

## ESTIMATIVA DE PARÂMETROS DE DEFORMABILIDADE E TENSÕES IN SITU POR RETROANÁLISE DE UMA RUPTURA EM MINA A CÉU-ABERTO

Ingrid Neves Brandão <sup>1</sup>; Milene Sabino Lana <sup>2</sup>

**Resumo** – O setor de mineração tem sido palco de muitas transformações nos últimos anos e a busca pela melhor compreensão do comportamento geotécnico dos materiais continua crescente. As soluções por equilíbrio limite são muito corriqueiras na rotina de avaliação da estabilidade de taludes; porém em alguns casos o entendimento das deformações a que o maciço está submetido é fundamental, principalmente porque o setor mineral caminha para cenários de lavras cada vez mais profundas. As análises por tensão-deformação exigem a entrada de parâmetros não somente de resistência, mas também de parâmetros elásticos das rochas em questão e das tensões iniciais. Os parâmetros de deformabilidade, bem como os parâmetros de resistência podem ser obtidos através de ensaios geotécnicos de laboratório e/ou a partir de correlações geomecânicas. Mas em se tratando de rochas brandas de minério de ferro, há uma dificuldade intrínseca na amostragem, no ensaio e na interpretação dos resultados. Este trabalho apresenta uma estimativa de parâmetros elásticos e tensões in situ utilizando modelagem numérica pelo método de tensão-deformação através da retroanálise desses parâmetros em uma mina a céu-aberto de ferro, num evento que causou a mobilização de cinco bancos de 10m de altura cada. A calibração dos parâmetros foi feita utilizando o deslocamento medido por RADAR.

**Abstract** – The mining sector has undergone many transformations in recent years and the search for a better understanding of the geotechnical behavior of materials continues to grow. Limit equilibrium solutions are very common in slope stability assessment; however, in some cases, the knowledge of the deformations the rock mass are subjected is fundamental, mainly because the mineral sector is moving towards deeper mining scenarios. The stress-strain analyses require not only strength parameters but also the deformability properties and the in situ stresses. The deformability properties, as well as the strength parameters, are usually obtained through lab tests and geomechanical correlations. Nevertheless, in case of soft iron ore rock masses, there is an intrinsic difficulty in sampling, testing and interpreting the results. This paper presents an estimation of the deformability properties and the in situ stresses through numerical modeling, using back-analysis of these parameters in an open pit mine that had an event which caused the mobilization of five 10m height benches. The calibration of the results was achieved through the displacements measured by RADAR.

**Palavras-Chave** – Análise tensão-deformação; mina a céu-aberto; retroanálise.

---

<sup>1</sup> Geól., MSc, Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 999159409, ingrid.brandao@vale.com

<sup>2</sup> Eng., Phd, Prof. Universidade Federal de Ouro Preto: Minas Gerais - MG, (31) 998864034, milene@ufop.edu.br

## 1. INTRODUÇÃO

A avaliação da estabilidade dos taludes das cavas de mineração tem trazido desafios cada vez mais crescentes, pois as cavas estão se tornando mais profundas, sendo necessário um maior conhecimento a respeito do comportamento geomecânico dos maciços rochosos, principalmente em relação às deformações. A geotecnia tem um papel importante no dimensionamento e desenvolvimento dos taludes de mina, pois busca o equilíbrio entre um ângulo máximo dos taludes, onde se tem a menor relação estéril/minério e em contrapartida o atendimento do nível mínimo de estabilidade em todas as etapas do empreendimento mineral.

Os desafios da estabilidade de taludes ficam ainda maiores quando se referem a rochas do tipo brandas, principalmente as que ocorrem nas grandes minas a céu aberto de ferro. As rochas brandas transitam entre um estágio intermediário de rocha dura e solo e são capazes de sofrer grandes deformações devido ao seu comportamento característico, com perda de resistência irreversível ao longo do tempo de exposição. Compreender o comportamento geomecânico dessas rochas por vezes não é tarefa fácil. As análises de estabilidade por equilíbrio limite, que são corriqueiras em taludes de mina, buscam a solução do problema através da resolução de equações de equilíbrio de forças e de momentos, mas não levam em consideração os aspectos deformacionais da rocha.

O interesse em compreender os aspectos discutidos anteriormente, motivou o estudo de caso apresentado neste trabalho, onde através de um evento de ruptura de taludes monitorado por radar de monitoramento geotécnico de um determinado setor de uma mina a céu aberto de ferro, forneceu argumentos e dados para que se pudessem testar algumas hipóteses e correlações a fim de melhor compreender o maciço nos aspectos da deformação e da redistribuição das tensões iniciais.

O estudo realizado consistiu na calibração de um modelo numérico de elementos finitos em uma seção típica onde ocorreu a mobilização de cinco bancos, com 10 metros de altura cada. A estimativa de parâmetros elásticos através das correlações geomecânicas existentes foi utilizada como entrada inicial de dados, a partir de informações consolidadas, provenientes do banco de dados de descrição de sondagem.

Os valores de deslocamentos totais medidos através do equipamento Radar permitiram a calibração do modelo.

A retroanálise da ruptura por análise tensão-deformação teve como resultados os parâmetros de deformabilidade e as tensões in situ. Na calibração do modelo numérico, buscou-se verificar a similaridade da superfície de ruptura observada em campo e nas análises por equilíbrio limite para a mesma seção típica.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

### 2.1. Contexto geomecânico e hidrogeológico

A classificação geomecânica das rochas que ocorrem no complexo mineral da área estudada segue o padrão estabelecido pelo Sistema de Classificação Geomecânica, RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1989). O litotipo de maior expressão, e alvo do processo de lavra, é o itabirito silicoso e suas derivações mineralógicas, do tipo anfibolítico, goetítico, aluminoso e manganêsífero. Também ocorrem rochas básicas intrusivas, ora paralelas à foliação e ora discordantes. As rochas observadas neste estudo são extremamente friáveis, alteradas até grandes profundidades (>200m), com características geomecânicas predominantemente pobres a muito pobres, representadas por maciços das Classes IV a VI, RMR variando de 0 a 50 (Figura 1a e b). A classe VI refere-se à uma adaptação da classificação de Bieniawski (1989), que se destina a designar o maciço constituído por saprólito ou solo estruturado coesivo. As rochas do tipo metabásicas também são muito alteradas e se apresentam como solo estruturado, de coloração vermelha e estrutura xistosa (Figura 2).

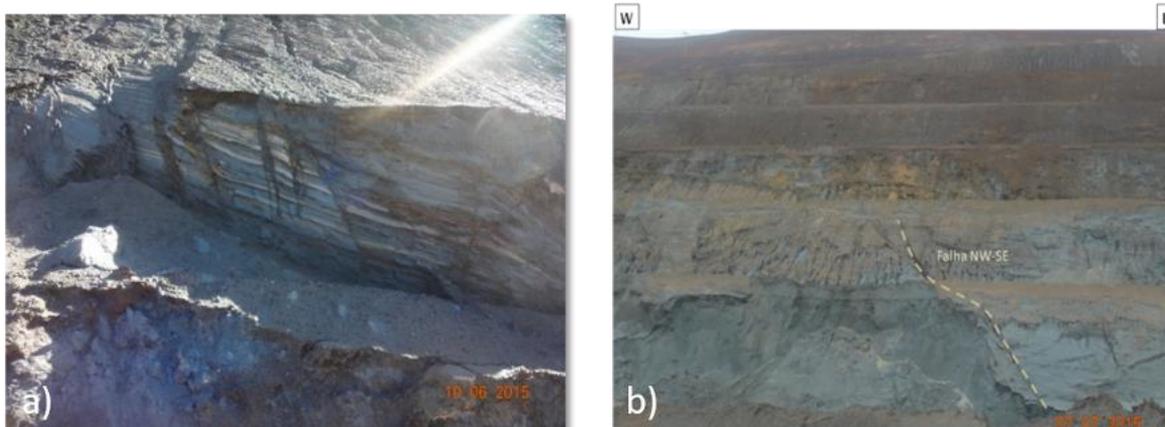


Figura 1. a) Detalhe para itabirito friável com intercalações silicosas e b) Vista E-W dos taludes da Cava, onde predominam itabiritos friáveis Classe V. Fonte: Mineradora / Relatório Interno.

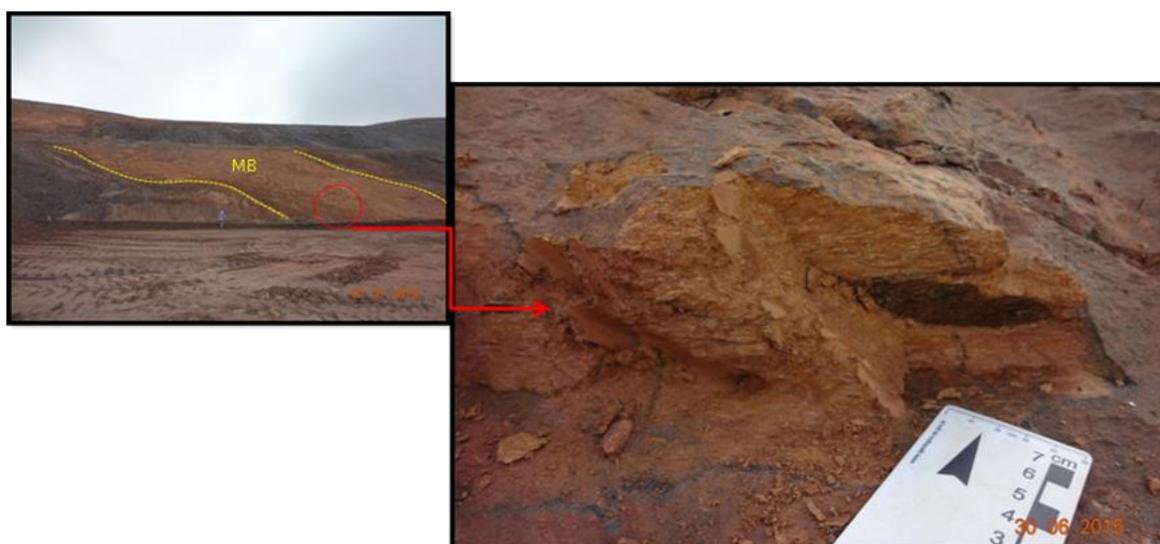


Figura 2. Vista geral e detalhe de sill de metabásica. Fonte: Mineradora / Relatório Interno.

A condição hidrogeológica dessa mina é muito peculiar, pois de maneira geral o nível d'água ainda não aflorava no fundo da cava que se encontrava na cota 890m, a época desse estudo. A cota regional do nível d'água encontra-se na cota 870m. Porém é de conhecimento, a presença de bolsões de água de dimensões centimétricas a métricas nos pacotes de formação ferrífera, vistos na presença de pequenas surgências na face dos taludes, principalmente em períodos chuvosos e em cotas superiores ao nível regional. Há registros de ocorrências de surgências na face dos taludes entre as cotas 940 a 1020 m e que geralmente tiveram rupturas de bancada associadas à saturação do pé. O entendimento da dinâmica do escoamento superficial sugere que a formação desses bolsões isolados ou não, são motivados por sinformes, ou sinformes dobrados tipo caixa de ovos e limitados por sills muito alterados e argilosos de metabásicas ou mesmo camadas argilosas de itabiritos aluminosos ou manganésíferos e até de itabiritos anfibolíticos.

A Figura 3 representa a situação de saturação no pé do talude, causando um princípio de ruptura de face, por perda de resistência relacionada com a interseção do talude e os bolsões de água localizados. Essa foto é do mês de fevereiro no qual são observados os maiores índices pluviométricos do ano.



Figura 3. Ruptura de face causada pela saturação na região do pé do talude devido à condição de trapeamento de água.

Os modos de ruptura identificados na cava de estudo, caracterizam-se por rupturas circulares e ou plano circulares. As rupturas circulares não apresentam controle estrutural e de acordo com Sjöberg (1999), é o modo de ruptura mais frequente em taludes altos de mineração (300 a 500m) enquanto que as rupturas-plano circulares podem mobilizar taludes onde o maciço encontra-se alterado e estruturado.

### 3. ESTUDO DE CASO

#### 3.1. Definição dos parâmetros geotécnicos

Para a realização das análises tensão-deformação são necessários, adicionalmente aos parâmetros de resistência, os parâmetros de deformabilidade do maciço rochoso, bem como, o estado de tensões iniciais.

A seção de análise típica é apresentada na Figura 4, dada por uma sequência de rochas do tipo itabirito com variações tipológicas de itabiritos aluminosos (IAL), anfibolíticos (IA), goetíticos (IGO) e manganésíferos (IMN), intrudidos por sill de rocha metabásica (IN) que de forma geral encontra-se em concordância com a direção da foliação principal do conjunto de rochas encaixantes e por vezes diques de rocha intrusiva. A distribuição de litologias com suas respectivas classes geomecânicas (Bieniawski, 1989) é mostrada na Figura 4.

A região de contato entre o itabirito friável e a rocha metabásica (Figura 4), condiciona o surgimento de uma superfície de mais baixa resistência que pode estar associada à presença de água. Essa região é considerada como uma barreira hidráulica gerada principalmente pela diferença de permeabilidade entre as rochas e para efeito de simulação da condição real da estrutura lançou-se de mão da construção de uma camada pouco espessa (1m) no contato entre as litologias (ver Figura 4). A ruptura ao longo dessa camada foi observada através de verificações de campo e as suas propriedades de resistência foram obtidas através de retroanálises por equilíbrio limite. Para representar a condição de saturação observada na face do talude no contato da formação ferrífera com a rocha intrusiva, utilizou-se um valor de  $r_u = 1$ .

Os critérios de resistência adotados foram o de Mohr-Coulomb, para os maciços de Classe V e o de Hoek & Brown para os maciços de Classes III e IV. A coesão e o ângulo de atrito foram fornecidos pela empresa, obtidos através de campanhas de ensaios e não foram objeto de discussão neste trabalho.

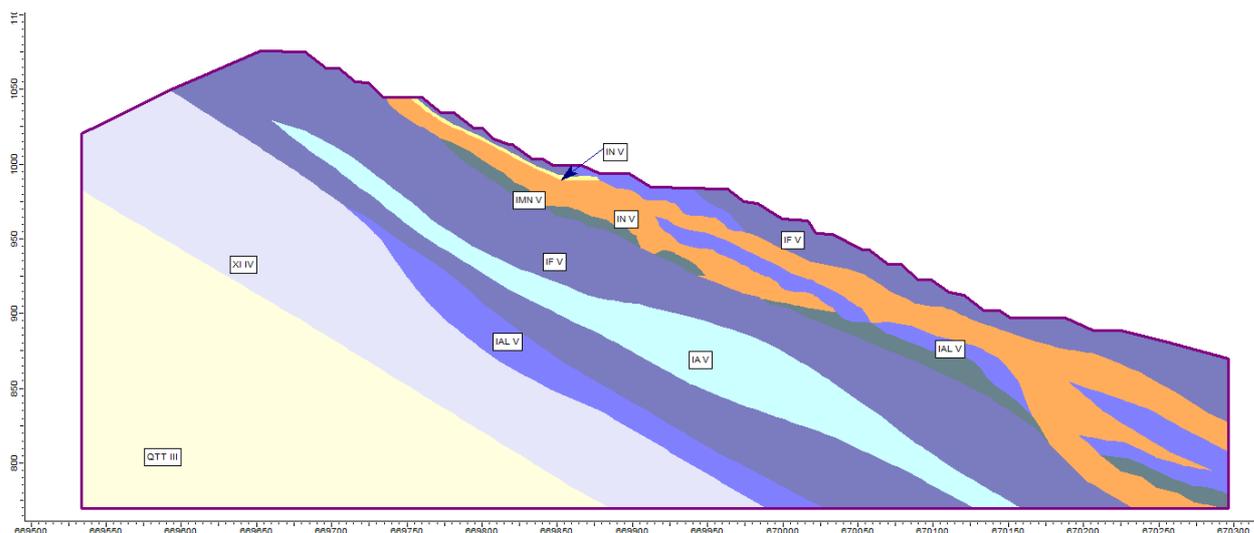


Figura 4. Modelo geológico-geomecânico da seção tipo de análise. QTT: Quartzito, XI: Sericita Xisto, IAL: itabirito aluminoso, IF: itabirito friável, IN: rocha básica intrusiva, IMN: itabirito manganêsífero IN-R: intrusiva de baixa resistência na região do contato. Os algarismos romanos nas litologias referem-se às classes de maciço. Fonte: Mineradora / Relatório Interno.

Ressalta-se que os valores obtidos de RMR para cada litologia de estudo referem-se a valores médios, obtidos através da análise do banco de dados de descrição de testemunhos de sondagem fornecidos pela mineradora. Os valores de GSI, corrigidos pelos valores de RMR, foram usados para cálculo dos parâmetros de resistência das Classes III e IV, Equação (1), sugerida por Hoek *et al.* (1995).

$$GSI = RMR - 5 \quad (1)$$

Todos os parâmetros de resistência utilizados no estudo, para cada litologia mostrada na Figura 4, são apresentados por Brandão (2020). Esses parâmetros não foram objeto de retroanálise porque já tinham sido retroanalisados por estudos anteriores envolvendo análises de equilíbrio-limite ou consolidados por Brandão (2020).

Para a obtenção dos parâmetros de deformabilidade utilizou-se as proposições apresentadas por Hoek (2002), Equação 2, a qual estabelece relações para o cálculo do módulo de elasticidade através do GSI (Geological Strength Index), e onde a resistência a compressão uniaxial é menor que 100 MPa, correspondente às rochas típicas de maciços brandos características da área.

$$E_m (GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (2)$$

Onde  $\sigma_c$  é a resistência a compressão uniaxial em MPa,  $D$  é o grau de perturbação do maciço devido ao efeito do relaxamento das tensões perante as escavações e detonações.

Para a estimativa do Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) utilizou-se a relação proposta por Singh & Goel (1999), através da equação (3).

$$\nu = 0,32 - 0,0015GSI \quad (3)$$

Para a análise tensão-deformação é necessário o conhecimento das tensões in situ a qual o maciço está submetido. Comumente verifica-se em minas a céu aberto, a pouca frequência de ensaios para a determinação das tensões, por uma vasta gama de razões, pelas quais podemos citar a complexidade e custos dos métodos, além da ausência de superfícies de escavações pouco perturbadas.

Neste estudo de caso, para efeitos de simulação das tensões iniciais do maciço, considerou-se que o maciço está submetido a tensões gravitacionais, onde as tensões verticais são dadas pelo peso do material rochoso sobrejacente e as tensões horizontais são dadas pela constante  $k$  multiplicada pelas tensões verticais (Equação 4).

$$\sigma_H = k \sigma_v \quad (4)$$

Onde  $\sigma_H$  é a tensão horizontal,  $\sigma_v$  a tensão vertical e  $k$  é uma constante.

### 3.2. Monitoramento geotécnico

De forma a garantir a segurança das operações e ampliar os conhecimentos a respeito do comportamento do maciço, a mineradora possui um radar de monitoramento geotécnico terrestre SAR, que utiliza a metodologia de interferometria. Este equipamento obtém informações de deslocamentos da área escaneada medidos através da diferença de fase entre ondas eletromagnéticas em tempo real. Seu funcionamento é descrito em detalhes por Brandão (2020).

Para efeito de parametrização, sobre a seção de análise determinou-se pontos de medidas de deslocamentos, similares a prismas de monitoramento, para determinação dos deslocamentos pontuais superficiais e que serviriam de base para as análises comparativas dos deslocamentos verificados através da análise tensão-deformação (Figura 5).

A Figura 6 representa o deslocamento total observado em cada ponto de controle identificado na Figura 5, a partir do início do deslocamento iniciado no final de fevereiro até a sua estabilidade no final de abril ~~de 2016~~. Os dados de deslocamento originais são provenientes do software de análise do radar de monitoramento (Brandão, 2020).

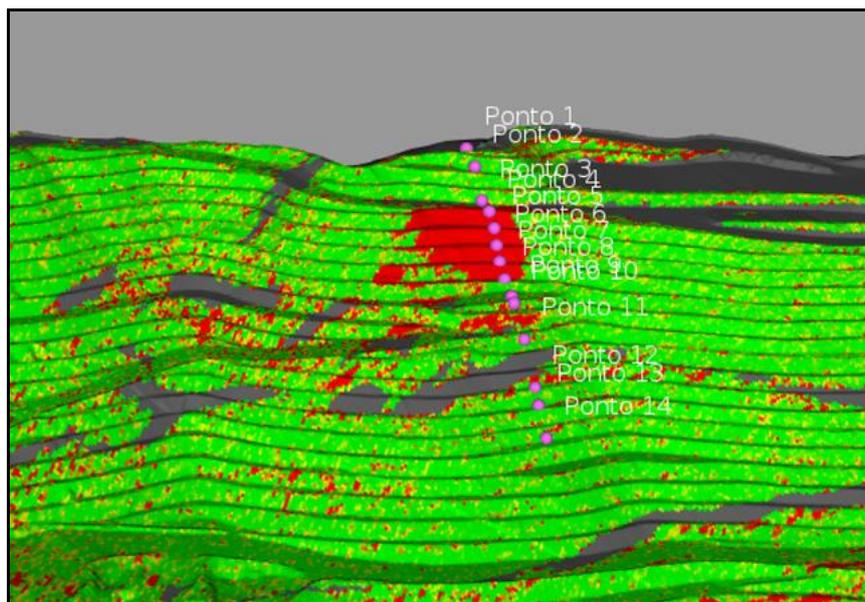


Figura 5. Localização dos pontos de monitoramento ao longo da seção de análise. Fonte: mineradora.

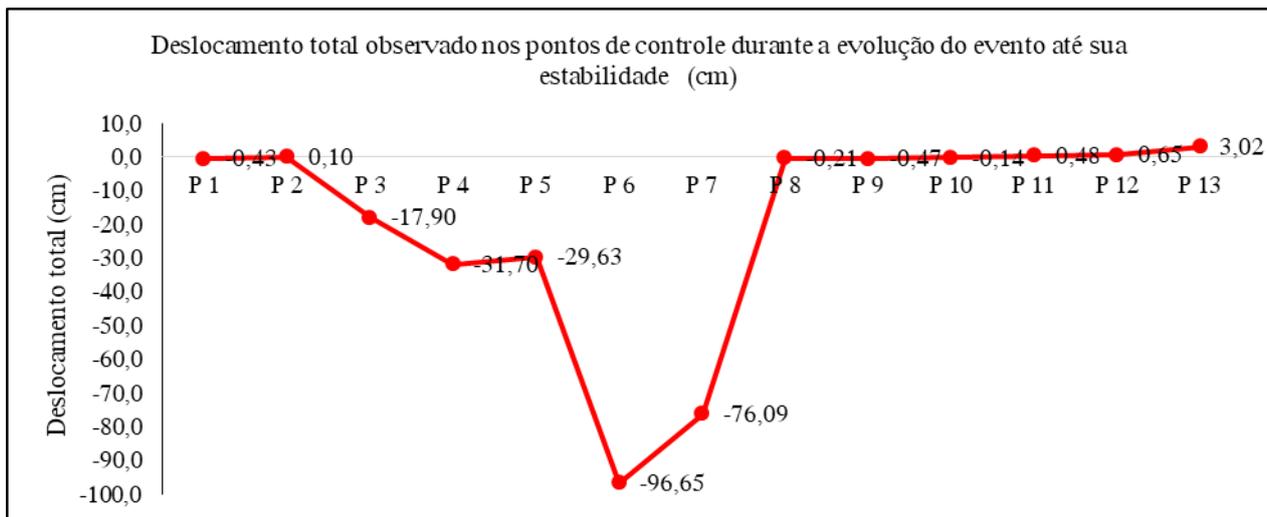


Figura 6. Deslocamentos medidos através dos pontos de monitoramento sobre a seção de análise. Os dados de deslocamento negativos representam uma convenção adotada no monitoramento Radar para indicar aproximação da superfície em movimento com o equipamento de monitoramento. Fonte: mineradora

### 3.3. Modelagem numérica

Neste trabalho optou-se pela metodologia de elementos finitos (MEF) através da utilização do *software* RS2 da Rocscience (2019), o qual estabelece uma abordagem 2D para análises tensão-deformação.

Na ausência de parâmetros residuais de coesão e ângulo de atrito, adotou-se o mesmo valor da resistência de pico. Para o ângulo de dilatância, admitiu-se o valor 0, devido à sua arbitrariedade e não se observou dependências nas análises em função da adoção desse valor. O comportamento elasto-plástico perfeito é admissível por se tratarem de rochas brandas, porém considera-se conservador na aplicação em rochas mais resistentes. No caso deste estudo as rochas de interesse são predominantemente brandas. Os maciços das Classes III e IV estão distantes da área onde ocorreu a ruptura e têm pouca influência sobre a análise.

Para a determinação de módulo de elasticidade, as análises iniciais partiram dos valores calculados pelas correlações sugeridas e discutidas ao longo deste estudo, porém lançou-se de mão de diversas análises variando os parâmetros elásticos de cada litologia de forma que o resultado se aproximasse das condições medidas e observadas em campo (Tabela 1).

Tabela 1 Parâmetros de entrada para análise tensão-deformação dos litotipos de Classe V.

Litologia	GSI	E (MPa)		$\nu$
		calculado	retroanálise	
XI	17	375.5	375	0.29
IF	18	381.6	173	0.29
IA	18	442.6	442	0.29
IAL	16	244.6	117	0.30
IMN	16	402.0	250	0.30
IN	15	230.9	230	0.30
IN_R	15	188.5	200	0.30

Para o estado de tensões iniciais do maciço adotou-se uma estimativa de  $k$  variando de 0.75 a 1.25. Adotou-se como referência o deslocamento total do ponto 06 (P06), onde foi obtido o deslocamento máximo medido pelo Radar (96.65 cm), conforme Figura 6.

O estado de tensões iniciais que mais se ajustou ao deslocamento medido pelo Radar em conjunto com a geometria da ruptura observada na área de estudo, refere-se ao valor de  $k=0.75$

(Figura 7). As demais simulações apresentaram resultados muito distantes dos observados, tanto em relação aos deslocamentos quanto em relação à posição da superfície de ruptura. Estas simulações são discutidas em detalhe por Brandão (2020).

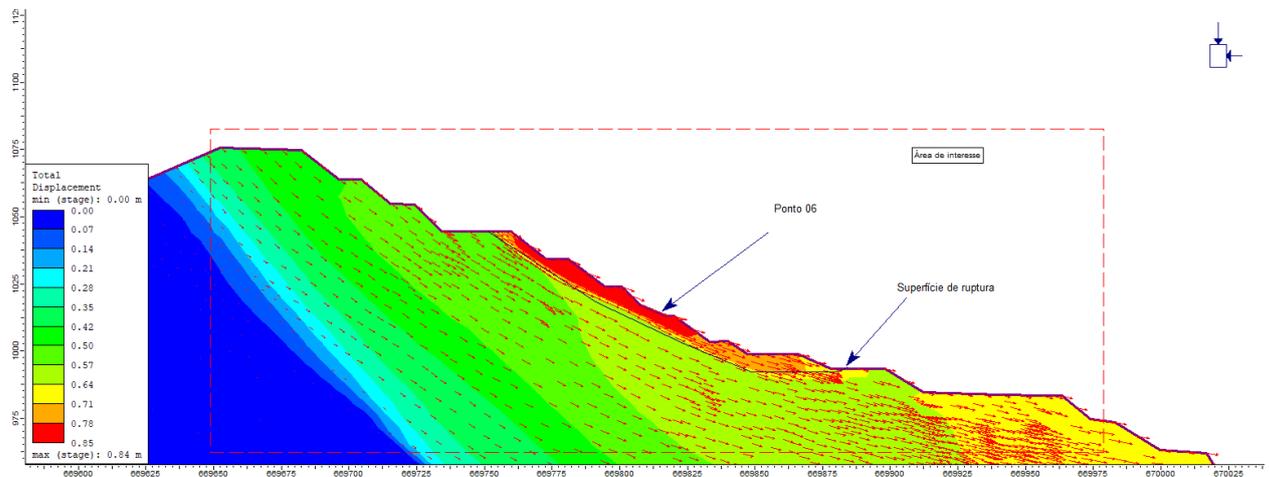


Figura 7. Deslocamento total e geometria da superfície de ruptura para  $k = 0.75$ . Os vetores de deformação total são representados pelas suas trajetórias.

A direção dos vetores de deformação, conforme apresentado na Figura 7, é compatível com o deslocamento observado, indicando direção bastante similar àquela observada na superfície de ruptura em campo.

#### 4. CONCLUSÕES

O estudo de caso objeto deste trabalho buscou compreender um evento de instabilidade do ponto de vista da deformação, que ocasionou a ruptura de cinco bancos da mina. Foram utilizadas correlações disponíveis na literatura para a obtenção dos parâmetros elásticos, assim como a calibração das tensões iniciais e do módulo de deformabilidade a partir do deslocamento total medido através de um equipamento do tipo RADAR.

De forma geral observou-se que a estimativa dos parâmetros por correlações geomecânicas para algumas litologias não foi bem-sucedida, porém as retroanálises dos parâmetros de deformabilidade e a calibração de  $k$  a partir das análises numéricas por elementos finitos convergiram para uma solução muito similar com a superfície de ruptura verificada em campo, o que representa uma boa aderência dos parâmetros obtidos.

Espera-se que os resultados obtidos neste estudo de caso possam servir de ponto de partida para trabalhos futuros, os quais se objetivam no aprofundamento do conhecimento do comportamento do maciço rochoso do ponto de vista da deformação. Outro ponto importante à medida que se evolui no conhecimento geotécnico é a consideração de análises 3D tanto por equilíbrio limite como por tensão-deformação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a mineradora e ao NUGEO pelo apoio na realização desse trabalho.

## REFERÊNCIAS

BIENIAWSKI, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. John Wiley & Sons, New York, EUA.

BRANDÃO, I. N. (2020). “*Análise tensão-deformação aplicada a verificação de parâmetros elásticos provenientes de correlações geomecânicas e medidas de deslocamento*”, Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em Geotecnia (NUGEO), Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

HOEK, E., KAISER, P. K., BAWDEN, W. F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. A. A. Balkema.

HOEK, E., CARRANZA-TORRAS, AND B. CORKUM. (2002). “*Hoek-Brown failure criterion*”, Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium and Seventeenth Tunneling Association of Canada Conference, Tunneling Association of Canada, Toronto, Canada, p.1-7.

ROCSCIENCE INC. (2019) – RS2 - 2D Finite Element Analysis, [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com), Toronto, Ontario, Canada.

SINGH, B & GOEL, R. K. (1999). *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*, Elsevier Science.

SJÖBERG, J. (1999). “*Analysis of Large Scale Rock Slopes*”, Doctoral thesis, Luleå University of Technology, 682.