
	0 - 20	30		< 0.5	30		1-2 m	10		< 30cm	10
	20 - 40	20		0.5 < e < 1	20					> 30cm	0
	40 - 60	15		1 < e < 2	15		> 2	0		> 30cm	0
	60 - 80	10		2 < e < 4	10						
	80 - 100	5		> 4	5						

Tabela 2. Zonas de dano baseadas nos parâmetros mapeados.

Zona de dano	
Sem dano	80-120
Dano baixo	60-80
Dano moderado	40-60
Dano alto	20-40
Dano extremamente alto	0-20

2.1.1 Zona de dano do concreto

O primeiro parâmetro de classificação baseia-se quantificação da extensão da zona de dano do concreto projetado em seção transversal à galeria. Dessa forma, são medidos o comprimento total da seção transversal na galeria e o comprimento do dano ao concreto projetado e, a seguir, calcula-se o percentual de dano ao suporte na seção transversal. O percentual de dano é correlacionada através da Tabela 1 com sua respectiva nota. São definidos seis graus de classificação: uma galeria sem danos ao concreto projetado, por exemplo, tem pontuação igual a 40, por outro lado a galeria com danos entre 80% e 100% tem nota 5. Isso significa que o grau inferior corresponde a maior dano ao concreto projetado (Padula, 2019). A Figura 1 ilustra a metodologia aplicada.



Figura 1. Seção transversal típica para medição da zona de dano no concreto projetado.

2.1.2. Trincas no concreto projetado

O segundo parâmetro de classificação é baseado na quantificação das espessura das trincas do concreto projetado, uma vez que as trincas comumente observadas no suporte se iniciam devido ao processo de deformação do maciço rochoso. Se a energia transmitida ao concreto projetado for maior que a capacidade de absorção deste suporte, será possível observar fissuras começando com pequena espessura que podem aumentar com o tempo. Assim, através da Tabela 1, é possível definir a nota desse parâmetro por região. A Figura 2 ilustra exemplos de trincas de diferentes espessuras e classificações.



Figura 2. Trincas de diferentes classificações no concreto projetado.

2.1.3. Deslocamento da tela

O terceiro parâmetro considera áreas onde um segundo suporte de superfície, nesse caso telas de aço galvanizado, foi instalado sobre o concreto projetado. Diferentemente do concreto, o qual apresenta um comportamento rígido e tende a trincar a partir da absorção de energia (conforme destacado no item 2.1.2), a tela produzida em material metálico, tende a apresentar um comportamento plástico e deformar-se junto ao maciço. Com uma capacidade de carga de aproximadamente 4,5 toneladas, o suporte é solicitado e os fios são tracionados até que a carga máxima para rompimento do material seja atingida e danifique o sistema. A Figura 3 ilustra um exemplo de deslocamento da tela em subsolo e a correlação entre nota e deslocamento são destacados da Tabela 1.



Figura 3. Trecho de solicitação da tela indicando deslocamento do suporte.

2.1.4. Exposição do reforço (tirantes resinados)

O último parâmetro de classificação baseia-se na quantificação da exposição dos tirantes em áreas danificadas pela remoção do concreto projetado, seja ela intensional ou não. Assim, o comprimento do tirante exposto foi medido e correlacionado através Tabela 1 com notas para classificação. Há 3 graus de classificação: uma galeria sem tirantes expostos, por exemplo, tem nota igual a 20. Por outro lado, a galeria com danos maiores que 30 cm tem nota 0 (Padula, 2019). A Figura 4 ilustra a exposição de tirantes em galeria danificada.



Figura 4. Exposição de tirantes resinados em zona de plastificação do concreto projetado.

3 ESTUDO DE CASO – 15 BALACÃO RAMPA

O primeiro mapeamento de danos foi feito em fevereiro/22 e não foram observadas áreas danificadas relevantes além das regiões reabilitadas no período de novembro/21 a fevereiro/22 antes da aplicação do telamento (Figura 5).

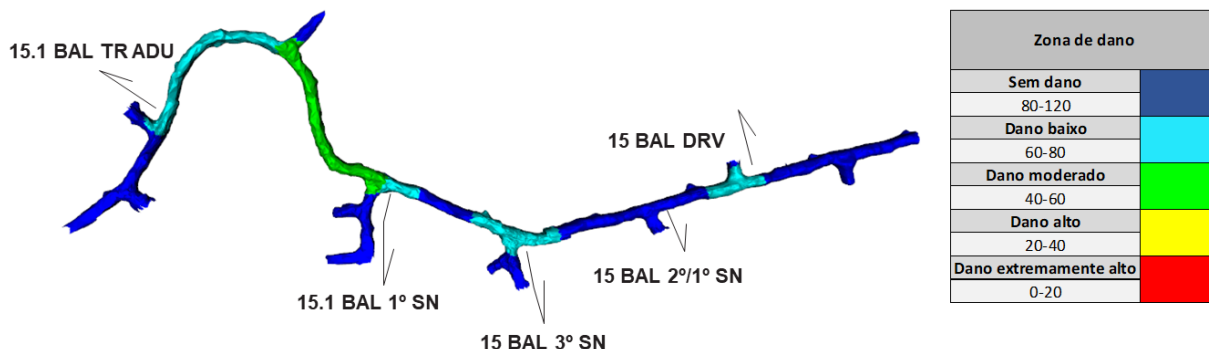


Figura 5. Primeiro mapeamento de danos realizado no 15 BAL RP (Fevereiro/22).

A primeira atualização do mapeamento foi feita em agosto/23, quando a maior parte da lavra do 15.1 BAL 2º SN LE já havia sido realizada (40 a 50 metros de pilar entre lavra e rampa), e apenas os slots do 15.1 BAL 1º SN LE e 15 BAL 3º SN LE haviam sido detonados (pilar de 50 e 45 metros, respectivamente).

A principal diferença entre o primeiro e o segundo mapeamento ocorreu abaixo do acesso ao 15.1 BAL 1º SN, em que a maior parte da área foi avaliada como sem danos e dano baixo a moderado. É importante mencionar que a área em que apenas tela foi aplicada (sem concreto projetado) não apresentou danos relevantes ao maciço rochoso ou ao suporte de superfície. A Figura 6 ilustra a atualização do mapeamento de danos.



Figura 6. Atualização do mapeamento de danos no 15 BAL RP (Agosto/23).

Em outubro/23 durante nova inspeção na rampa, foi constatada uma importante evolução de danos entre 15 BAL DRV e SUMP, associada à influência da lavra 15.1 BAL 1° SN LE e 15 BAL 3° SN LE e, na ocasião, foi recomendada paralização e reabilitação do trecho. Entretanto, nenhum mapeamento de danos foi feito neste momento.

No dia novembro/23 foi realizada a segunda atualização do mapeamento devido ao aumento significativo dos danos ao concreto projetado. Notou-se que a situação entre 15 BAL 1°/2° SN e 15 BAL DRV agravou-se e o acesso foi restringido abaixo desta área. A velocidade de deformação foi superior à esperada e entende-se isso está relacionado aos realces de 15.1 BAL 1° SN LE e 15 BAL 3° SN LE. Com base nas datas de lavra, é possível constatar que os danos na rampa acompanharam as áreas desmontadas. A Figura 7 ilustra a versão atual do mapeamento de danos.

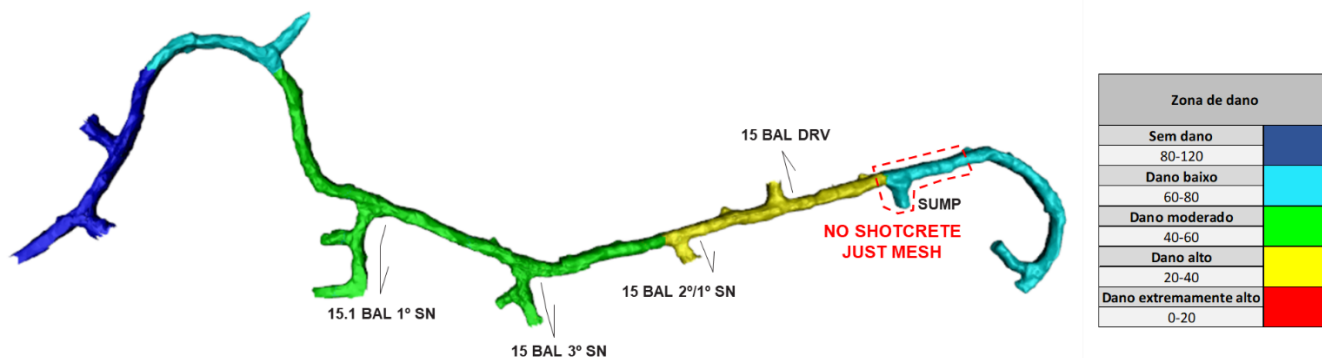


Figura 7. Segunda atualização do mapeamento de danos no 15 BAL RP (Novembro/23) e fotos típicas dos danos no suporte.

4 MODELO NUMÉRICO

Foi construído um modelo numérico elástico usando elemento de contorno no software MAP3D, permitindo análises de tensão-deformação, com objetivo de verificar o dano ao redor da escavação do 15 BAL RP. De acordo com Hofmann (2021), para correlacionar a tensão elástica modelada com a ruptura do maciço rochoso em escavações subterrâneas, considera-se necessário quantificar os parâmetros de modelagem ao redor do túnel, levando em conta principalmente a tensão induzida.

O parâmetro Rockwall Condition Factor (RCF) permite analisar possíveis danos ao redor de uma escavação subterrânea, pois correlaciona a tensão induzida em torno do perímetro de um túnel circular com a resistência do maciço rochoso. O RCF (Equação 1) é definido como uma razão entre a tensão induzida para escavações circulares e a resistência do maciço rochoso.

$$RCF = \frac{3\sigma_{1i} - \sigma_{3i}}{f \times UCS} \quad (1)$$

Sendo: σ_{1i} e σ_{3i} as tensões in-plane máximas e mínimas respectivamente, UCS (resistência à compressão uniaxial da rocha ensaiada em laboratório) e f sendo o fator de degradação de UCS para estimar o valor da resistência do maciço rochoso. De acordo com Jager (1999), $f = 1$ pode ser usado para rochas competentes, que foi a orientação para esse estudo. A Figura 8 mostra comparação de UCS com indicação de breakout em furo de sonda.

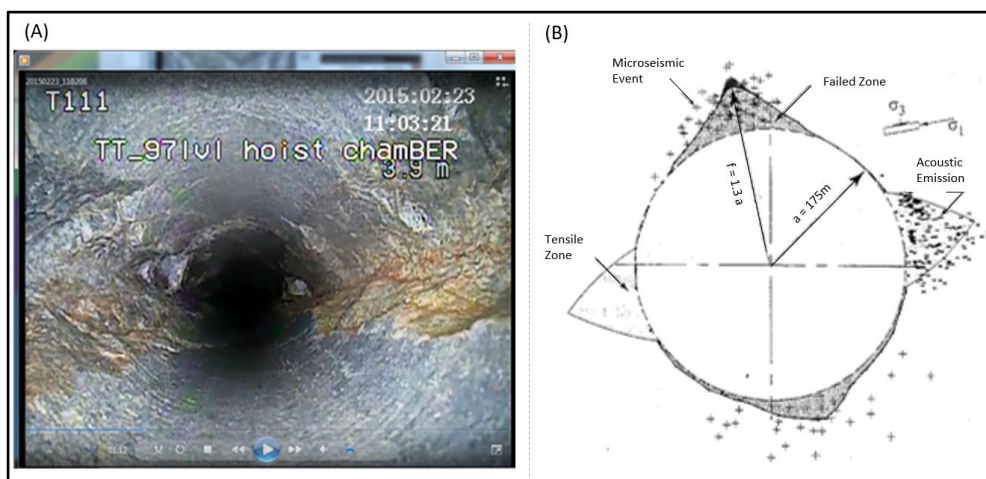


Figura 8. Quebra de breakout em furo de perfuração. (A) Imagem de furo de filmagem e (B) Imagem esquemática indicnado a quebra de breakout em furo circular (Hajiabdolmajid, 1999).

A investigação através do modelo numérico visa estabelecer se o mecanismo de dano dominante está relacionado com o fraturamento perpendicular ao componente principal de tensão no plano circular. Os danos devem então ser categorizados em diferentes classes com base em observações e correlacionados com os valores de RCF para derivar uma previsão de danos para desenvolvimento para litologias semelhantes. Dessa forma, presume-se que a condição de deformação plana é a principal condutora de danos no maciço rochoso ao redor das escavações subterrâneas.

Sendo assim, a abordagem considerada para estimar o dano no 15 BAL RP foi o método de avaliação através da análise do RCF, o qual teve o resultado calibrado pelo mapeamento de danos no concreto projetado realizado no mesmo trecho do limite do modelo numérico (item 2.1), cuja comparação pode ser visualizada na figura a seguir:

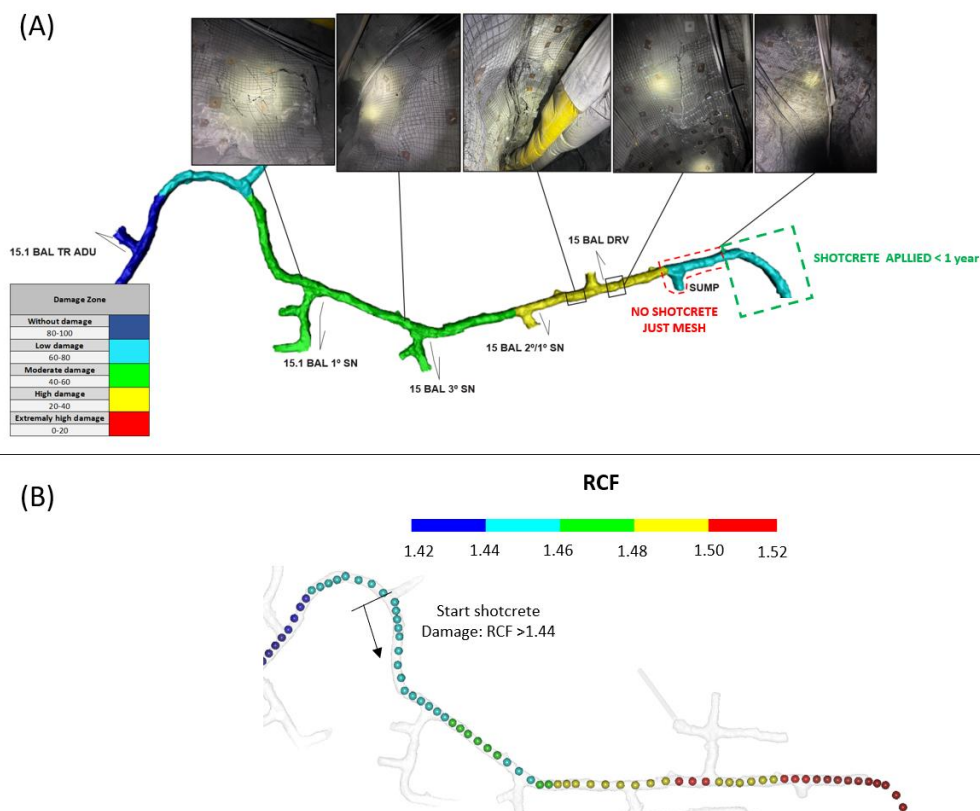


Figura 9. (A) Mapeamento de danos realizado no 15 BAL RP. (B) RCF_Re-Calc considerando o modelo litológico disponibilizado pela equipe de Geologia de Mina (MAP3D).

A Figura 9 representa o mapeamento de danos (9A) comparado com o resultado do modelo numérico (9B – RCF) ao longo do 15 BAL RP. Conforme descrito, é importante mencionar que constantes reabilitações de concreto projetado ocorreram ao longo deste trecho da rampa e o primeiro mapeamento de danos realizado foi em fevereiro/2022. A Figura 9-A mostra o mapeamento de danos feito em novembro/2023 e indica longa extensão com danos elevados (valores entre 20-40), localizados entre 15 BAL 2º SN e 15 BAL 1º SN e entrada para captação de água (SUMP). As imagens mostram fissuras no concreto projetado e altas deformações pontuais. O mesmo trecho na Figura 9-B apresenta valores de RCF superiores a 1,48. Importante destacar que outros trechos sofreram danos históricos com retrabalhos, fissuras de concreto projetado e pequenos blocos de concreto projetado foram submetidos a malha de carregamento pontual localizada. Nestas partes o modelo numérico apresenta valores de RCF entre 1,44 e 1,49.

Embora a Figura 9-B apresente uma pequena diferença na escala de RCF, deve-se observar que RCF = 1,44 corresponde a um nível de tensão e deformação que pode causar fissuras no concreto projetado e iniciar danos nas galerias. Portanto, para definição prévia de galerias planejadas pode se utilizar o valor limite (RCF até 1,44) como base de conhecimento para evitar danos ao concreto projetado. RCF superior a 1,44 pode resultar em danos ao concreto projetado, retrabalho e atraso no desenvolvimento e, portanto, impacto no plano de produção.

O trecho em destaque vermelho na Figura 9-A (ao lado do *sump*) mostra baixo dano ao telamento local e está correlacionado com alto valor de RCF (aproximadamente RCF = 1,5). Importante destacar que esta região não foi suportada com concreto projetado, apenas houve instalação de tela. O alto valor de RCF indica alta deformação, porém, o reduzido dano à tela pode ser explicado devido à capacidade da mesma em deformar e absorver mais energia quando comparada ao concreto projetado. Por outro lado, o concreto projetado pode trincar e quebrar sob alta deformação, perdendo sua eficácia e criando seus próprios blocos de concreto projetado. A imagem apresenta uma área em destaque verde (parte final da Figura 9-A) que indica mapeamento de baixo dano e o mesmo trecho da Figura 9-B apresenta alto valor de RCF (entre 1,50 e 1,52). Este contraste pode estar associado ao tempo de aplicação do concreto projetado e à execução do mapeamento de danos. Especificamente neste caso, o mapeamento de danos havia sido feito há menos de 1 ano de aplicação de concreto projetado. De modo geral, a correlação entre o mapeamento de danos e a modelagem numérica mostra

que trechos com $RCF > 1,44$ podem produzir danos ao concreto projetado e recomenda a aplicação de tela sem concreto projetado.

5. CONCLUSÃO

O artigo mostra de forma clara e objetiva que o mapeamento de danos no concreto projetado foi fundamental para a calibração do modelo numérico construído no programa MAP3D, que levou em consideração o parâmetro de análise RCF como *output* e base da análise técnica. O estudo também mostra que a modelagem numérica pode ser aplicada para avaliar as condições da rampa BAL planejada em profundidade, com precisa indicação de pontos da rampa que existe a necessidade de aplicação de suporte de superfície que absorva maior energia. Observaram-se que escavações suportadas com concreto projetado, com valores de $RCF > 1,44$ apresentaram danos e quebras nesse tipo de suporte de superfície. Por outro lado, local com resultado de RCF próximo de 1,5 em um dos pontos escavados na mesma rampa, que estava contido apenas com tela, não se observou danos nesse suporte de superfície. Sabe-se que suportes de superfície como a tela tem maior capacidade de deformação que aqueles mais enrijecidos como o concreto projetado. Dessa forma, a principal conclusão desse artigo é de mostrar que áreas que apresentarem $RCF > 1,44$ e que forem suportadas por concreto projetado tem grande chance de apresentar danos e, portanto, para locais com esses valores de RCF deve ser suportado por suporte de superfície que absorva maior energia e uma das opções para a mina Cuiabá é a aplicação da tela atual, que se apresentou em boas condições mesmo para valores de $RCF = 1,50$. De toda forma, destaca-se a importância de dar continuidade a esse estudo, com foco nos seguintes itens:

- Estudar o aumento do valor de RCF para a rampa avaliada em níveis mais profundos;
- Diante do item anterior, é necessário avaliar a capacidade de deformação da tela atualmente aplicada em CB pois, em maior profundidade o aumento deformacional (squeezing) sofrido pelo maciço rochoso pode ultrapassar a capacidade de absorção de energia que essa tela suporta e, sendo assim, a plastificação do maciço por trás do telamento aplicado volte a ser o problema principal da instabilidade nas escavações de rampa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

G. Hofmann. *AGA Elastic Numerical Modelling Framework and Design Criteria*, 2021.

Padula, R. *Method to execute damage mapping in the support and reinforcement of underground mines. Case study: Cuiabá mine - Sabará, MG/Brazil*. Paper presented at the 14th ISRM Congress, Foz do Iguaçu, Brazil, September 2019.

V. Hajiabdolmajid, P.K. Kaiser, C.D Martin. *Modelling brittle failure of rock*. Geomechanics Research Centre, Lurentian University, Sudbury, Ontario, Canada P3D 6B5.

Villaescusa et all. *In-situ stress measurements using oriented core - A comparison of uniaxial vs triaxial Acoustic Emission results*, 2003.

W. Jager, *Modelling consumer behavior*. Thesis, University of Groningen, 1999.