

Modelagem numérica aplicada a taludes em uma cava de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero

Thalita da Silva Fernandes Bezerra
Geóloga, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, thalitasfb@gmail.com

Marcos Egydio da Silva
Docente, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, megydios@usp.br

Tiago Borges da Silva
Doutorando, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, tiago.borges.silva@usp.br

RESUMO: A sociedade atual demanda cada vez mais da exploração de recursos minerais, e surge a necessidade de maior eficiência na produção de minérios, o que leva a maiores desafios dentro dos aspectos técnicos que garantem a segurança. O aumento progressivo em quantidade e tamanho das cavas requer uma atenção aprimorada em relação à estabilidade de taludes. Tornou-se essencial aprofundar o entendimento do comportamento geomecânico do maciço rochoso, das condições hidrogeológicas e das alterações nos campos de tensões, que revelam situações de segurança e estabilidade cada vez mais complexas. O presente trabalho aborda estudos realizados nos taludes, compostos predominantemente por filitos de baixo índice de resistência. Levantamentos de dados geotécnicos foram realizados durante o trabalho de campo, e em conjunto com informações obtidas de estudos anteriores, foi possível desenvolver um modelo de tensão-deformação utilizando métodos numéricos através do uso do *software* PLAXIS 2D. Esses métodos subdividem o maciço rochoso em elementos finitos, cada um caracterizado por uma relação específica de tensão-deformação e propriedades que descrevem o comportamento mecânico do material. A partir disso, foram gerados modelos de análises numéricas de estabilidade de taludes para duas seções transversais na cava, que indicaram regiões mais críticas suscetíveis a deslocamentos com deformações resultantes das tensões do maciço, permitindo comparações com os deslocamentos observados em estudos anteriores feitos pelo método de equilíbrio limite.

PALAVRAS-CHAVE: Tensão-deformação, Estabilidade de taludes, Critério de ruptura, Classificação geomecânica, Geologia aplicada.

ABSTRACT: The current society increasingly demands the exploitation of mineral resources, leading to a need for greater efficiency in ore production. This requirement poses significant challenges in the technical aspects that ensure safety in open pit mines. The progressively increasing quantity and size of the pits require enhanced attention to slope stability. It has become essential to deepen the understanding of the geomechanical behavior of the rock mass, hydrogeological conditions, and changes in the stress field, that reveal complex safety and stability situations. This study focuses on slopes primarily composed of low-strength phyllites. Geotechnical data surveys were conducted during field work, and together with information from previous studies, it was possible to develop a stress-strain model using numerical methods generated by PLAXIS 2D software. These methods subdivide the rock mass into finite elements characterized by a specific stress-strain relation, and properties describing the mechanical behavior of the material. Based on this, numerical analysis for slope stability models were generated for two cross sections in the open pit mine, indicating critical surfaces susceptible to displacements due to stress-strain, allowing comparisons with displacements observed in previous studies conducted by the limit equilibrium method.

KEYWORDS: Stress-Strain, Slope Stability, Failure Criteria, Geomechanical Classification, Applied Geology.

1 INTRODUÇÃO

Em projetos de estabilidade de taludes normalmente são elaboradas análises por equilíbrio limite, em que se verifica a resistência ao cisalhamento de superfícies de ruptura naturais ou induzidas com diferentes geometrias. O Fator de Segurança (FS) é obtido por meio da análise do equilíbrio de forças atuantes e

resistentes ao longo de uma geometria representativa, utilizando suposições mecânicas simplificadas. Segundo Lorig *et al.* (2009), Métodos por Equilíbrio Limite (MEL) têm sido bem adaptados para problemas de estabilidade, no entanto, não podem representar deformações e deslocamento de maciços deformados ou susceptíveis a estas deformações. Para tanto, os métodos numéricos surgem como alternativa para condições complexas, utilizando modelos computacionais capazes de descrever o maciço rochoso, suas interações com tensões naturais iniciais e induzidas, anisotropia e critérios de ruptura. Os resultados destas análises podem representar situações de equilíbrio, com a verificação de resultados de tensão-deformação, ruptura e previsão de modos de falha (Wyllie e Mah, 2004).

A área utilizada para a elaboração deste projeto é de uma cava em uma mina ativa de minério de ferro hematítico, localizada no Quadrilátero Ferrífero. Em estudos realizados nesta cava, são encontradas rochas brandas (*weak rock*) representadas pelos filitos de diferentes composições conforme discutidos por Martin e Stacey (2018). A resistência do maciço rochoso composto por estes materiais e o desenvolvimento progressivo de taludes cada vez maiores resultam na necessidade de modelagens numéricas mais completas, com as quais será possível compreender deformações resultantes da alteração do campo de tensões (Martin *et al.*, 2018).

2 FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contexto Geológico

O Quadrilátero Ferrífero possui uma área de aproximadamente 7.000 km² está localizado na região central do estado de Minas Gerais (Dorr, 1969), pertencendo à porção sul do Cráton São Francisco.

Trata-se de um local extremamente importante do território brasileiro devido à presença de recursos minerais fundamentais para o desenvolvimento industrial, como, por exemplo, ferro, manganês e ouro (Fig. 1) (IBRAM, 2015).

Alkmim e Marshak (1998) definem cinco principais unidades litoestratigráficas do Quadrilátero Ferrífero: embasamento cristalino Arqueano; Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas, rochas intrusivas pós-Minas e Grupo Itacolomi (Fig. 2).

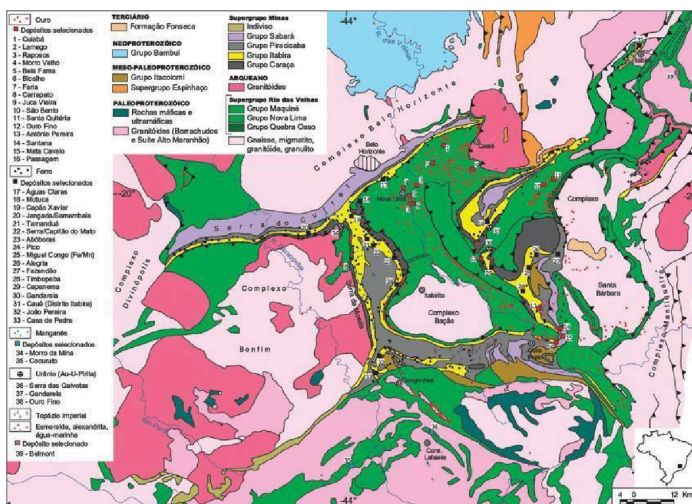


Figura 1: Mapa geológico e de recursos minerais do Quadrilátero Ferrífero, Bizzi *et al.* (2001), apud Dardenne e Schobenhuis (2003).

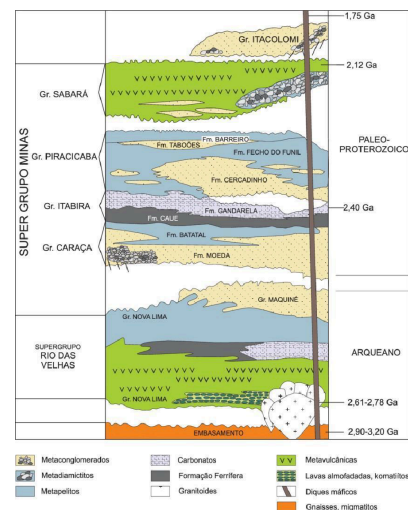


Figura 2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, Alkmim e Marshak (1998)

Por se tratar de uma região com rochas que não são homogêneas, possuindo um alto grau de fraturamento, descontinuidades e alterações, ocorrem problemas geotécnicos, que levam ao interesse por estudos mais aprofundados a respeito da estabilidade dos taludes ali presentes.

A mina utilizada para o estudo deste trabalho está localizada, geograficamente, a sul de Belo Horizonte, e geologicamente faz parte do sinclinal Moeda. As rochas que afloram no interior da mina pertencem às

Formações Batatal, Moeda e Cauê, que fazem parte do Supergrupo Minas, sendo respectivamente representadas pelos filitos, quartzitos e itabiritos.

2.2 Análise de Estabilidade de Talude

Segundo Hoek e Londe (1974), lidar com projetos de grandes proporções, como minas a céu aberto e barragens, é extremamente complexo e para isso é necessário ter um conhecimento prévio do comportamento do maciço rochoso. Por meio de dados da geologia estrutural e baseando-se em diagramas gerados a partir deles, é possível estimar este comportamento. Os autores propuseram os mecanismos de ruptura: circular, em cunha, planar e por tombamento, que podem ocorrer em taludes, de modo que, partindo da previsão de qual modelo ocorrerá, seja viável chegar a análises de estabilidades de taludes mais precisas.

Após compreender o mecanismo de ruptura do talude que está sendo estudado, a próxima etapa é determinar o método de análise a ser utilizado. Existem diversos métodos, contudo os que são mais utilizados são os Métodos de Equilíbrio Limite (MEL) e Métodos de Análise Numérica (MAN).

Utilizando o MEL, é possível determinar o fator de segurança, sendo o método de fatias o mais empregado, conforme indicado por Martin e Stacey (2018). A análise é conduzida com o propósito de avaliar se o talude apresenta resistência suficiente para suportar as tensões de cisalhamento que poderiam resultar em colapso. É importante notar, no entanto, que este método não é capaz de representar deslocamentos e velocidades de ruptura pois assumem que o material é rígido/ perfeitamente plástico.

Segundo Wyllie e Mah (2004), nos MAN, a massa é subdividida em elementos menores, e, por meio de abordagens matemáticas, estabelece-se a relação entre as tensões (forças internas) e deformações (ou deslocamentos) induzidas em um material. Os elementos distribuídos nos modelos podem ser conectados de forma contínua ou, separados por descontinuidades, com orientação e mergulho, constituindo o que é denominado de modelo descontínuo.

Os modelos contínuos assumem que o maciço é formado por uma massa contínua e apresenta grande vantagem na representação para análise de estabilidade de taludes em solo, maciços rochosos com comportamento de rocha intacta, rochas brandas e com alto grau de fraturamento. Entretanto, modelos deste tipo não são capazes de descrever a trajetória de uma superfície de falha responsável pela ruptura.

Nos modelos descontínuos as descontinuidades ou outras estruturas geológicas de interesse devem ser previamente conhecidas e localizadas. Estas estruturas são incorporadas como elementos discretos que compõem o sistema e permitem representar a influência de juntas, falhas ou contatos litológicos. No entanto, apenas as principais estruturas podem ser utilizadas, sendo necessário filtrar adequadamente e escolher aquelas mais susceptíveis à instabilidade.

3 METODOLOGIA

Para a realização desse projeto foram necessárias as seguintes etapas: revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados e relatórios antigos cedidos pela mineradora, trabalho de campo (mapeamento), organização de dados já existentes e dos que foram obtidos durante o mapeamento.

3.1 Trabalho de Campo

O objetivo dessa fase inicial foi a seleção criteriosa das regiões que seriam submetidas a um estudo mais detalhado. Dessa forma, foi realizada uma visita à mineradora com o objetivo de identificar áreas em que poderia ser feita uma análise mais aprofundada e que já dispunham de dados que ajudariam no projeto.

Em estudos anteriores, realizados por empresas de projeto e consultorias para o acompanhamento da estabilidade dos taludes e para o planejamento de expansão, a cava foi setorizada com base em suas características litoestruturais e de acordo com os potenciais modos de ruptura identificados em análises realizadas nos últimos anos. Foram criadas 10 seções transversais ao longo de toda a cava, e para esse projeto, foram escolhidas as seções B e C. Essa decisão se baseou na disponibilidade de sondagens que forneciam informações adicionais e, principalmente, na menor estabilidade observada nos estudos que empregaram análises de equilíbrio limite. Assim, a área foi selecionada para conduzir a análise de tensão-deformação.

A abordagem utilizada para a verificar a resistência das rochas foi idêntica àquela previamente adotada

pela mineradora, que ao longo dos anos tem seguido a classificação de Índice de Resistência de Maciços Rochosos proposto pela *International Society for Rock Mechanics-ISM* (1981).

3.2 Seções de estudo

Os pontos mapeados em campo, juntamente com aqueles registrados pelos geólogos da mineradora, estão representados na figura 3. Durante o reconhecimento das litologias em campo, realizou-se o levantamento de algumas descontinuidades e, principalmente, a determinação do índice de resistência em novos pontos.

É relevante destacar que as rochas presentes foram majoritariamente classificadas como R0 a R2; em algumas regiões, o índice foi R3. Conforme a ISRM (1981), essas rochas são consideradas extremamente brandas a brandas. A partir das sondagens previamente realizadas nas seções, foi possível confirmar os valores de resistência obtidos no mapeamento. Além disso, utilizando as seções transversais fornecidas pela mineradora e com o auxílio do *software* AutoCAD, foram criados modelos correspondentes às duas seções estudadas, conforme ilustrado nas figuras 4 e 5.

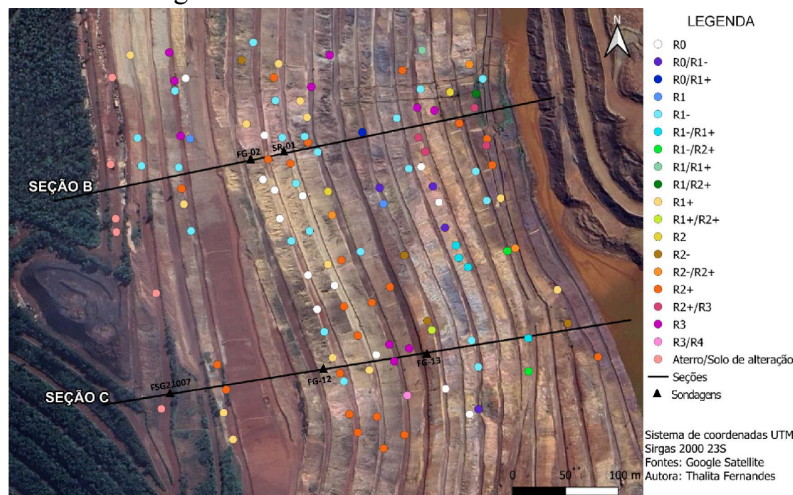


Figura 3: Pontos mapeados na cava divididos de acordo com o índice de resistência do material.

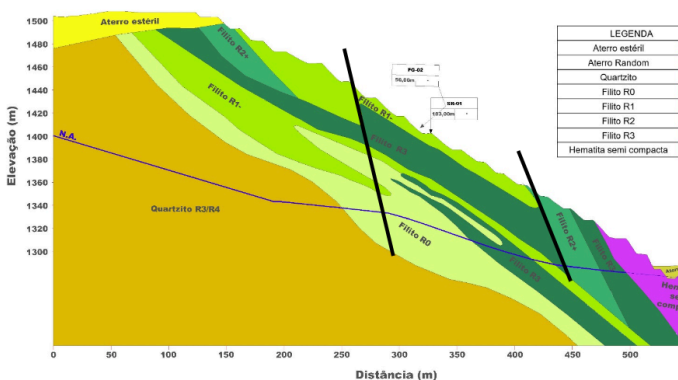


Figura 4: Seção transversal correspondente a da Seção B-B’.

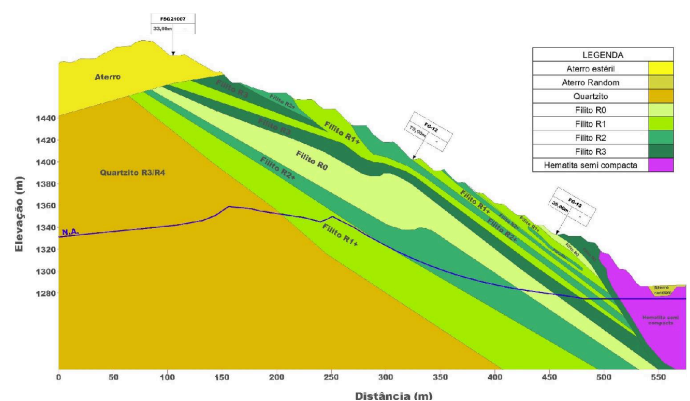


Figura 5: Seção transversal correspondente a área da Seção C-C’

3.3 Histórico de análises

Além do trabalho realizado em campo, outra etapa de extrema importância consistiu na análise do material disponibilizado pela mineradora. Com o auxílio desses documentos, foi possível aprimorar a compreensão dos eventos que ocorreram na mina ao longo dos anos.

O estudo mais recente foi realizado em 2022, a partir dele foram obtidos os parâmetros que estão organizados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros geotécnicos.

Litologia	Índice de resistência	E (MPa)	ν	C' (kPa)	ϕ (°)	γ (KN/m ³)
Filito	R0	180	0,3	22,5	26	22
	R1	220	0,3	50	28	
	R2	375	0,3	60	28	
	R3	600	0,35	120	30	
Aterro random	R3	600	0,3	5	33	19
Aterro compacto	R0	180	0,3	25	31	21
Hematita semi compacta	R1	700	0,3	80	35	30
Quartzito	R3	600	0,35	120	30	22

3.4 PLAXIS 2D

Como parte da continuidade do estudo, foi proposta uma nova abordagem que utiliza um modelo numérico. Para viabilizar os cálculos que são realizados, optou-se pelo uso do *software* PLAXIS 2D. Este utiliza o Método dos Elementos Finitos para realizar análises bidimensionais de deformação e estabilidade em projetos geotécnicos. Conforme descrito por Soares (2004), os modelos utilizados para representar situações reais podem ser desenvolvidos por meio de modelos axissimétricos ou planos. A versão bidimensional do PLAXIS 2D opera com elementos triangulares, oferecendo opções de 6 e 15 nós para a representação mais precisa das condições de estudo.

4 RESULTADOS

Na formulação do modelo numérico neste projeto, foi selecionado um modelo plano, empregando elementos triangulares de 15 nós com a finalidade de gerar mais informações. Para criação da malha, ajustou-se a distribuição de elementos como grossa, resultando em aproximadamente 3.200 elementos e 27.000 nós. Esses parâmetros foram selecionados com o objetivo de alcançar uma representação adequada e eficiente da estrutura em análise.

Neste estudo, as geometrias utilizadas se basearam nas seções transversais fornecidas pela mineradora, as quais foram importadas para o *software*. Para cada um dos materiais, foram utilizados os parâmetros correspondentes conforme indicados na Tabela 1. Os demais parâmetros dos materiais utilizados são automaticamente calculados no PLAXIS e estão apresentados a seguir:

Tabela 2: Parâmetros calculados pelo PLAXIS 2D.

Litologia	Grau de resistência	Parâmetros obtidos no PLAXIS 2D	
		G (MPa)	E_{ocd} (MPa)
Filito	R0	69,23	242,30
	R1	84,62	296,20
	R2	187,50	375,00
	R3	222,20	963,00
Aterro random	R3	230,80	807,70
Aterro compacto	R0	69,23	242,30
Hematita semi compacta	R1	269,20	942,30
Quartzito	R3	222,20	923,00

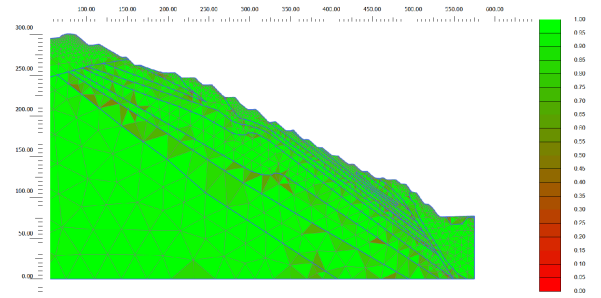
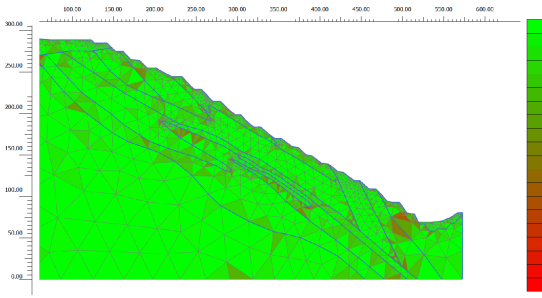


Figura 6: Refinamento da malha gerada na seção B-B'. Figura 7: Refinamento da malha gerada na seção C-C'.

Após verificar a qualidade da malha conforme ilustrado nas figuras 6 e 7, foi escolhida a fase Plástica para conduzir os cálculos. A seguir, estão apresentados os resultados para os deslocamentos nos eixos verticais, horizontais e totais nas seções B-B' e C-C' obtidos:

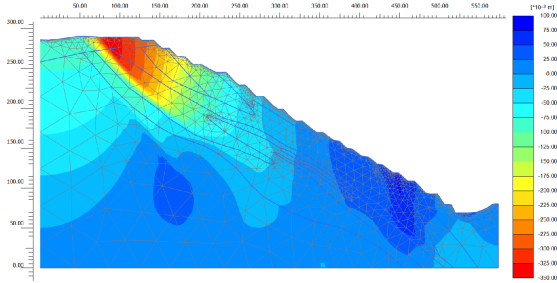


Figura 8: Deslocamentos no eixo vertical da seção B-B'.

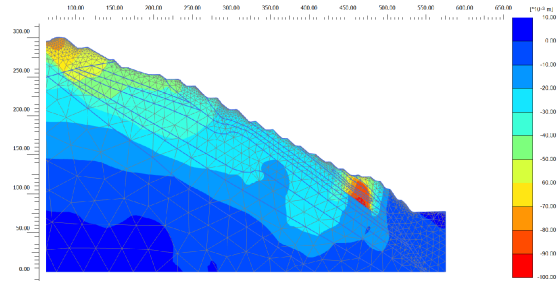


Figura 9: Deslocamentos no eixo vertical da seção C-C'.

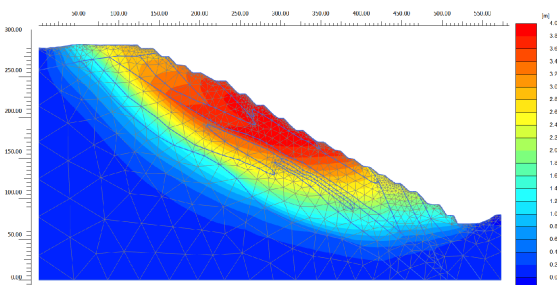


Figura 10: Deslocamentos no eixo horizontal da seção B-B'.

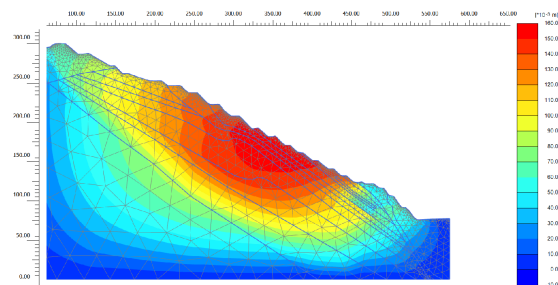


Figura 11: Deslocamentos no eixo horizontal da seção C-C'.

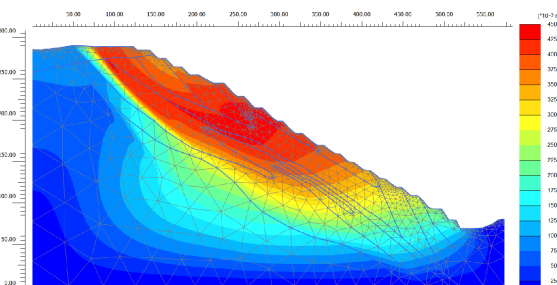


Figura 12: Deslocamentos total da seção B-B'.

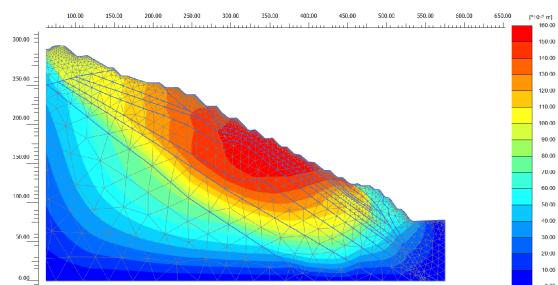


Figura 13: Deslocamentos total da seção C-C'.

4.1 Interpretação dos resultados

Conforme evidenciado nas imagens fornecidas, os modelos adotam uma escala de cores para representar diferentes características. Nas figuras 6 e 7, é possível observar uma gradação de tons esverdeados, indicando uma boa qualidade da malha gerada, enquanto tons avermelhados destacam regiões em que a qualidade não atende aos padrões desejados. Além disso, nota-se que regiões próximas à superfície exibem um maior número de elementos, uma vez que essas áreas são mais instáveis.

Já nas figuras 8 a 13, são apresentadas tonalidades mais quentes, representando maiores deformações nos taludes, e tonalidades mais frias, indicando uma deformação menor. Essa variação cromática possibilita uma análise visual imediata das condições dos taludes, facilitando a identificação de áreas críticas e a avaliação geral do desempenho do modelo em relação às deformações observadas.

As condições de contorno foram geradas automaticamente pelo *software*, levando em consideração as linhas que delimitam as camadas de solo à direita e à esquerda, próximas às regiões dos limites nos eixos verticais e horizontais, com valores ajustados para zero.

O modelo de tensão-deformação desenvolvido para a seção B-B' apresenta uma concentração de deformações em taludes com maior elevação, próximos ao topo. Esses taludes são predominantemente compostos pelas camadas de aterro estéril e filito R1. Os valores mais expressivos estão destacados na região em vermelho, indicando deslocamentos de $350,00 \times 10^{-3} \text{m}$ no eixo vertical (Fig.8), uma possível interpretação é devido a existência de uma tensão maior exercida pela camada de aterro nas camadas subjacentes de filito resultando em maiores deformações desses materiais.

Ao comparar esses resultados com o relatório de 2022 fornecido pela mineradora, no qual foi realizado um estudo pelo MEL, resultando em um círculo de ruptura (Fig. 14), observamos uma correlação com a figura 10, na qual são identificadas as regiões de deformação para o eixo horizontal. Essa análise conjunta fornece uma compreensão mais abrangente das características de deformação nos taludes, dado que os resultados obtidos estão dentro das zonas de maiores deformações compostas por rochas da Formação Batatal.

O modelo desenvolvido para a seção C-C' revela uma deformação uniforme ao longo dos taludes, com uma concentração notável na região do topo e outra área em destaque mais abaixo. A região onde ocorreu uma maior concentração é composta pelo filito R0, indicando deslocamentos de $100,00 \times 10^{-3} \text{m}$ no eixo vertical (Fig.9), o que poderia ocasionar situações de deformações nos materiais ao seu redor (filito R1 e filito R3).

Assim como realizado na seção B-B', foi possível estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos no relatório de 2022 (Fig. 15) e aqueles representados pela Figura 11, na qual são identificadas as regiões de deformação para o eixo horizontal. Essa análise comparativa amplia a compreensão das características de deformação nos taludes, contribuindo para uma avaliação mais completa e informada do desempenho do modelo.

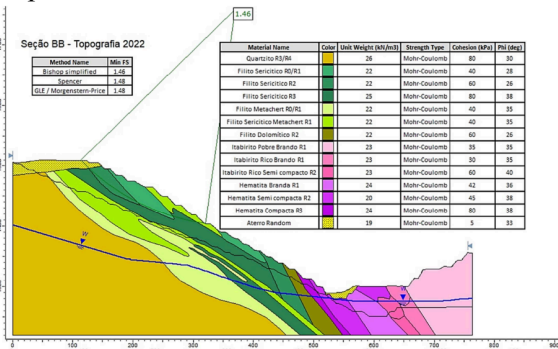


Figura 14: Análise de ruptura circular da seção B-B'.

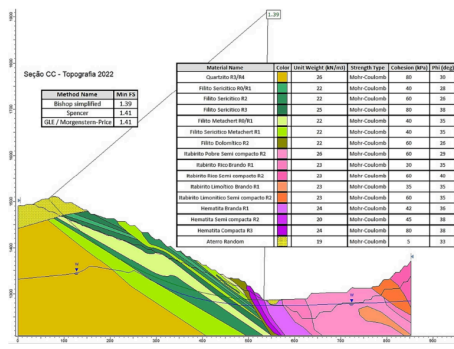


Figura 15: Análise de ruptura circular da seção C-C'.

Foi possível estabelecer que os resultados obtidos se encontram dentro das áreas de maior deformação. Contudo, os círculos não seguem precisamente os limites das regiões mais deformadas (em vermelho). Isso ocorre primeiramente devido ao fato de que a análise de equilíbrio limite resulta em um círculo perfeito e não demonstra a influência da geologia, enquanto a análise tensão-deformação está diretamente relacionada à distribuição das rochas com diferentes resistências (dados presentes na Tabela 1). Além disso, a discrepância pode ser explicada pelo fato de que, na análise de equilíbrio limite, um círculo com maior representatividade foi determinado para atender aos objetivos específicos do estudo.

Entretanto, um círculo que passa pelas áreas críticas, conforme evidenciado nas Figuras 14 e 15, pode proporcionar um nível de segurança semelhante ao obtido nas análises pelo modelo de tensão-deformação.

5 CONCLUSÃO

O estudo teve como base um levantamento histórico dos eventos ocorridos ao longo dos anos na mineradora. Durante o trabalho de campo, foi possível compreender o comportamento do material *in situ*. Após a coleta de informações no mapeamento geotécnico, adquirimos uma compreensão mais detalhada dos

comportamentos mecânicos e estruturais condicionados por falhas geológicas, as quais aparentemente modificam a geometria dos pacotes estratigráficos

Com base nos parâmetros das rochas presentes na cava, que compõem as seções B-B' e C-C', procedeu-se à modelagem numérica. Os modelos gerados abrangem uma geometria que inclui várias bancadas da cava, resultando em um modelo de corpo total, geral e simplificado. Apesar da capacidade de identificar regiões mais críticas suscetíveis a deslocamentos devido à tensão-deformação, alinhando-se aos resultados de estudos anteriores, a escala utilizada nas análises numéricas não atingiu o nível de detalhamento originalmente planejado para o projeto.

Para uma compreensão mais precisa, seria necessário conduzir um mapeamento de maior detalhe, levando em consideração as bancadas, bem como classificações geomecânicas e ensaios mecânicos laboratoriais. Isso garantiria a obtenção de resultados mais representativos e detalhados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores por todo conhecimento compartilhado, à Mineradora pelo fornecimento dos dados e à todos os funcionários que me ajudaram durante e após o trabalho de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F.F.; Marshak, S. (1998). *Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. *Precambrian Research*, 90(1/2). p. 29-58
- Dardenne, M. A., Schobbenhaus, C. (2003) *Depósitos Minerais no Tempo Geológico e Épocas Metalogenéticas*. In *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, Serviço Geológico do Brasil – CPRM, capítulo VII, p. 365-448. Brasília.
- Dorr, J.V.N. (1969). *Desenvolvimento fisiográfico, estratigráfico e estrutural do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil* (nº 641-A, pp. A1-A110). Escritório de impressão do governo dos EUA.
- Hoek, E.; Londe, P. (1974). *The Design of Rock Slopes and Foundations*. Proc. 3rd International Congress of Rock Mesch, ISRM, Denver.
- IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (2015). *Panorama da mineração em Minas Gerais., Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Ferro de Metais – Brasília*.
- ISRM (1981) *Rock Characterization Testing and Monitoring*. E.T. Brown, 211 p.
- Loring, L.; Stacey, P.; Read, J. (2009). *Slope Design Methods*. In: READ, J. & STACEY, P. (ed). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. CRC Press/Balkema, The Netherlands.
- Martin, D. & Stacey, P. (ed.) (2018). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO PUBLISHING.
- Martin, D.; Lorig, L.; Stacey, P. (2018). *Slope Design Considerations*. In: MARTIN, D. & STACEY, P. (ed.). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO PUBLISHING.
- Soares, J. M. (2004) *Estudo Numérico-Experimental da Interação Solo-Estrutura em Dois Edifícios do Distrito Federal*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265p.
- Wyllie, D.C. & Mah, C.W. (ed) (2004). *Rock slope engineering – civil and mining*, 4th ed, Spon Press, New York.