

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/479

Retroanálise de Ruptura de Pilares não Estruturais - Abordagem Numérica no Dimensionamento com Vista na Melhoria da Segurança Operacional

Jih Horng Liu

Geotécnico Pleno, Ero Brasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, jih.liu@erobr.com

Daniel Santos de Santana

Coordenador de Geotecnia, Ero Brasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, daniel.santana@erobr.com

Lucas Renan Machado

Geotécnico Senior, Ero Brasil Caraíba, Jaguarari, Brasil, lucas.machado@erobr.com

RESUMO: A mineração subterrânea realiza a abertura de grandes escavações inseridas no corpo de minério, conhecidas como realces. A estabilidade dessas escavações está diretamente relacionada ao contexto geotécnico, às dimensões adotadas, além do adequado dimensionamento de pilares, sendo esses parâmetros influenciadores na segurança das operações, manutenção da estabilidade da mina e produtividade de lavra. Nos últimos dois anos, a ocorrência do rompimento de pilares, cuja única função é de controlar a diluição operacional, impactou as operações, principalmente em termos da produtividade dos realces. O emprego da modelagem numérica utilizando o MAP3D na retroanálise dos casos de ruptura de pilares, aliado ao adequado dimensionamento dos realces visa dessa forma demonstrar a necessidade de revisão das dimensões adequadas a fim de garantir maiores produtividades, flexibilização para a sequência de enchimento e melhores performances operacionais à atividade de lavra. Sendo assim, este trabalho demonstra o resultado obtido a partir da retroanálise de nove casos de rupturas de pilares.

PALAVRAS-CHAVE: RETROANÁLISE, RUPTURA DE PILAR, MODELAGEM NUMÉRICA.

ABSTRACT: Underground mining opens large excavations inserted into the ore body, known as stopes. The stability of these excavations is directly related to the geotechnical context, the dimensions adopted, in addition to the adequate dimensioning of pillars, with these parameters influencing the safety of operations, maintenance of mine stability and mining productivity. In the last two years, the occurrence of pillar failures, whose unique function is to control operational dilution, impacted operations, mainly in terms of enhancement productivity. The use of numerical modeling using MAP3D in the retro-analysis of cases of pillar failures, combined with the appropriate dimensioning of the stopes, aims to demonstrate the need to review the appropriate dimensions to guarantee greater productivity, flexibility in the filling sequence and better operational performances for mining activities. Therefore, this work demonstrates the results obtained from the retro analysis of nine cases of column ruptures.

KEYWORDS: BACKANALYSIS, PILLAR FAILURE, NUMERICAL MODELING.

1 INTRODUÇÃO

O adequado dimensionamento de pilares não estruturais visando o maior e melhor aproveitamento da reserva, alinhado aos critérios necessários de maiores performances operacionais, representa um desafio para as avaliações de risco geotécnico. Tomando em consideração as variações do processo de lavra que podem ocorrer no âmbito do planejamento de curto prazo, onde registros de ocorrência de instabilidades de projetos adjacentes são possíveis, mudanças no sequenciamento de lavra ou alterações no dimensionamento de realces para atingimento de *targets* de produção, representam variáveis que exercem certa influência na redistribuição de tensões do maciço e também alteração do regime de tensões induzidas nos pilares utilizados para o controle de diluição.

O gerenciamento de risco geotécnico utilizando técnicas de avaliação da estabilidade temporária dos pilares é então requisitado como um método para reduzir os possíveis impactos de cumprimento da eficiência da performance operacional na lavra dos realces. É nesse contexto em que, o emprego de ferramentas numéricas, que são capazes de quantificar ou estimar a probabilidade de ruptura do maciço, pode ser utilizada para o direcionamento de uma decisão adequada.

Nos últimos dois anos foram registrados nove casos de ruptura de pilares, na região do aprofundamento da mina subterrânea Pilar. A partir desses casos, foi realizada uma retroanálise com base no trabalho proposto pelo Wiles (2005), em que se busca quantificar o intervalo de probabilidade de ocorrência de ruptura dos pilares, para o qual foi considerado um nível de confiança de 90%.

2 OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo gerar o gráfico de probabilidade de ruptura de pilar para um intervalo de 90% de confiabilidade. Partindo-se do pressuposto de um nível inaceitável de probabilidade de ruptura, que estará relacionado ao nível de aceitação de risco para determinada lavra e para o plano de produção, a expectativa com o uso dessa ferramenta é de auxiliar o processo de análises geotécnicas de curto prazo, dando suporte a tomadas de decisões quanto a possíveis mudanças de sequenciamento ou redimensionamento de pilar visando a redução do risco ocorrência de ruptura.

3 METODOLOGIA

Inicialmente foi utilizada a modelagem tridimensional utilizando o software MAP3D com todos os casos observados de ruptura de pilares em região de lavra, ilustrados na figura 1. Nela, os realces foram divididos em quatro grupos (G), onde em cada grupo se tem a sequência de lavra dos realces (S).

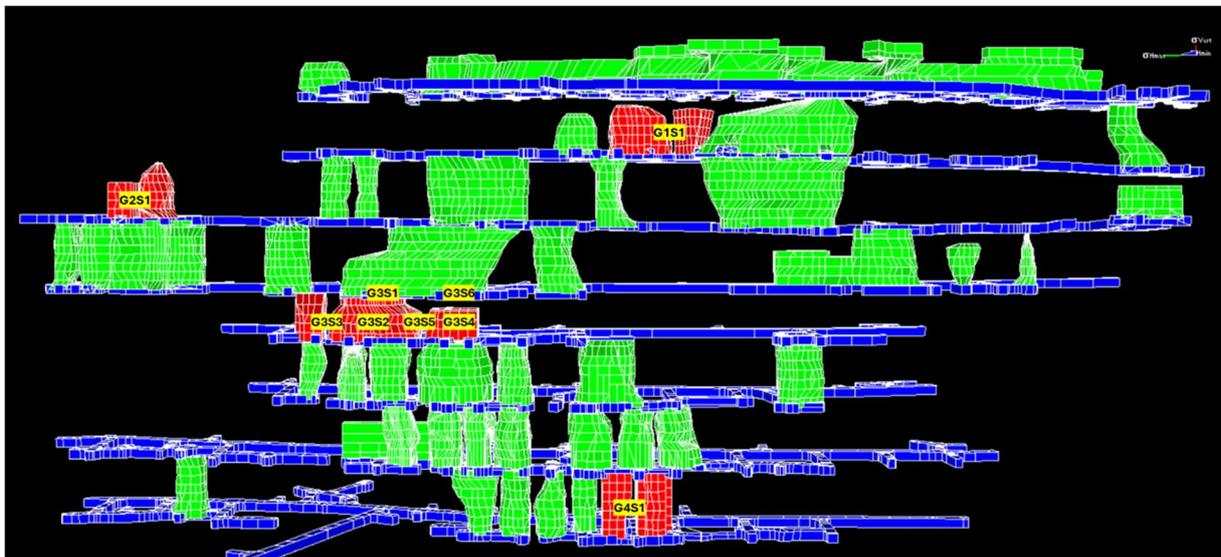


Figura 1. Modelo tridimensional para estimativa de tensões no software MAP3D. Em vermelho, estão destacados os realces onde ocorreram eventos de ruptura abrupta de pilares não estruturais na região do aprofundamento da mina de Pilar, separados em grupos (G), com a sequência dos realces lavrados (S) em cada um desses grupos.

Na tabela 1 abaixo estão os valores de σ_1 e σ_3 médios dos núcleos dos pilares que sofreram ruptura com as respectivas sequências de lavra de realces para cada um dos grupos.

Tabela 1. Sequência de lavra e valores médios de σ_1 e σ_3 do núcleo dos pilares que sofreram ruptura.

Grupo (G)	Sequência de lavra (S)	Pilar	Sigma1 (MPa)	Sigma3 (MPa)
1	1	Rib	94,937	1,229
2	1	Rib	96,228	2,581
3	1	Sill	94,631	8,011
3	2	Rib	95,390	1,016
3	3	Rib	118,888	4,400
3	4	Rib	104,594	10,736
3	5	Rib	129,655	4,438
3	6	Sill	149,326	9,914
4	1	Rib	156,004	13,768

Os parâmetros de estado de tensões utilizados como dados de entrada no modelo numérico são referentes à campanha de medições de tensões mais atualizada que foi realizada no ano de 2022, a partir do método overcoring. Os resultados obtidos a partir da medição de esforços sugerem valores diferentes para o K_h , K_H e direção das tensões principais, em relação aos valores utilizados em análises anteriores como no trabalho publicado por Freitas (2014). Abaixo, na tabela 2, estão os valores da relação entre a tensão vertical e a tensão horizontal mínima (K_h), e a relação entre a tensão vertical e a tensão horizontal máxima (K_H).

Tabela 2. Relação da variação de tensões horizontais principais em relação à tensão vertical.

K_h (E-W)	K_H (N-S)
1,3	1,6

A partir da modelagem numérica, foram obtidos os valores médios das tensões principais σ_1 (σ_1) e σ_3 (σ_3) no entorno do núcleo do pilar, na condição de ocorrência de ruptura para a sequência de lavra realizada. A figura 2 ilustra a curva indicativa do estado de tensão do núcleo do pilar no momento da ruptura.

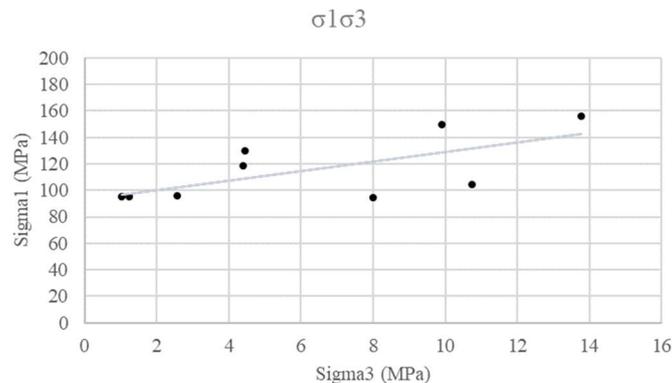


Figura 2. Gráfico representativo da relação entre σ_1 e σ_3 a partir da retroanálise do estado de tensões no núcleo de pilares não estruturais no momento da ruptura.

O passo seguinte foi calcular o desvio padrão (dp) dos dados do gráfico da figura 2 e o valor médio da tensão principal ($M\sigma_1$), indicados na tabela 3 para a obtenção do coeficiente de variação do modelo (C_p), que pode ser calculado através da equação 1. O coeficiente de variação representa o nível de confiabilidade na capacidade preditiva do modelo, obtido através da divisão do desvio padrão pela magnitude da tensão representativa ($M\sigma_1$) conforme Wiles (2006), resultando em um valor de 17,6%. De acordo com Wiles (2006), convencionalmente, na abordagem empírica, já se antecipa valores para o coeficiente de variação acima de 30%, o que torna a abordagem numérica através da retroanálise mais atraente por resultar em menores valores de C_p .

Tabela 3. Parâmetros estatísticos da retroanálise.

dp (Mpa)	Mσ ₁ (Mpa)
18,287	103,965

$$C_p = dp / M\sigma_1 \quad (1)$$

3.1. Probabilidade de ruptura

De acordo com Wiles (2005), assumindo-se σ_1 como uma variável que segue uma distribuição normal, a probabilidade de ruptura (P_f) pode ser obtida através da equação 2.

$$P_f = N(\Delta\sigma_1/dp) \quad (2)$$

Sendo N a função que representa a área sob a curva de distribuição normal.

Para um dado valor de P_f , a função inversa da equação 2, representada abaixo pela equação 3, gerado um intervalo de confiança para o gráfico da figura 2.

$$\Delta\sigma_1 = dp * N^{-1}(P_f) \quad (3)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado da retroanálise é o gráfico ilustrado na figura 3 abaixo, onde foi gerado um intervalo de confiança de 90% a partir da equação 3. O uso desse gráfico tem como proposta o auxílio na tomada de decisão a partir da quantificação da probabilidade de ruptura de pilares não estruturais sob condições geotécnicas semelhantes aos casos retroanalizados. Como também já discutido, essa via de análise quanto ao risco de uma possível ocorrência de ruptura de pilar visa ser uma ferramenta de uso para as análises geotécnicas de curto prazo, onde fatores como mudança de sequenciamento de lavra podem significar o incremento de diluição ou instabilidades no interior de escavações isoladas, impactando assim a aderência ao plano de produção.

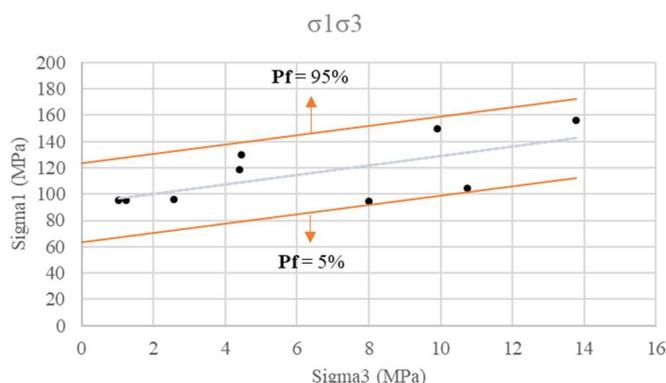


Figura 3. Intervalo de confiança para os casos de ruptura de pilares.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme novas ocorrências de ruptura de pilares, será possível verificar nível de confiabilidade do gráfico da figura 3, para a consolidação como sendo uma ferramenta de uso em avaliações geotécnicas rotineiras de curto prazo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Ero Brasil Caraíba pelo apoio e oportunidade no desenvolvimento de trabalhos ligados à geotecnia de mina subterrânea, que proporciona treinamentos e capacitação ao corpo técnico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Freitas, J.P.S (2014) *Análise de Risco de Projetos de Realces na Mineração Caraíba*. Mecânica das Rochas para Recursos Naturais e Infraestrutura - SBMR, Goiânia, set. 2014.
- Wiles, T.D. (2005) *Rockburst Prediction Using Numerical Modelling—Realistic Limits for Failure Prediction Accuracy*, in Y Potvin & M Hudyma (eds), RaSiM6: Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockburst and Seismicity in Mines Proceedings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 57-63.
- Wiles, T.D. (2006) *Reliability of numerical modelling predictions*. In: International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, v. 43, 2006.