

CALIBRAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO POR MEIO DE EVIDÊNCIAS PARA PREDIÇÃO DE EVENTOS DE INSTABILIDADE

CALIBRATION OF NUMERICAL MODELS THROUGH EVIDENCE FOR PREDICTION OF INSTABILITY EVENTS

GUSTAVO ANTONIO PEREIRA BATISTA

MSc. Geotechnical Engineer, Perth, Austrália, GAPBatista@gmail.com

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS

Professor Dr., Universidade de Brasília - UNB, Brasília, Brasil, AAssis@unb.br

KOBUS DU PLOOY

Geotechnical Engineer, AngloGold Ashanti, Perth, Austrália, KDPlooy@anglogoldashanti.com

JAIRO HENRIQUE DA SILVA

Engenheiro Geotécnico, AngloGold Ashanti, Crixás, Brasil, JHSilva@anglogoldashanti.com.br

PAULO ANDRÉ CHARBEL

Professor Dr., Instituto Federal de Goiás - IFG, Goiânia, Brasil, Paulo.Charbel@ifg.edu.br

RESUMO ABSTRACT

A diluição não planejada representa um dos fatores que mais impactam economicamente a indústria da mineração. O seu aumento torna o processo de escavação instável podendo inviabilizar áreas de lavra. A predição de eventos de instabilidade não desejados em uma mina subterrânea pode se dar a partir da aplicação do conceito de retroanálise, a fim de proceder com a calibração do modelo. Nesse contexto, é apresentado uma metodologia de retroanálise por meio de interpretações 3D de juntas ubíquas e seus impactos na prevenção da diluição em lavra de veios estreitos pelo método sublevel stoping, bem como os resultados da calibração dos parâmetros de resistência do maciço em áreas escavadas a 750 m de profundidade utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência do maciço foram calibrados utilizando um método probabilístico, respeitando a heterogeneidade natural do maciço rochoso e quantificando o dano causado a partir da probabilidade de ruptura. Os estudos corroboram para a importância da aplicação de uma metodologia adequada na previsão do comportamento do maciço, sendo considerada fator essencial para o desenvolvimento de projetos de suporte assertivos e

Unplanned ore dilution represents one of the main factors that economically impact in the mining industry. Its increasing turns the excavation process unstable and it can also turn the stoping areas unfeasible from an economic perspective. The prediction of non-desired instability events in an underground mine, can be done by applying the concepts of back analyses, through keeping a constant model calibration. In this context, a methodology to back analyze by 3D interpretations of ubiquitous joints, their impacts in the prevention of non-planned dilution, along narrow stopes performed through the method sublevel stoping. As also, the calibration results applied for the rock mass resistance parameters, in excavated areas, at a depth of 750m, utilizing the Mohr-Coulomb failure criterion. The rock mass resistance parameters were calibrated utilizing the probabilistic method, respecting the natural heterogeneity of the rock mass and quantifying the caused damage, from the failure probability. This study corroborates highlighting the importance of applying an adequate methodology for forecasting the rock mass, being an essential factor for projecting

consequentemente a causa para a elevação dos índices de segurança.

Palavras-chave: Diluição não planejada, Modelagem numérica, Método probabilístico, Escavação subterrânea, Juntas Ubíquas.

1. INTRODUÇÃO

A Mineração Serra Grande (MSG), pertencente ao grupo Anglo Gold Ashanti, está localizada na cidade de Crixás, a noroeste do estado de Goiás, distante 320 km de Goiânia e 400 km de Brasília. Atualmente a MSG conta com 3 minas subterrâneas e 2 minas a céu aberto ativas, sendo as operações de subsolo responsáveis por 85% da produção da unidade. O método de lavra Sublevel Open Stope tem sido amplamente utilizado nas minas da MSG, contribuindo atualmente com mais de 80% da produção planejada.

Charbel (2015), descreve que a diluição na mineração é definida como a contaminação do minério com rocha estéril, provocando uma redução do teor da substância útil no minério lavrado. Na lavra subterrânea ela pode ser dividida em diluição planejada, interna ou primária, e diluição não planejada, externa operacional ou secundária. A diluição planejada representa a rocha estéril, situada dentro dos limites de lavra planejada. A diluição não planejada ou operacional consiste no estéril que se posiciona além dos limites do realce planejado. O seu aumento acarreta um acréscimo nos custos de carregamento de transporte, tratamento de minério e deposição do rejeito podendo inviabilizar algumas áreas de lavra.

A diluição não planejada pode ter como origens principais a instabilidades do maciço rochoso, seja estrutural ou por redistribuição de tensões, ou erros operacionais, como por exemplo, aqueles que se referem ao processo de perfuração e desmonte do realce. Para uma melhor dinâmica na leitura a diluição não planejada será descrita apenas como diluição.

Com intuito de determinar os parâmetros de resistência das juntas de uma região instável, esse artigo apresenta dois estudos de casos da Mina 3, jazida de maior importância da MSG, em profundidades de 750 m que contemplou diluição supe-

assertive support systems and consequently, being a main reason for elevating the safety levels.

Keywords: Unplanned Dilution, Numeric Modelling, Probabilistic Method, Underground Excavation, Ubiquitous Joint.

rior a 100% e conteve a geometria do *hangingwall* (HW) controlada pelas estruturas que compõem o maciço rochoso. O primeiro exemplo será intitulado como INT 722 retratando uma região a 720 m de profundidade e o segundo será tratado como INT 742 a uma profundidade de 740 m.

O painel de lavra a 750 m de profundidade da Mina 3 é caracterizada pela ocorrência de um veio de quartzo contínuo e aurífero em sua base com espessura entre um a três metros e com 100 a 150 m de comprimento. O veio ocorre entre uma zona cisalhante de caráter rúptil-dúctil localizada no interior do pacote metassedimentar hospedado por xisto carbonoso. O minério de forma geral apresenta mergulho variando de 60° a 70° e o método de lavra é *Sublevel Open Stope, Top-Down*, sem uso de *rock-fill* para estabilidade.

Os testes em laboratórios permitem obter os parâmetros do maciço rochoso anisotrópico, cuja variabilidade de suas propriedades físicas é extremamente grande e imprevisível. Dessa forma, o uso de um banco de dados coletados em uma região distante da região em que se deseja analisar está sujeito a erros. Devido a isso, os modelos tridimensionais baseados em retroanálise tornam-se uma ferramenta eficaz para calibrar os parâmetros do maciço rochoso local.

O nível de precisão dos modelos pode ser medido por meio da realização de retroanálises para determinar quanto esses modelos podem corresponder ao comportamento observado da mina. Um exemplo de como proceder com retroanálise é descrito por Batista (2019), demonstrando técnicas de modelagem numérica aplicada a ambientes de mineração para obtenção de áreas instáveis.

Wiles (2006), descreve que a razão pela qual executam modelos numéricos é a tentativa de determinar por que as instabilidades ocorreram no passado e prever quando elas ocorrerão no futuro, para que seja possível evitar problemas e realizar um melhor planejamento.

O entendimento do estado de tensões em um maciço rochoso e o seu comportamento diante de uma escavação, muitas vezes constituem situações de grande complexidade e sua análise por métodos analíticos convencionais são, em geral, simplistas e distantes da realidade. Por isso, técnicas de modelagem numérica têm sido amplamente utilizadas como ferramentas para o estudo do comportamento de maciços rochosos, com representação de geometrias de mina mais próximas à realidade e com o uso de equações matemáticas.

2. OBJETIVO

O objetivo é apresentar a retroanálise por meio de interpretações tridimensionais das juntas ubíquas e seus impactos na prevenção da diluição não planejada em lavras estreitas pelo método *sublevel stoping*, bem como os resultados da calibração dos parâmetros de resistência do maciço utilizando o método probabilístico, respeitando a heterogeneidade natural do maciço rochoso e quantificando o dano causado a partir da probabilidade de falha utilizando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

3. METODOLOGIA

Sabe-se que o entendimento do estado de tensões em um maciço rochoso, o seu comportamento diante de uma escavação e, conseqüentemente, a interação entre escavações, muitas vezes constituem situações de grande complexidade e sua análise por métodos analíticos convencionais são, em geral, simplistas e distantes da realidade. Para Jager e Ryder (1999), um modelo permite considerar qualquer representação ou abstração de um sistema ou processo com a finalidade de definir e resolver um problema.

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb estabelece que a ruptura ocorre quando a tensão cisalhante num determinado ponto da amostra atinge a resistência ao cisalhamento do material, a qual depende de uma parcela coesiva (c) e outra friccional (φ). Conforme a amostra é comprimida com incremento de σ_1 , a resistência ao cisalhamento será mobilizada para um plano inclinado assim como apresentado na Figura 1A. O valor da

resistência pode ser determinado pela equação 1, onde: (τ_R) é a resistência ao cisalhamento ao longo do plano de ruptura, (c) é a coesão, (σ_n) é a tensão normal atuando no plano de cisalhamento e (φ) é o ângulo de atrito do plano de cisalhamento.

$$\tau_R = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

As componentes de tensão normal (σ_n) e cisalhante (τ) atuantes no plano de cisalhamento podem ser determinadas por meio de trigonometria pelas equações 2 e 3, sendo (σ_1) a tensão principal maior e (σ_3) a tensão principal menor. Essa equação é frequentemente referida como critério Mohr-Coulomb e é aplicada em mecânica das rochas para ruptura por cisalhamento em rochas, juntas em rochas e maciços rochosos. O critério assume que a ruptura ocorre ao longo do plano sem nenhuma dilatação.

$$\sigma_n = 0.5(\sigma_1 + \sigma_3) + 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \quad (2)$$

$$\tau = 0.5(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\beta \quad (3)$$

Na Figura 1B descreve-se graficamente o critério analisado. Na análise elástica, as tensões máximas de cisalhamento (τ) no plano ubíquo e tensão normal (σ_n) configuram o estado de tensões na ruptura. Inserindo os valores de (σ_n) e (τ) para os diversos valores de tensões normais em que foram realizados os ensaios, são encontradas envoltórias de Mohr-Coulomb onde a inclinação da reta representa o ângulo de atrito (φ) e a interseção com o eixo das tensões cisalhantes (τ) representa a coesão (c) do material. O critério é linear, mas como a rocha não pode suportar grandes tensões de tração, um corte de tensão é frequentemente incluído.

Na análise da ruptura de uma lavra, os planos instáveis foram rompidos e os planos estáveis estão preservados. Os valores na superfície do realce rompido correspondem às tensões principais atuantes naquela envoltória e descreve a curva intrínseca. Sendo assim, quando inserido no gráfico é possível obter coesão e ângulo de atrito determinando os parâmetros das juntas que condicionaram a instabilidade da lavra.

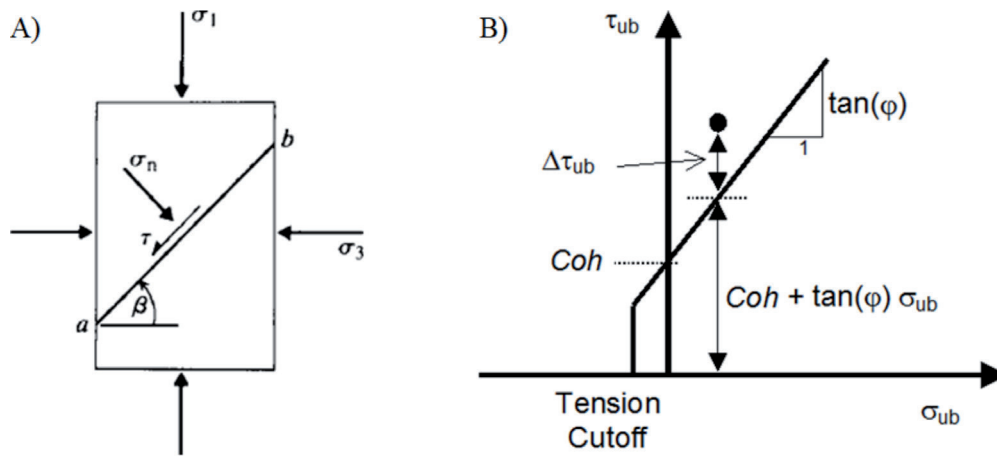


Figura 1. A) Ruptura por cisalhamento conforme o critério Mohr-Coulomb (Brady e Brown, 2004) e B) Critério de ruptura em termos de tensão normal e cisalhante (Map3D User's Manual).

Nos modelos serão analisadas as magnitudes das tensões cisalhantes quando excedidos à resistência da foliação por meio do parâmetro tensão cisalhante excedente (excess shear stress) (τ_{ub}). Para calcular as tensões cisalhante e normal nas juntas ubíquas, o estado de tensão na superfície analisada é reorientado para determinar a máxima tensão cisalhante no plano cisalhante ubíquo e a tensão normal a esse.

Se τ_{ub} exceder a força cisalhante, então é uma região instável. Valores de τ_{ub} que superam a força podem ser calculados conforme já descrito no círculo de Mohr-Coloumb na equação 4. Sendo assim, poderá apresentar o potencial de ruptura da seguinte maneira:

$$d\tau_{ub} = \tau_{ub} - (c + \sigma_n \tan \varphi) \quad (4)$$

Daemen (1983) desenvolveu uma formulação que permite a determinação das zonas de cisalhamento ao redor de túneis ou poços escavados em maciços rochosos interceptados por um sistema de juntas ubíquas paralelas à escavação, descrevendo que planos de fraqueza paralelos ou semi-paralelos ao eixo longitudinal de aberturas subterrâneas facilitam a instabilização das paredes. Na análise elástica, as (τ) e (τ) no plano ubíquo máximo podem ser usadas com o critério de resistência de Mohr-Coulomb para estimar a quantidade de escorregamento devido à sobretensão, em uma falha, conjunto de juntas ou plano de estratifica-

ção na orientação especificada. Uma vez que estes parâmetros são dependentes da orientação, este critério é representativo para a estabilidade do maciço rochoso anisotrópico, sendo assim mais apropriado para estudo de rochas foliadas, como é o caso da MSG.

Na calibração do modelo, foi utilizado o programa Map3D desenvolvido pela empresa canadense Map3D International Ltda. O programa Map3D é um código de elemento de contorno em três dimensões que permite modelagem de escavações tabulares e maciças em meios contínuos, elásticos e homogêneos. É indicado na modelagem tridimensional de maciços rochosos para avaliação de condições de instabilidade em escavações de geometrias complexas e irregulares. Barbosa (2010) exemplifica que este tem sido utilizado em diversos projetos de dimensionamento de mina subterrânea ou de superfície que requerem, por exemplo, sequenciamento de lavra, condição de estabilidade de taludes, rampas de acesso, retroanálise dos parâmetros do maciço, entre outros usos.

Este parâmetro pode ser exibido no Map3D usando "Plot> Strength Factors> dTub". Neste caso, os valores positivos de $d\tau_{ub}$ são locais onde as tensões extrapolam a resistência - portanto, instáveis. Valores negativos de $d\tau_{ub}$ são locais onde as tensões não excedem a resistência - assim, estáveis. Valores zero de $d\tau_{ub}$ são locais onde as tensões são iguais à força. Como esse é um critério de melhor ajuste, os valores de $d\tau_{ub}$ de zero indicam

apenas 50% de probabilidade de ruptura podendo ser calculada no Map3D usando “Plot > Strength Factors > NTub”.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

A estruturação do modelo numérico no Map3D parte da construção da geometria da lavra planejada, devendo ocorrer o sequenciamento do modelo conforme o seu avanço. Para essa etapa foram utilizadas seções verticais para construção das áreas planejadas com pequenas simplificações da geometria, de forma que o resultado não fosse comprometido. A Figura 2 exemplifica os interníveis modelados no software e a sequência de lavra

é ilustrada pelos números, sendo a primeira lavra o INT 722, sequenciado pelo INT 742 até a última sequência de lavra denominada pelo número quatro com a lavra do INT 772.

Em outubro/2016 análise de tensões *in situ* foi conduzida na Mineração Serra Grande por meio dos Ensaios de Fraturamento Hidráulico e os dados das principais tensões *in situ* baseado em todos os trabalhos já desenvolvidos na MSG são resumidos pelas equações 5, 6 e 7 assim como suas orientações respectivamente. Esses resultados são utilizados como premissa no modelo numérico para obter os novos estados de tensões na superfície do overbreak e a calibração dos parâmetros de resistência do maciço.

Magnitude	Plunge/Bearing	Stress at 750mRL
$\sigma_1 = 0,049 \times \text{Depth} + 11$ (5)	00°/330°	47,7 MPa
$\sigma_2 = 0,032 \times \text{Depth} + 7$ (6)	00°/150°	31,0 MPa
$\sigma_3 = 0,028 \times \text{Depth}$ (7)	90°/060°	21,0 MPa

Os planos de análise foram inseridos apenas na região de maior diluição. Para os dois exemplos que serão analisados, as seções de análise são espaçadas a cada 2 m e sua construção respeita o sequenciamento da lavra. As seções verticais e horizontais contém malha pequena o suficiente para garantir que seja possível determinar o contorno da região instável, garantindo a qualidade

da informação. O passo seguinte é manipular os dados no software Gem4D, o qual irá representar os dados de modelagem do Map3D. Os dados analisados devem conter apenas aqueles que encontram no contato da escavação final (Figura 2 - Seção), região de transição do meio estável para o instável.

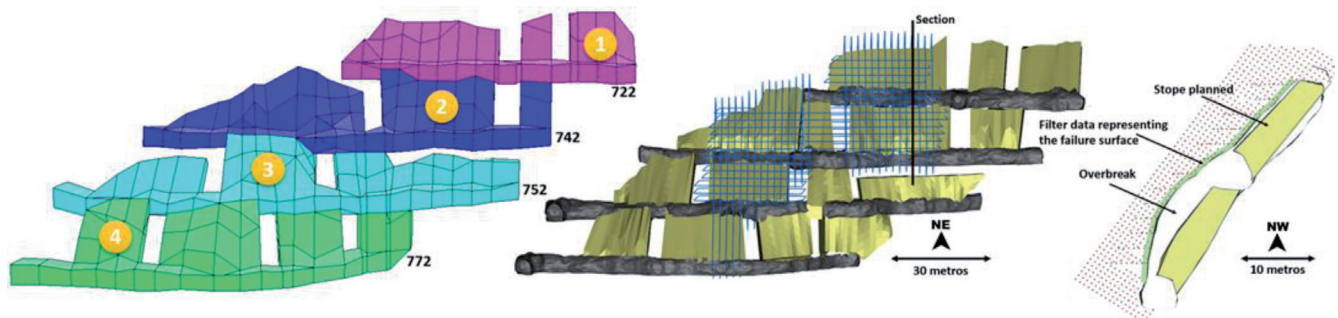


Figura 2. Construção do modelo numérico no software Map3D e a sequência de extração inúmeros de 1 a 4. As seções analisadas devem coincidir com a superfície do realce executado, layout final da lavra.

Os dados analisados contêm apenas aqueles que estão no contato da escavação final, a fim de identificar os parâmetros de tensão normal (σ_n) e cisalhante (τ) na superfície da ruptura real. Assim, é possível determinar os valores reais de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). Na Figura 3 é possível identificar todos os pontos analisados para o INT 722 e INT 742 e suas seções em relação à superfície de quebra.

Os valores de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) obtidos por retroanálise do INT 722 foram, respectivamente, 3,29 MPa e 23,1° (Figura 3). A cor-

relação entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal mostrou um resultado relevante, indicando confiabilidade de 90%, o que permite classificar a avaliação como representativa.

O segundo estudo de caso contempla a retroanálise do INT 742. A análise realizada apresentou um valor de coesão (c) de 3,02 MPa e ângulo de atrito (ϕ) de 25,3° (Figura 3). Os resultados obtidos apresentaram confiabilidade de 85%, inferior ao primeiro caso, contudo uma dispersão baixa sendo bastante representativa.

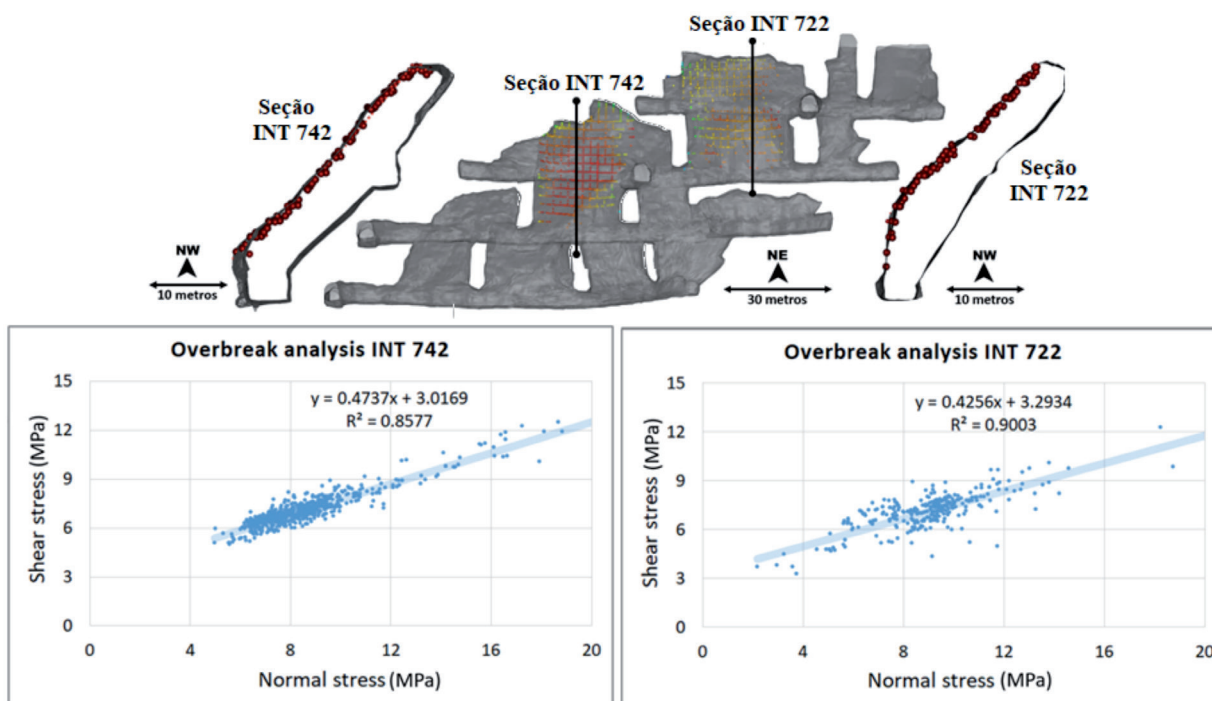


Figura 3. Painel do INT 750 evidenciando os pontos analisados. O critério de ruptura do INT 722 e INT 742 correspondem a 90% e 86% de confiabilidade respectivamente. Os gráficos representam os valores de tensão cisalhamento e tensão normal utilizados para determinar o ângulo de atrito e a coesão.

Após a obtenção dos resultados, o valor da coesão e do ângulo de atrito dessas análises foram aplicadas no software Map3D com intuito de verificar se a superfície de instabilidade gerada pelo programa é aderente à real. As análises do INT 722 com confiabilidade de 90% são eficazes para prever a região da ruptura conforme apresentado na Figura 4. A tensão excessiva de cisalhamento exposta pelos valores positivos é limitada pela linha que representa a ruptura máxima ocorrida no realce, região instável. Assim, a ferramenta provou sua relevância prevendo condições instáveis.

O entendimento desse estudo abre caminho para que os modelos de bloco 3D da MSG sejam integrados em um único banco de dados geotécnicos como uma única matriz de visualização, sendo denominado de Modelo Geotécnico para Integração Rápida - GMRI. Os dados de classificação do maciço gerados no software LeaFrog, juntamente com os dados de tensão e deformação analisados no Map3D, podem ser unificados em um único banco de dados e consolidados no Gem4D, de forma que seja possível gerar análises de estabilidade precisas. As componentes de (σ_n) e

(τ) podem ser determinadas a partir dos dados de tensão principal máxima e mínima analisadas no Map3D, conforme descrito nas Equações 2 e 3. Os parâmetros de (σ_n) e (τ) da envoltória de resistên-

cia podem ser obtidos na retroanálise. Sendo assim, a divisão da tensão cisalhante da envoltória pela tensão cisalhante analisada irá obter o fator de segurança em um modelo tridimensional.

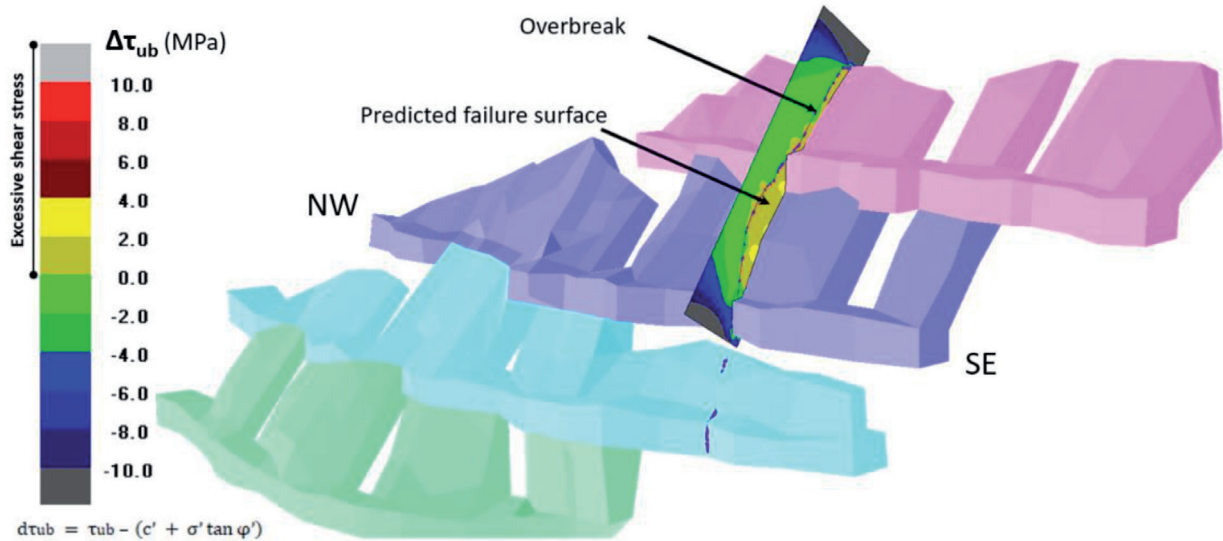


Figura 4. Modelo numérico da superfície da ruptura usando os parâmetros calibrados (c e φ). A linha representa o realce executado com a diluição real (overbreak). Na seção analisada a região estável é representada pelos valores negativos e a região instável pelos valores positivos.

Em outra perspectiva, os resultados obtidos foram comparados com os parâmetros dos ensaios de laboratório. Um total de nove amostras foram testadas para seis estágios de tensão confinante, e quatro amostras falharam como rocha intacta e não devido à estrutura. Os testes foram

realizados na Trilab em Brisbane/Austrália. Em geral, uma boa correlação foi encontrada entre todas as amostras do laboratório e os seguintes parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb foram derivados e são resumidos na Tabela 1 e comparados com os resultados da análise.

Tabela 1 - Parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb para os Ensaios de Laboratório e Análise Numérica

Parâmetros	Ensaios de Laboratório	Análise - INT 722	Análise - INT 742
Coesão (c)	1,96 Mpa	3,29 Mpa	3,02 Mpa
Ângulo de atrito (φ)	36,1°	23,1°	25,3°

Os parâmetros obtidos nos ensaios de laboratório são mais resistentes que os valores obtidos na calibração do modelo com (c) variando entre 1,44 MPa a 2,68 MPa e (φ) entre 30,4° a 40,9°. Algumas considerações podem ser atribuídas para essa diferença como as amostras do laboratório são da mesma litologia porém próximo do realce analisado, o nível de escala das amostras de laboratório

são inferiores ao analisado e os parâmetros das juntas ubíquas podem ter uma alta amplitude de resultado. A Figura 5 mostra os valores de tensão cisalhamento e tensão normal para os parâmetros Ensaios de Laboratório e Análise Numérica.

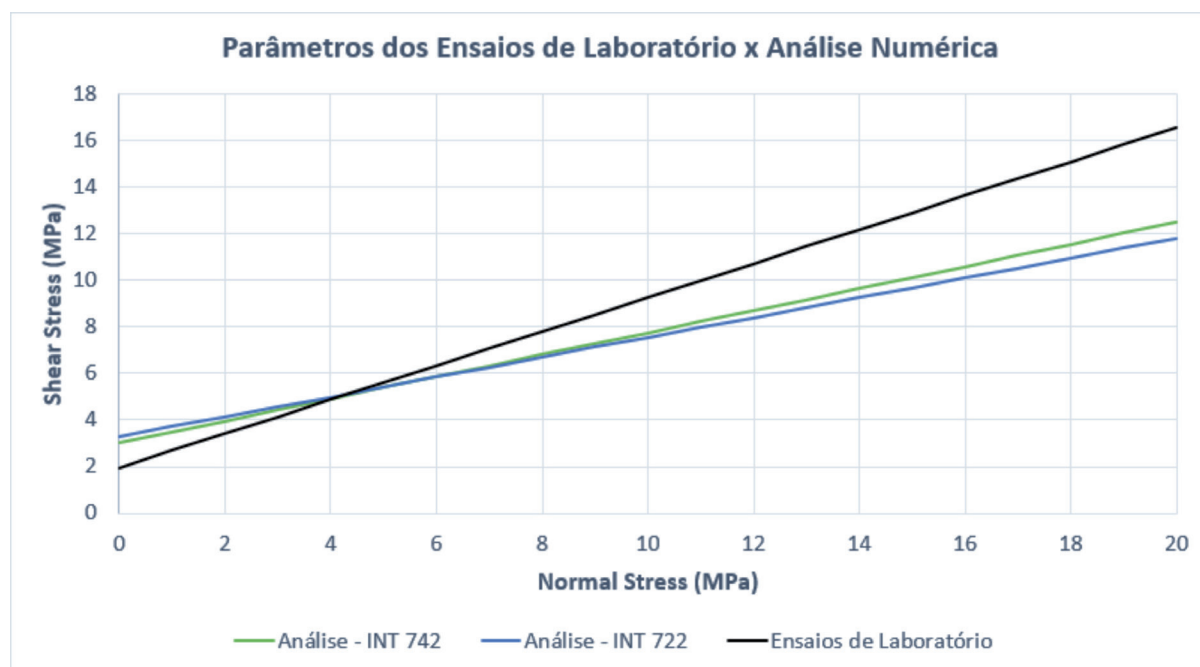


Figura 5. Comparação dos parâmetros dos Ensaios de Laboratório e Análise Numérica

4.1 Metodologia Determinística X Probabilísticos

De forma a ilustrar os dados apresentados, uma metodologia determinística implicaria em apresentar uma determinada estabilidade sem considerar a dispersão dos dados. No item anterior, por meio de retroanálise, foram obtidos parâmetros do maciço rochoso que controlam a estabilidade da mina, sendo esses dados equivalentes. Sendo assim, a análise do modelo determinístico poderia unir os dados, visto que, são semelhantes, e determinar o valor médio encontrado definindo a reta intrínseca que estabelece a ruptura do maciço rochoso para o Painel 750. A unificação dos dados apresenta coesão de 3,3 Mpa, ângulo de atrito de 23,5°. A metodologia aplicada não leva em consideração a dispersão dos dados e o coeficiente de determinação é de 88,4%.

De posse a reduzir erros ou determinar os parâmetros mais adequados, a dispersão de dados será avaliada de forma probabilística, já que um total de 957 dados foram analisados nas duas retroanálises. A metodologia consiste em fixar o ângulo de atrito e verificar a dispersão dos dados na coesão. Os contornos de probabilidade de 10, 50 e 90% são interpretados conforme a distribuição dos dados de coesão no histograma. Portanto,

para que o projeto seja bem-sucedido em 90% dos casos, as análises devem ser projetadas utilizando a coesão de $P=10\%$ para o maciço rochoso. Assim, os valores probabilísticos inseridos no modelo tridimensional irão projetar rupturas de proporções diferentes, respeitando a simetria inicialmente realizada pelo modelo determinístico.

Com o propósito de comparar os dados de coesão e facilitar o entendimento, os resultados são retratados no histograma individualmente. O histograma da dispersão da coesão da ruptura do INT 722 e INT 742 são apresentados na Figura 5. Para o INT 722, o valor médio de $P50\%$ é igual a 2,99 MPa, $P10\%$ é de 2,36 MPa e $P90\%$ e 3,5 MPa. O mesmo pode ser obtido a partir do histograma com os valores de coesão do INT 742, obtendo $P10\%$ de 2,28 MPa, $P50\%$ de 2,55 MPa e $P90\%$ de 2,96 MPa (Figura 6). Mesmo as duas regiões apresentando semelhanças nos resultados pelo método determinístico, a coesão contém variações de resistência diferentes, sendo mais elevada no INT 722 em relação ao INT 742.

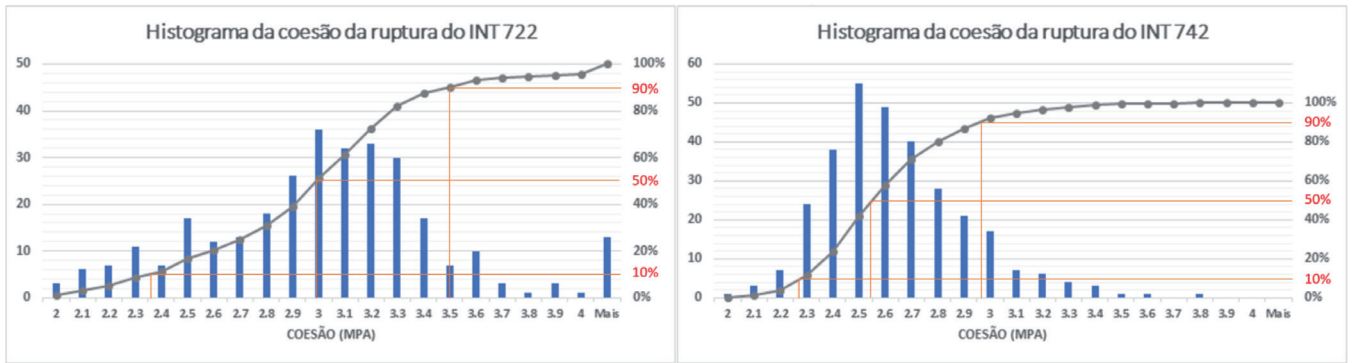


Figura 6. Histograma da distribuição dos valores de coesão determinando os contornos de probabilidade.

Os valores determinísticos e probabilísticos são resumidos na Tabela 2 inserindo também os valores unificados das duas rupturas nomeando como Painel 750. Baseado nos dois métodos, é possível interpretar que os valores determinísticos, para os três casos, apresentaram valores de coesão superiores aos de probabilidade de 50%.

Desta forma, os projetos desenvolvidos para esse estudo com a metodologia determinística são otimistas, contrários a segurança, podendo ocasionar instabilidades em regiões superiores ao projeto, dimensionando de forma inadequada o sistema de suporte.

Tabela 2. Determinação dos parâmetros de coesão baseado nos Métodos Determinístico e Probabilístico

	Determinístico		Probabilístico			
	INT 722	INT 742	Painel 750	INT 722	INT 742	Painel 750
Coesão - P10% (MPa)				2,36	2,28	2,39
Coesão - P50% (MPa)	3,29	3,02	3,30	2,99	2,55	2,78
Coesão - P90% (MPa)				3,5	2,96	3,23
Ângulo de Atrito	23,1°	25,3°	23,5°	23,1°	25,3°	23,5°

De posse das novas informações, um projeto geotécnico deve seguir os modelo probabilísticos com os valores de coesão com confiabilidade de 90%, logo, probabilidade de ruptura de 10% (P=10%), podendo ser denominados de modelo conservador. Sendo assim, os parâmetros de ruptura devem ser inferiores aos apresentados no modelo determinístico e no modelo probabilístico P=90%, denominado de modelo otimista.

Com intuito de retratar essa variação, foi gerado um novo projeto quantificando a ruptura esperada nas probabilidades de 10% e 90% do INT 722. Utilizando a probabilidade de ruptura de P=90%, modelo otimista, a análise resulta em valores de tensões que excedem a resistência com rupturas de até 2,2 m conforme a Figura 7 na li-

nya pontilhada em vermelho. Na probabilidade de ruptura de P=10%, modelo conservador, é esperado rupturas com até 4,6 m com probabilidade de falha de 10%, demonstrado na mesma imagem na linha pontilhada em azul.

A região de incerteza entre os contornos de probabilidade de 10% e 90% tem 2,4 m de distância. O modelo representa uma região de instabilidade média de 3,3 m, com uma probabilidade de 50%. O sistema de suporte deve ser dimensionado respeitando a probabilidade de até 4,6 m para assertividade do projeto.

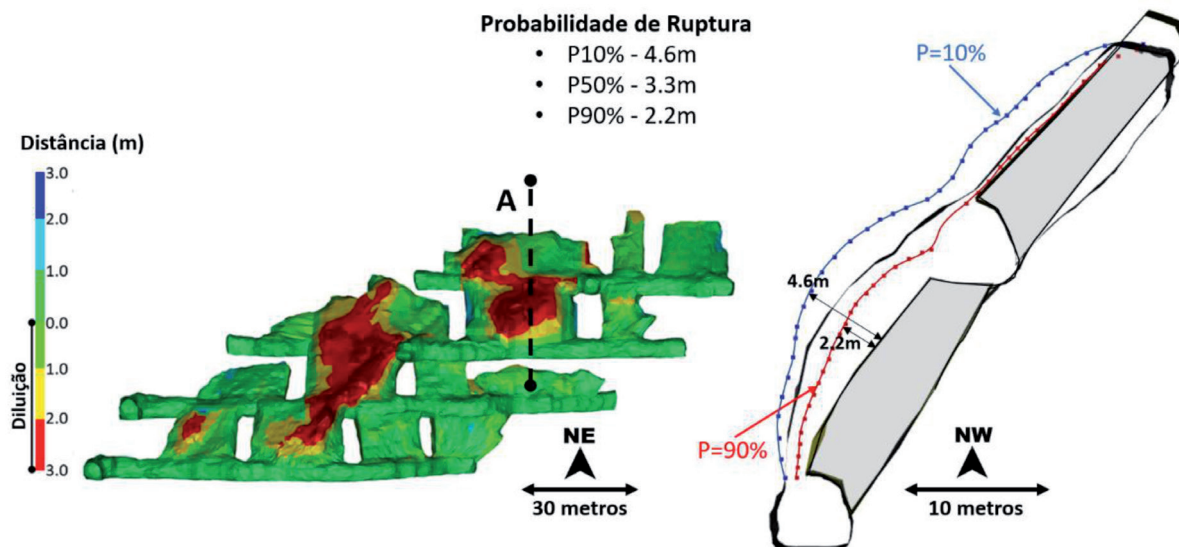


Figura 7. Variação da probabilidade de ruptura P=10% e P=90% e a incerteza do modelo numérico.

A incerteza do resultado do modelo pode estar associada aos seus parâmetros de entrada. Contudo, é necessário levar em consideração irregularidades operacionais. O desvio da perfuração, o excesso de carga máxima por espera ou a razão de carga no desmonte podem interferir nos resultados e não ser possível convergir um modelo analisado. Apesar disso, tem-se que considerar que há um limite para a precisão de qualquer modelo devido à variabilidade natural do maciço rochoso.

5. CONCLUSÃO

Este artigo demonstra, de maneira simples, como é possível aumentar a confiabilidade das informações utilizadas nas avaliações geotécnicas, permitindo a otimização dos layouts de mina de maneira rentável e segura.

As retroanálises realizadas nos INT 722 e 742 da Mina 3 provaram ser um método confiável para obter e calibrar os parâmetros do maciço rochoso no estudo de caso. O parâmetro de coesão (c) e o ângulo de atrito (φ) apresentaram boa equivalência com um coeficiente de correlação médio de 85,7% e 90,0% respectivamente.

Os valores obtidos para o ângulo de coesão e atrito podem ser usados para modelar as futuras áreas de lavra. Essa análise fornecerá confiança na metodologia e permitirá um melhor projeto

geotécnico para determinar a probabilidade de ruptura.

Resultados providos de ensaios de laboratório devem ser comparados com os resultados dos modelos numéricos e seus mecanismos de falha devem ser equivalentes. Uma retroanálise pode fornecer dados mais assertivos e representativos.

Os valores similares do modelo determinístico tendem erroneamente a unificá-los, determinando um valor médio. Esta ação gerou um coeficiente de determinação de 88,4%, apresentando coesão de 3,3 MPa e ângulo de atrito de 23,5°. Os resultados obtidos mostraram ser otimistas, não prevendo na maioria dos casos o comportamento do maciço rochoso, ocorrendo rupturas não esperadas com aumento do custo de produção.

Usando uma abordagem probabilística para projetar a ruptura, a relação entre confiabilidade do modelo e a incerteza nas previsões pode ser estabelecida quantificando os valores máximos e mínimos da área instável e a incerteza do modelo geotécnico derivado da análise estatística.

O uso da ferramenta probabilística, além de quantificar os parâmetros do maciço rochoso, determinou o contorno das probabilidades de 10% e 90%, gerando uma região de incerteza de 2,4 m, região essa de potencial de ruptura. No modelo conservador, a região de instabilidade foi de até 4,6 m de diluição, enquanto o modelo otimista apresentou valores de no máximo 2,2 m.

A confiabilidade do modelo numérico é quantificada em termos do desvio padrão por comparações diretas com observações do comportamento das minas. O método de retroanálise permite a comparação dos resultados do modelo numérico com o comportamento real da escavação, sendo uma ferramenta essencial para a confiabilidade do modelo.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, K. J. (2010) *Avaliação geotécnica de lavra subterrânea do corpo Serrotinho da Mina Cuiabá através de modelagem numérica tridimensional*. Dissertação (mestrado em Geotecnia) Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Batista, G.A.P., Da Silva, J.H; Ramires, J.E.F., Campos, M.P., Plooy, K.D. (2019) *Back analysis (BEM) in hard rock and the implications in further mining layouts*. 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering - ISRM, Foz de Iguaçu, PR, 2019.
- Batista, G.A.P. (2019) *Calibração do Modelo Numérico por Meio da Abordagem Probabilística e da Diluição Estruturalmente Controlada no Método de Lavra Sublevel Stopping*. Dissertação (mestrado em Geotecnia) Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Brady, B. H., Brown, E.T. (2004) *Rock mechanics for underground mining*. 3rd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 628p.
- Charbel, P.A. (2015) *Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério*. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- Daemen, J.J.K. (1983) *Slip Zones for discontinuities parallel to circular tunnels or shafts*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v.20, p.135-148.
- 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), p.371.
- Wiles, T.D. (2006) Reliability of Numerical Modelling Predictions. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.43, p.454-472.
- Wiles, T.D. (2007) Map3D User s Manual, available from <http://www.Map3D.com>.