

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**MODELAGEM NUMÉRICA APLICADA A TALUDES EM UMA CAVA DE
MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

THALITA DA SILVA FERNANDES BEZERRA

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

Coorientador: MSc. Tiago Borges da Silva

MONOGRAFIA- TRABALHO DE FORMATURA

TF- 23/59

SÃO PAULO

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela grande oportunidade de chegar até aqui, me dando força, paciência e sendo meu guia ao longo de todos os desafios que precisei enfrentar.

Aos meus pais, Gilvanete e Lindolfo, por todo apoio e amor incondicional. Tudo que conquistei só foi possível pois vocês me motivaram a lutar pelos meus sonhos, apesar de tudo parecer impossível, e acreditaram que eu poderia chegar até aqui mesmo quando eu já não acreditava mais em mim.

Agradeço ao meu orientador Prof. Marcos Egydio por toda ajuda ao longo deste ano, contribuindo com suas incríveis explicações, pela paciência e atenção em todos os momentos. Ao meu coorientador Tiago Borges por todas as discussões que acrescentaram muito para que eu possa ser uma profissional capacitada, pela amizade e paciência ao longo deste trabalho.

Aos meus amigos da graduação: Alana, Alex, Bianca, Danilo, Eduardo, José, Juliana, Larissa, Maithe, Michelle, Victor, Vitória e Wilson. Obrigada por segurar minha mão em meio às dificuldades. Vocês foram fundamentais ao longo desses anos!

À minha família do Museu de Geociências, em especial a Miriam e Ideval por todo o acolhimento e longas conversas sobre questões da geologia e da vida.

À toda equipe da JS Geologia Aplicada que estiveram sempre dispostos a me ajudar e contribuir diretamente para a minha formação profissional.

À todos os funcionários da mineradora, principalmente ao Diógenes Amaral, pela disponibilidade na visita de campo e por todo conhecimento compartilhado.

À Cláudia por toda ajuda antes mesmo de iniciar a graduação, por todas as correções e dicas para uma melhor apresentação deste trabalho; à Margareth e ao Gustavo por todo carinho e por acreditarem no meu potencial; as minhas queridas amigas Ana, Letícia, Lídia e Lya por ouvirem meus desabafos em momentos de desespero; e ao Andrey, que mesmo de longe, sempre me motivou a insistir na geologia, compartilhando suas experiências e visões.

Por fim, agradeço a todos os professores e funcionários do IGc que contribuíram para a minha formação. Entre muitas outras pessoas que fizeram e fazem parte da minha trajetória!

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 em cavas de mineração. 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, em uma mineradora localizada no Quadrilátero Ferrífero. 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, porém não atenderam o nível de detalhamento necessário para garantir resultados mais precisos, dada a escala utilizada.

Palavras-chave: Geologia aplicada; Classificação geomecânica; Critério de ruptura; Estabilidade de taludes; Tensão-deformação.

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 in a mining operation in the Iron Quadrangle. 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-sectional areas in the open pit mine, indicating critical surfaces susceptible to displacements due to stress-strain. However, these models did not meet the necessary detail to guarantee accurate results due to the scale used.

Keywords: Applied Geology; Geomechanical Classification; Failure Criteria; Slope Stability; Stress-Strain.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	7
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1. Contexto Geológico	8
3.2. Maciço Rochoso	10
3.4. Critérios de Ruptura.....	16
3.5. Análise de Estabilidade de Talude.....	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
4.1. Trabalho de campo	19
4.2. Seções de estudo	22
4.3. Histórico de análises.....	25
4.4 PLAXIS 2D.....	26
4.4.1 Etapas da modelagem numérica	27
5. RESULTADOS	30
5.1 Interpretação dos resultados	35
6. CONCLUSÃO.....	38
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXOS	41

1. INTRODUÇÃO

A exploração mineral tem ganhado destaque nos últimos anos, tornando-se fundamentais os estudos voltados para a estruturação de minas a céu aberto e subterrâneas. Segundo Milanez (2017), no Brasil a principal forma de extração mineral é através das minas a céu aberto. Dessa forma, com a finalidade de garantir maior segurança em todo processo da exploração mineral, são realizadas análises de estabilidade em cavas.

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 representadas pelos filitos de diferentes composições conforme discutidos por Stacey e Martin (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. OBJETIVOS

O presente Trabalho de Formatura tem como principal objetivo gerar um modelo geomecânico e realizar uma análise de tensão-deformação para avaliar o comportamento dos taludes de escavação localizados na região oeste da mina, composto pelo filito, através dos seguintes objetivos específicos:

- Compreender o comportamento mecânico das rochas presentes, bem como a influência das estruturas geológicas que compõem o maciço rochoso.
- Desenvolver um modelo final com base na relação tensão-deformação que influencia o talude.
- Estabelecer uma correlação com os resultados anteriores elaborados por equilíbrio limite.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Contexto Geológico

O Quadrilátero Ferrífero possui uma área de aproximadamente 7.000 quilômetros quadrados 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).

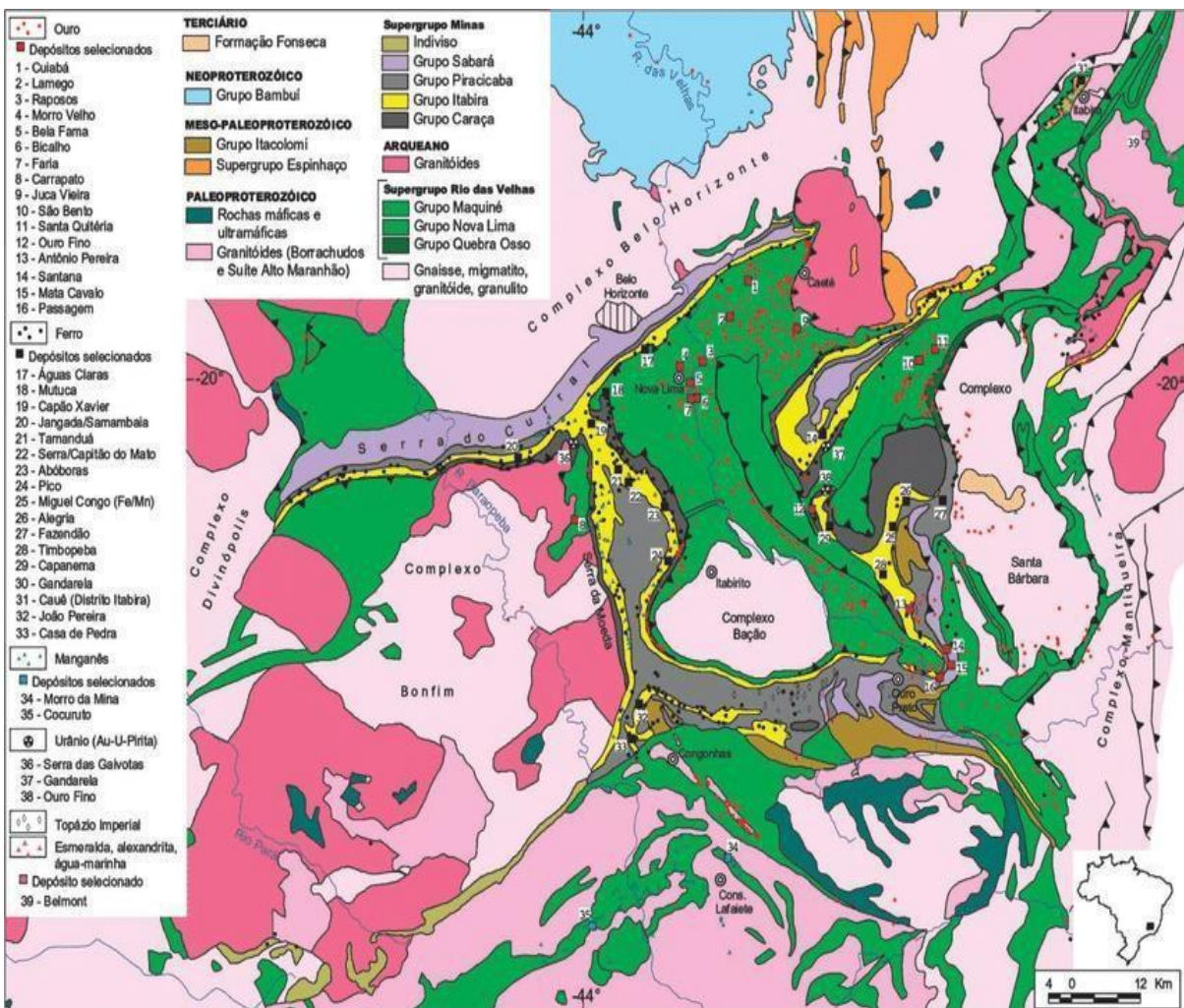


Figura 1: Mapa geológico e de recursos minerais do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Bizzi *et al.* (2001), *apud* Dardenne e Schobenhau (2003).

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).

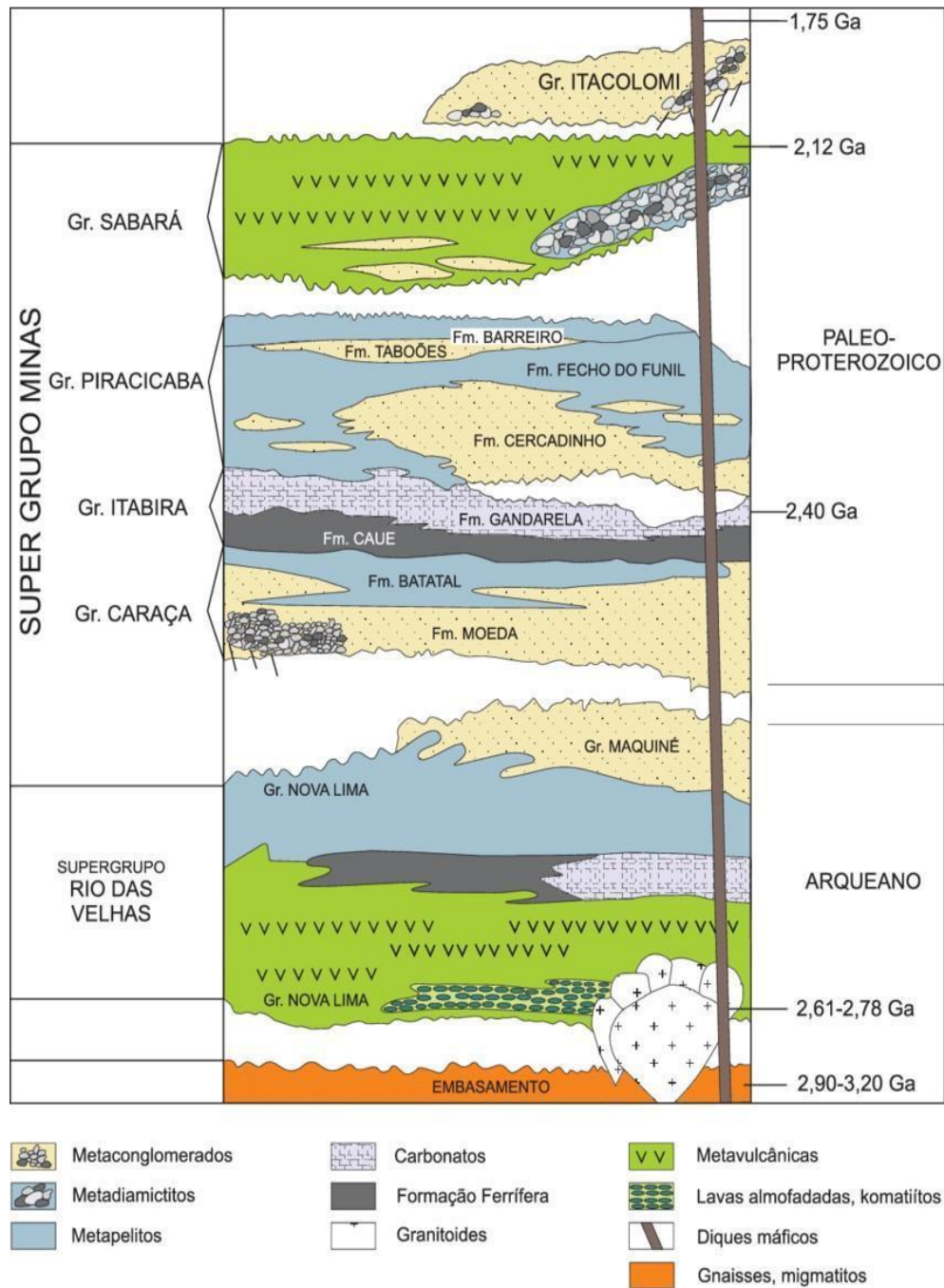


Figura 2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Alkmim e Marshak (1998)

Por se tratar de uma região com rochas que não são homogêneas, possuindo um alto grau de fraturamento, discontinuidades 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.

3.2. Maciço Rochoso

Por maciço rochoso entende-se uma massa de rocha interrompida por descontinuidades, constituída de blocos discretos, estes últimos com propriedades de rochas intactas- rocha intacta é uma designação aplicada a rochas que não apresentam descontinuidades ou planos de fraqueza (Pio Fiori e Carmignani, 2009). As descontinuidades são quaisquer feições geológicas que causam a interrupção da continuidade física de uma rocha intacta, sendo as mais comuns presentes em todos os maciços rochosos: juntas, falhas, contatos litológicos e foliações metamórficas (ISRM, 1981).

Os maciços rochosos apresentam uma grande complexidade devido a diversos fatores. Além de exibirem um comportamento descontínuo, podem também ser caracterizados por sua heterogeneidade e anisotropia. Sob o efeito de escala, apresentam variações, possuem composição mineralógica distinta, sofrem alterações devido à presença de água e demonstram comportamento estrutural e tectônico diferente. A depender do que está sendo aplicado sobre um maciço, seu comportamento será distinto, buscando alcançar o equilíbrio de seus blocos. Além disso, é importante ressaltar que há diferentes formas de classificá-lo e, de acordo com Wyllie e Mah (2004), para uma melhor compressão dos maciços rochosos é importante ressaltar as principais propriedades/parâmetros:

- Tipo da rocha: definido pela origem da rocha (sedimentar, ígnea ou metamórfica), sua mineralogia, cor e tamanho dos grãos (Deere e Miller, 1966);
- Tipo de descontinuidade;
- Orientação da descontinuidade: expressa pelo mergulho e direção do mergulho da superfície;
- Espaçamento: distância entre as descontinuidades adjacentes presentes no maciço rochoso;

- Persistência: é a medida de comprimento contínuo ou área da descontinuidade, sendo o parâmetro responsável por definir o tamanho do bloco;
- Rugosidade: irregularidades de relevo presentes nos planos das descontinuidades. Influência a resistência ao cisalhamento;
- Resistência das paredes: capacidade de resistir a compressão sem resultar em ruptura da superfície;
- Intemperismo: resulta na perda de resistência da rocha;
- Abertura: é o espaço entre os lados opostos de uma descontinuidade;
- Preenchimento: material que separa as paredes adjacentes da descontinuidade;
- Infiltração/Percolação: fornece informações sobre a abertura pois o fluxo de água geralmente fica concentrado nas descontinuidades;
- Tamanho do bloco: determinado pelo espaçamento
- Número de famílias: para corresponder a mesma família é necessário possuir mesma orientação e composição.

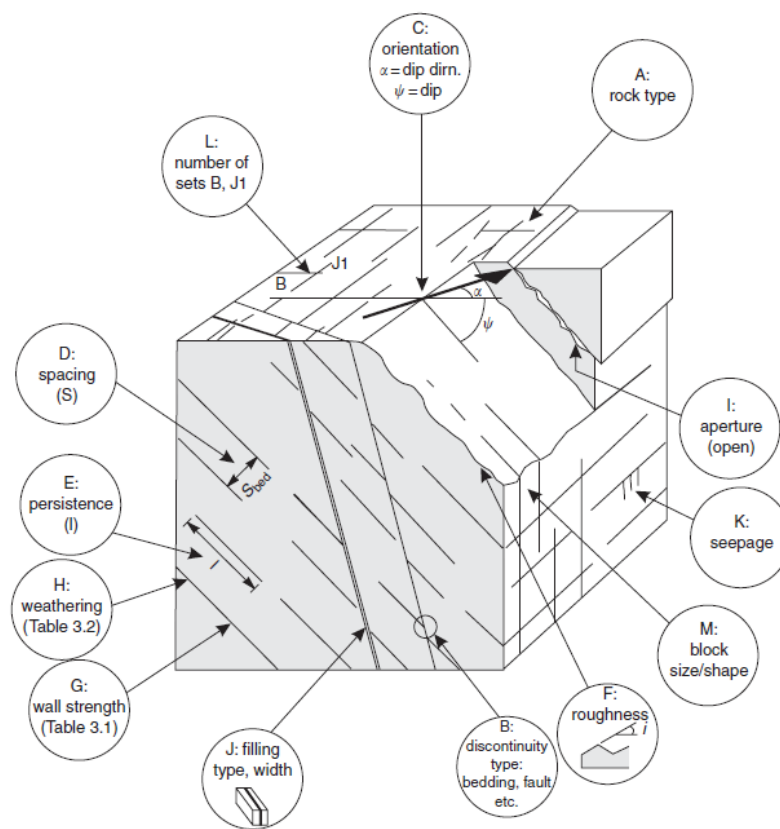


Figura 3: Características das descontinuidades em maciços rochosos: parâmetros que descrevem o maciço rochoso. Fonte: Wyllie (1999)

3.3. Classificações Geomecânicas

As classificações geomecânicas são de extrema importância. É através delas que é possível categorizar as características do maciço rochoso, organizando-as em grupos ou classes (Mesquita, 2008). Aplicando-as no contexto de taludes em cavas de mineração a céu aberto, é essencial que ocorram essas classificações como forma de garantir a segurança e o maior aproveitamento dos recursos que estão sendo extraídos, pois tornam-se viáveis taludes mais íngremes a partir de estudos que garantam a estabilidade. Dessa forma, os parâmetros são quantificados numericamente com a finalidade de facilitar a compressão das estruturas analisadas. Os sistemas de classificações geomecânicas que são mais utilizados, serão mais bem descritos abaixo:

1) O sistema RMR (*Rock Mass Rating*) foi proposto por Bieniawski (1973) e, ao longo dos anos, na medida em que foi sendo aplicado em projetos diferentes, a classificação foi sendo aprimorada. Segundo Bieniawski (1989) os principais objetivos ao realizar o uso desta classificação são:

- Identificar os principais parâmetros que influenciam o comportamento de um maciço rochoso;
- Dividir o maciço em grupos de comportamentos mecânico semelhantes,
- Fornecer uma base para a compreensão das características de cada grupo;
- Relacionar a experiência das condições das rochas em um local com as condições encontradas em outros locais;
- Obter os parâmetros quantitativos e as diretrizes para projeto de engenharia;
- Fornecer uma base comum para a comunicação entre engenheiros e geólogos.

Para realizar a classificação RMR são atribuídos pesos diferentes nos parâmetros que são utilizados:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- RQD (*Rock Quality Designation*) (Deere, 1989);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condições das descontinuidades;
- Ação da água subterrânea;

Tabela 1: Sistema de classificação de maciços rochosos-RMR.

1	resistência do material intacto	índice de compressão puntiforme (MPa)	> 10	10 a 4	4 a 2	2 a 1	prefere-se resistência à compressão simples		
		resistência à compressão simples (MPa)	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	25 a 5	5 a 1	< 1
			15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		100 a 90	90 a 75	75 a 50	50 a 25	< 25		
			20	17	13	8	3		
3	espaçamento das descontinuidades (m)		> 2	2 a 0,6	0,6 a 0,2	0,2 a 0,06	< 0,06		
			20	15	10	8	5		
4	condição das descontinuidades	persistência (m)	<1	1 a 3	3 a 10	10 a 20	> 20		
			6	4	2	1	0		
		abertura (mm)	selada	< 0,1	0,1 a 1	1 a 5	> 5		
			6	5	4	1	0		
		rugosidade	muito rugosa	rugosa	levemente rugosa	plana	polida		
			6	5	3	1	0		
		preenchimento	nenhum	duro <5	duro >5	mole <5	mole >5		
			6	4	2	2	0		
alteração	sã	levemente alterada	moderadamente alterada	altamente alterada	decomposta				
	6	5	3	1	0				
5	água subterrânea	infiltração em 10m de túnel (l/min)	nenhuma	< 10	10 a 25	25 a 125	> 125		
		pressão de água na fratura/tensão máxima principal	0	< 0,1	0,1 a 0,2	0,2 a 0,5	> 0,5		
		condições gerais	completamente seco	úmido	molhado	gotejamento	fluxo		
			15	10	7	4	0		

Fonte: Bieniawski (1989).

2) Outra classificação bem difundida é a Q (*Rock Mass Quality*), proposta por Barton *et al.*, (1974). Esta, assim como o RMR, também possui alguns parâmetros para que seja viável realizar a classificação: índice de rugosidade, grau de alteração, número de famílias de juntas, fator de redução devido a presença de água.

$$Q = \left(\frac{RDQ}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

Q: índice de qualidade do maciço rochoso;

RQD: “*Rock Quality Designation*”;

Jn: índice da influência do número de famílias das fraturas;

Jr: índice de influência da rugosidade das paredes das fraturas;

Ja: índice de influência da alteração das paredes das fraturas;

Jw: índice de influência da ação da água subterrânea;

SRF: índice de influência do estado de tensões do maciço (*Stress Reduction Factor*).

Para cada parâmetro utilizado na equação (1), um valor é atribuído com base nas condições e características observadas no maciço. Cada parâmetro é avaliado de maneira individual e, por meio do uso de tabelas predefinidas (Anexo I), recebe uma pontuação correspondente. Esse processo viabiliza a aplicação da equação apresentada.

3) Por fim, a classificação GSI (*Geological Strength Index*), proposta por Hoek (1994). Fornece um sistema para estimar a redução na resistência do maciço rochoso para diferentes litotipos. Os valores do GSI estão relacionados ao grau de fraturamento e a condição da superfície de descontinuidades. O método considera que a estabilidade de maciço rochoso articulado depende da liberdade dos blocos de rocha deslizarem e girarem sob diferentes condições de estresse. Esta mobilidade é controlada pela forma geométrica das peças de rocha intacta e da condição das superfícies das descontinuidades que os separam.

O GSI é feito por meio da análise e interpretação visual do maciço rochoso. O método utiliza ábacos que representam características observacionais de dois atributos: tipologia estrutural do maciço e condição da superfície das descontinuidades. Os dois atributos estão dispostos em dois diferentes eixos e divididos em categorias individuais que representam características que variam entre a de melhor qualidade geomecânica ou favorável à estabilidade e de pior qualidade ou menos favorável. Os eixos formam uma matriz em que é selecionada a característica mais representativa para cada um destes dois atributos e a correlação determina o valor ou faixa de valor do GSI, como exemplificado na Tabela 2:

Tabela 2: Determinação do valor GSI.

<p>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA (GSI) PARA MACIÇOS ROCHOSOS HETEROGÊNEOS TIPO “FLYSCH” Gráfico modificado e ampliado por V. Marinos*, do original de P. Marinos & E. Hoek (2001)</p> <p>Entende-se por maciços rochosos heterogêneos aqueles com camadas alternadas de tipos litológicos claramente diferentes, com diferenças significativas em suas propriedades de resistência. Para o tipo Flynch, em uma formação típica com maciços rochosos heterogêneos, essas alternâncias são compostas por arenitos e siltitos. Podem estar presentes folhelhos de argila. A partir de uma descrição da litologia, estrutura e condições de superfície das discontinuidades (particularmente dos planos de estratificação), escolha uma caixa no gráfico. A seleção da estrutura deve ser baseada na perturbação tectônica (não perturbada, levemente perturbada, fortemente perturbada - dobrada, desintegrada, cisalhada), a proporção de siltitos contra arenitos e a expressão dor não estratificação dentro das camadas siltíticas. Nos tipos IV e V, quando a espessura dos leitos de arenito excede 50cm, sugere-se um aumento do valor do GSI em 5. Do tipo IV e seguintes, os planos de estratificação são perceptíveis no interior do maciço siltítico. Localize a posição no box que corresponde às condições e estime o valor médio GSI dos contornos. A determinação da estrutura e a condição de discontinuidades podem variar entre dois campos adjacentes. Observe que o critério de Hoek-Brown não se aplica a falhas estruturalmente controladas. Onde discontinuidades planares fracas contínuas desfavoravelmente orientadas estão presentes, estas irão dominar o comportamento do maciço rochoso. A resistência de alguns maciços rochosos é reduzida pela presença de águas subterrâneas e isso pode ser permitido pelo ligeiro deslocamento para a direita nas colunas para condições moderada, pobre e muito pobre. A pressão da água não altera o valor do GSI e é tratada usando uma análise de tensão eficaz.</p>		<p>CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DE DESCONTINUIDADES (Predominantemente planos de estratificação)</p>	
		<p>MUITO BOM Superfícies recentes, muito ásperas e sem intemperismo</p>	<p>BOM Superfícies ásperas, levemente desgastadas e oxidadas</p>
		<p>MODERADA Superfícies lisas, moderadamente desgastadas e alteradas</p>	<p>POBRE Superfícies muito lisas, ocasionalmente com espelhos de falha, com revestimento compacto ou preenchimentos com fragmentos angulares</p>
		<p>MUITO POBRE Superfícies muito lisas, com espelhos de falha ou altamente desgastadas, com revestimento de argila macia</p>	
<p>ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO</p>		<p>DIMINUIÇÃO DA QUALIDADE DAS DESCONTINUIDADES</p>	
<p>TIPO I. Não perturbado, com camadas de arenito de espessura média a grossa, com películas finas esporádicas de siltito. Em túneis rasos ou taludes, onde o confinamento é pobre, o modo de falha tem um caráter cinemático, controlado pelos planos de estratificação e o GSI é insignificante.</p>	<p>TIPO II. Siltitos maciços e não perturbados (os planos de estratificação são imperceptíveis), com finas camadas intermediárias esporádicas de arenitos.</p>	80	I
<p>TIPO III. Arenitos moderadamente perturbados, com finas camadas intermediárias de siltito.</p>	<p>TIPO IV. Moderadamente perturbado, maciço com quantidades similares de arenito e siltito.</p>	70	II
<p>TIPO V. Moderadamente perturbado, siltito com camadas intermediárias de arenito.</p>	<p>TIPO VI. Moderadamente perturbado, siltitos com camadas intermediárias esparsas de arenito.</p>	60	III
<p>TIPO VII. Maciço rochoso dobrado, fortemente perturbado, que mantém sua estrutura, com arenito e siltito em extensão semelhante.</p>	<p>TIPO VIII. Maciço rochoso dobrado, fortemente perturbado, com intercamadas de siltitos e arenito. A estrutura é mantida e na deformação – cisalhamento não é forte.</p>	50	IV
<p>TIPO IX. Maciço rochoso desintegrado, que pode ser encontrado em grandes zonas de falhas e/ou intemperismo elevado. Neste tipo, principalmente, material frágil está presente, com alguns siltitos perturbados entre pedaços de rocha.</p>	<p>TIPO X. Siltito ou xisto argiloso intensamente dobrado/falhado, tectonicamente deformado, com camadas de arenito quebradas e deformadas, formando uma estrutura quase caótica.</p>	40	V
<p>TIPO XI. Siltito ou xisto argiloso fortemente cisalhado tectonicamente, formando uma estrutura caótica, com bolsões de argila. Finas camadas de arenito são transformadas em pequenos pedaços de rocha. Em última análise, o comportamento do terreno é o de um solo.</p>		30	VI
		20	VII
		10	VIII
			IX
			X
			XI

N/A Significa combinação geologicamente impossível. Nas áreas não sombreadas, tais maciços rochosos não são impossíveis de encontrar, mas é muito incomum

→ Direção da perturbação tectônica e deformação de litologia de blocos rochosos equivalentes

Fonte: Marinos et al., 2000.

O índice GSI considera o maciço seco e não faz a relação com a orientação da descontinuidade, já que pressão de água e orientação de descontinuidade são considerados no projeto. Desta forma, a presença de água poderá influenciar na piora da qualidade da superfície em análises de estabilidade de talude devido a sua influência no intemperismo químico, no entanto, no método não são consideradas as poropressões para análise de tensões.

3.4. Critérios de Ruptura

No final do século XVIII, o físico francês Charles Augustin de Coulomb, apresentou, na Academia Francesa de Ciências, seu artigo que definia um critério para prever o estado de esforços no qual uma dada rocha, sob pressão, está próxima da ruptura, ou seja, quando a rocha está sob esforço crítico. Posteriormente, no século XIX, o engenheiro alemão Otto Mohr propôs seu conhecido diagrama circular, no qual o critério de ruptura de Coulomb pode ser convenientemente descrito por uma linha reta no espaço de Mohr. A equação (2) fundamental do critério é a seguinte:

$$\tau = c + \sigma \times \tan(\phi) \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

τ = esforço cisalhante do plano de falha;

σ = esforço normal principal;

c = coesão do material;

ϕ = ângulo de atrito interno do material.

A orientação do plano de ruptura pode ser determinada a partir do ponto em que o círculo de Mohr toca a envoltória de ruptura. A combinação do círculo de Mohr para o esforço e o critério de ruptura de Coulomb disponibiliza uma compreensão das condições do esforço no momento da ruptura e fornece também uma ferramenta poderosa nas análises geotécnicas, como as que serão utilizadas neste trabalho.

Outro critério de ruptura amplamente utilizado é o modelo proposto por Hoek-Brown (1980 a,b). Neste método empírico, a resistência ao cisalhamento é representada por uma envoltória curva de Mohr. Esse critério de resistência é derivado da teoria inicialmente proposta por Griffith (1924), a qual era mais aplicada a rochas frágeis. Hoek e Brown desenvolveram uma adaptação desse modelo para aplicação

em rochas duras, levando em consideração características específicas desses materiais, incluindo a presença de descontinuidades.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Equação (3)}$$

Em que :

σ_1 = tensão principal maior na ruptura;

σ_3 = tensão principal menor na ruptura;

σ_{ci} = resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;

m_b , s e a = constantes características do tipo de maciço rochoso e da litologia.

3.5. 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 que podem ocorrer em taludes (Fig. 4), de modo que, partindo da previsão de qual modelo ocorrerá, seja viável chegar a análises de estabilidades de taludes mais precisas.

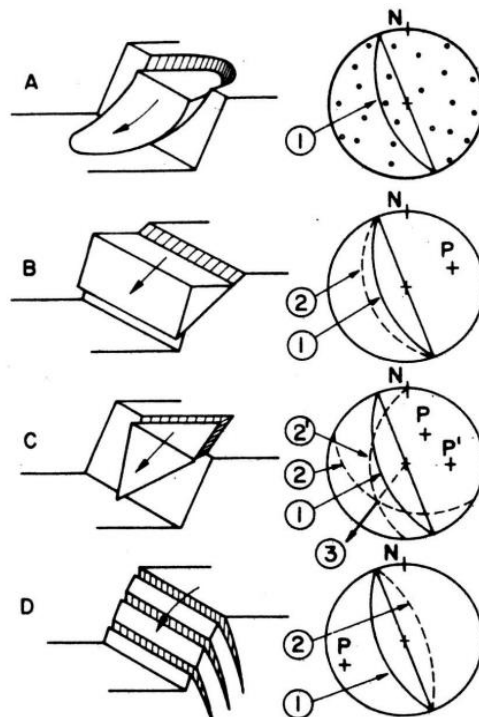


Figura 4: (A) Ruptura circular em solo, rocha estéril ou rocha extremamente fraturada sem padrão estrutural identificável; (B) Ruptura planar em estrutura altamente ordenada; (C) Ruptura em cunha envolvendo deslizamento ao longo da linha de interseção de dois planos; (D) Ruptura por tombamento em rocha dura com descontinuidades de mergulho acentuado. (1) Face do talude; (2) (2') Planos de descontinuidades; (P), (P') Polos dos planos, (3) Sentido do deslizamento. Fonte: Hoek e Londe (1974).

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 e métodos de análise numérica.

Utilizando o Método do Equilíbrio Limite, é possível determinar o fator de segurança, sendo o método de fatias o mais empregado, conforme indicado por Stacey e Martin (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 métodos de análises numéricas, a massa é subdividida em elementos menores, e, por meio de abordagens matemáticas, estabelece-se a relação entre as tensões (forças internas) e deformações (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.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

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.

4.1. Trabalho de campo

Foi realizada uma visita à mineradora entre os dias 01 e 07 de junho de 2023. Em um primeiro momento, a equipe de geólogos-geotécnicos, especializados em monitorar os taludes e na elaboração de projetos de prevenção destinados a manter a estabilidade das cavas, desempenhou um papel fundamental auxiliando em todo processo.

O objetivo dessa fase inicial foi a seleção criteriosa das regiões que seriam submetidas a um estudo mais detalhado. Dessa forma, a visita teve início com uma apresentação das instalações da mina, mas com foco especial na identificação de 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 (Fig. 5) 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.

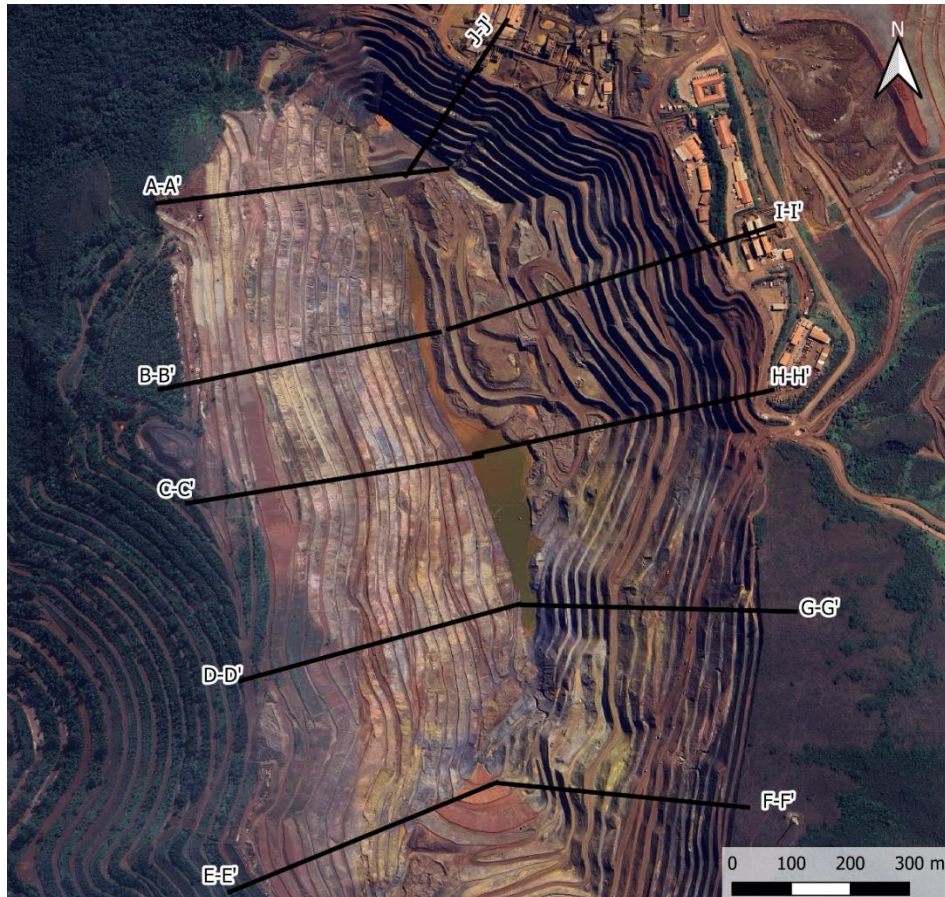


Figura 5: Região da cava com os traços das seções. Fonte: Extraído do Google Satellite em 03/11/2023, modificado pela autora.

A área selecionada para o mapeamento está situada no setor oeste da cava, caracterizada pelo predomínio do filito pertencente à Formação Batatal. O processo de mapeamento geotécnico foi iniciado mediante a utilização do aplicativo *Avenza Maps* para a coleta de dados dos pontos mapeados ao longo dos taludes.

A abordagem adotada para a verificação do índice de resistência das rochas foi idêntica àquela previamente empregada pela mineradora, utilizando a seguinte tabela proposta pela *International Society for Rock Mechanics-ISRM*:

Tabela 3: Índice de Resistência de maciços rochosos (ISRM,1981)

ÍNDICE DE RESISTENCIA	DESCRIÇÃO	RC (Mpa)	AVALIAÇÃO DE CAMPO						
			MARTELO	RISCO DE CANIVETE	QUEDA DO CANIVETE	RASPAGEM DO CANIVETE	RISCO UNHA	PRESSÃO MANUAL	
R6	Extremamente resistente	>250	lascada	não	não	não	não	não	
R5	Muito resistente	100-250	quebra com dificuldade com vários golpes	
R4	Resistente	50-100	quebra com vários golpes	risco superficial	
R3	Medianamente resistente	25-50	quebra com dificuldade com um golpe		ponto pequeno	.	com muita dificuldade	.	.
R2	R2+	Pouco resistente	10-25	quebra com um golpe		risca	.	com dificuldade	.
	R2-	Branda	5-10	fragmenta com um golpe	ponto grande		produz pó	risca superficial	.
R1	R1+	Muito branda superior	3-5	fragmenta com um golpe		risca fundo	ponto grande	com facilidade produz muito pó	risca superficial
	R1-	Muito branda inferior	1-3	desagrega	corta (separa)	penetra	descasca entalha	penetra	quebra as bordas
R0	Extremamente branda	0,25-1	.	.	penetra	penetra	.	corta	desagrega

4.2. Seções de estudo

Os pontos mapeados em campo, juntamente com aqueles registrados pelos geólogos da mineradora, estão representados na figura 6. 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 7 e 8.

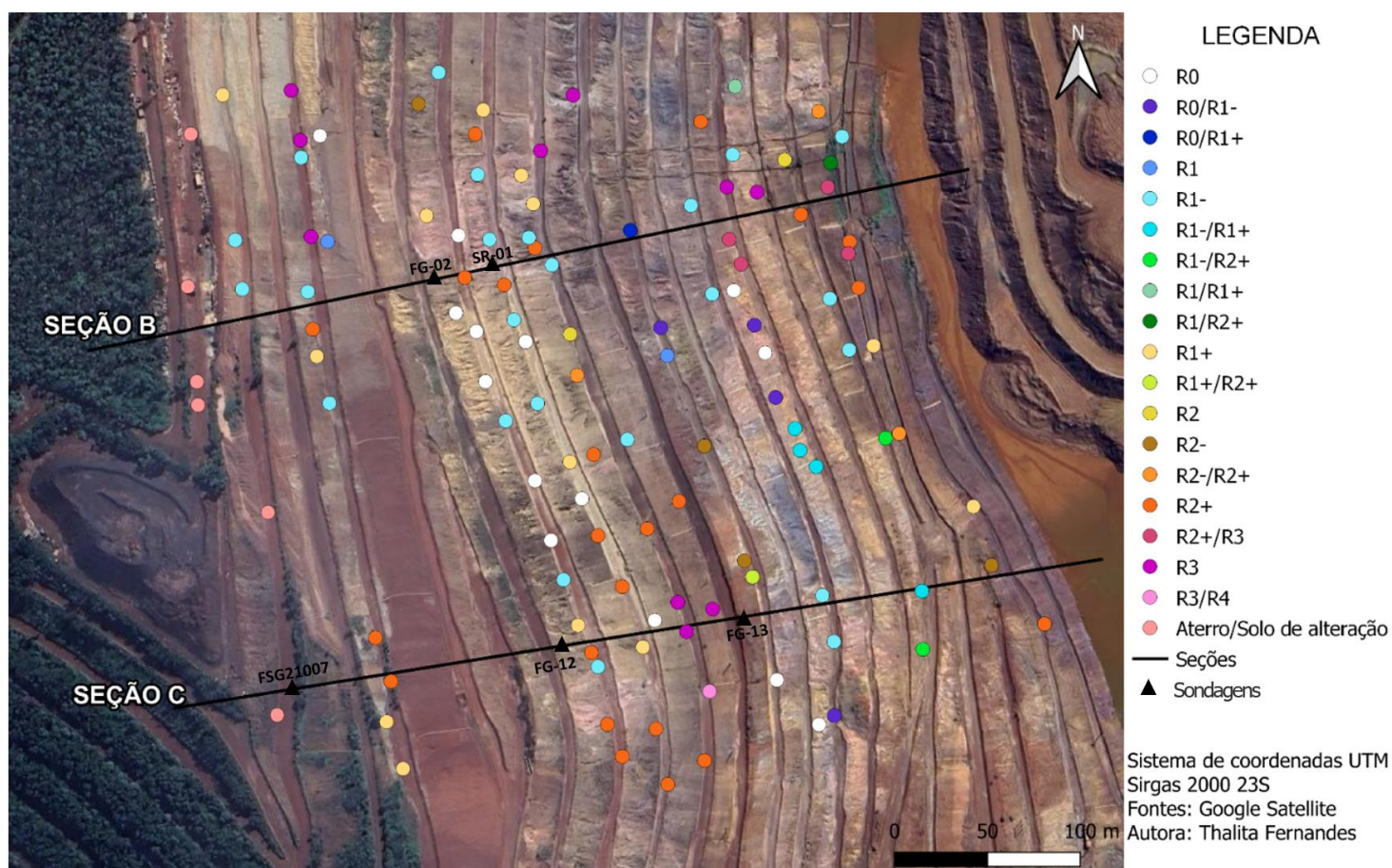


Figura 6: Pontos mapeados na cava divididos de acordo com o índice de resistência do material.

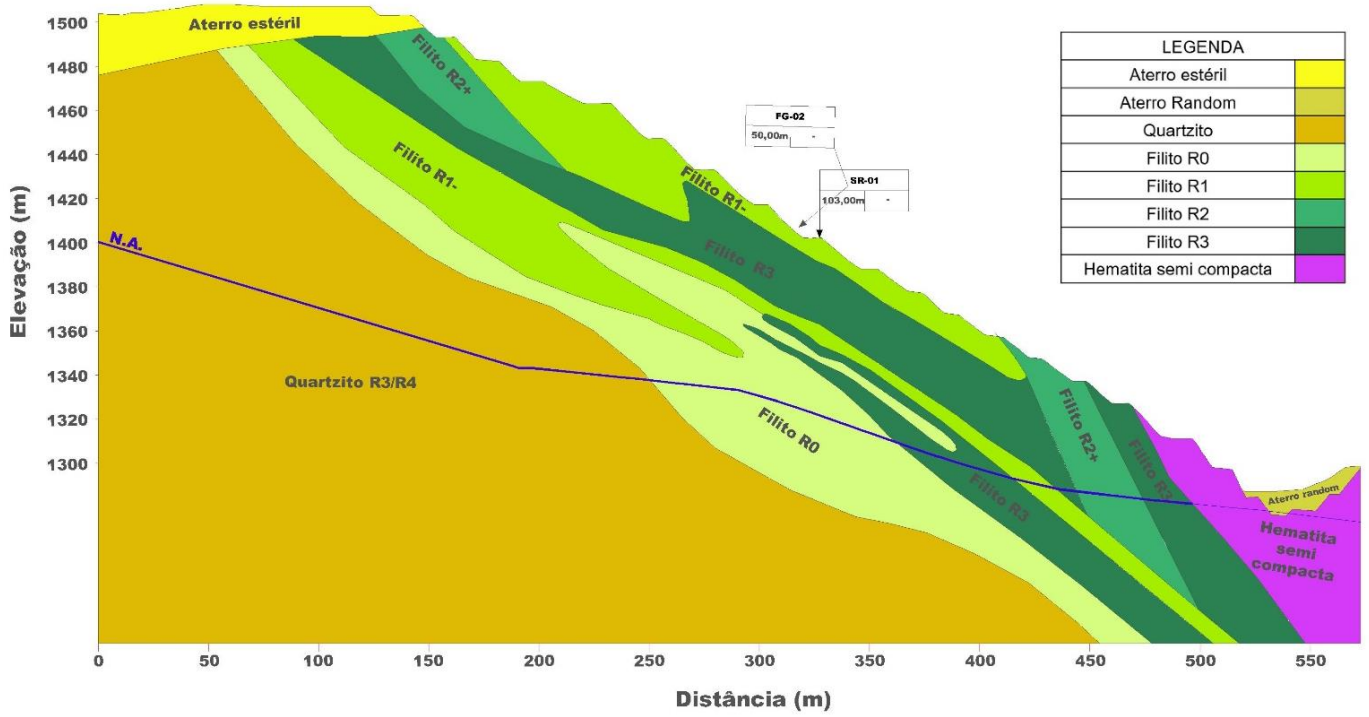


Figura 7: Seção transversal correspondente a da Seção B-B'.

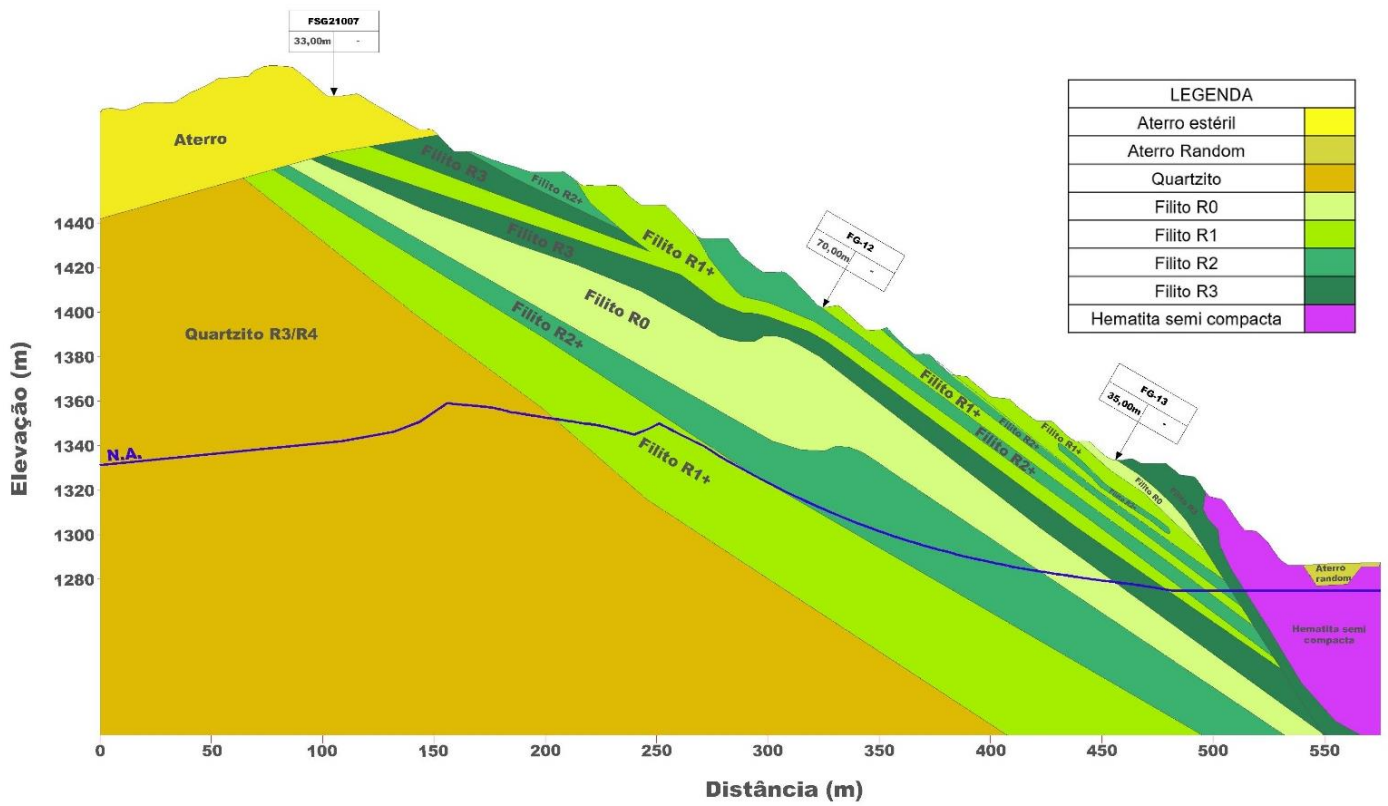


Figura 8: Seção transversal correspondente a área da Seção C-C'

Foram realizadas fotos dos diferentes materiais observados. Estas imagens (Fig.9) são dos taludes presentes ao longo das duas seções.

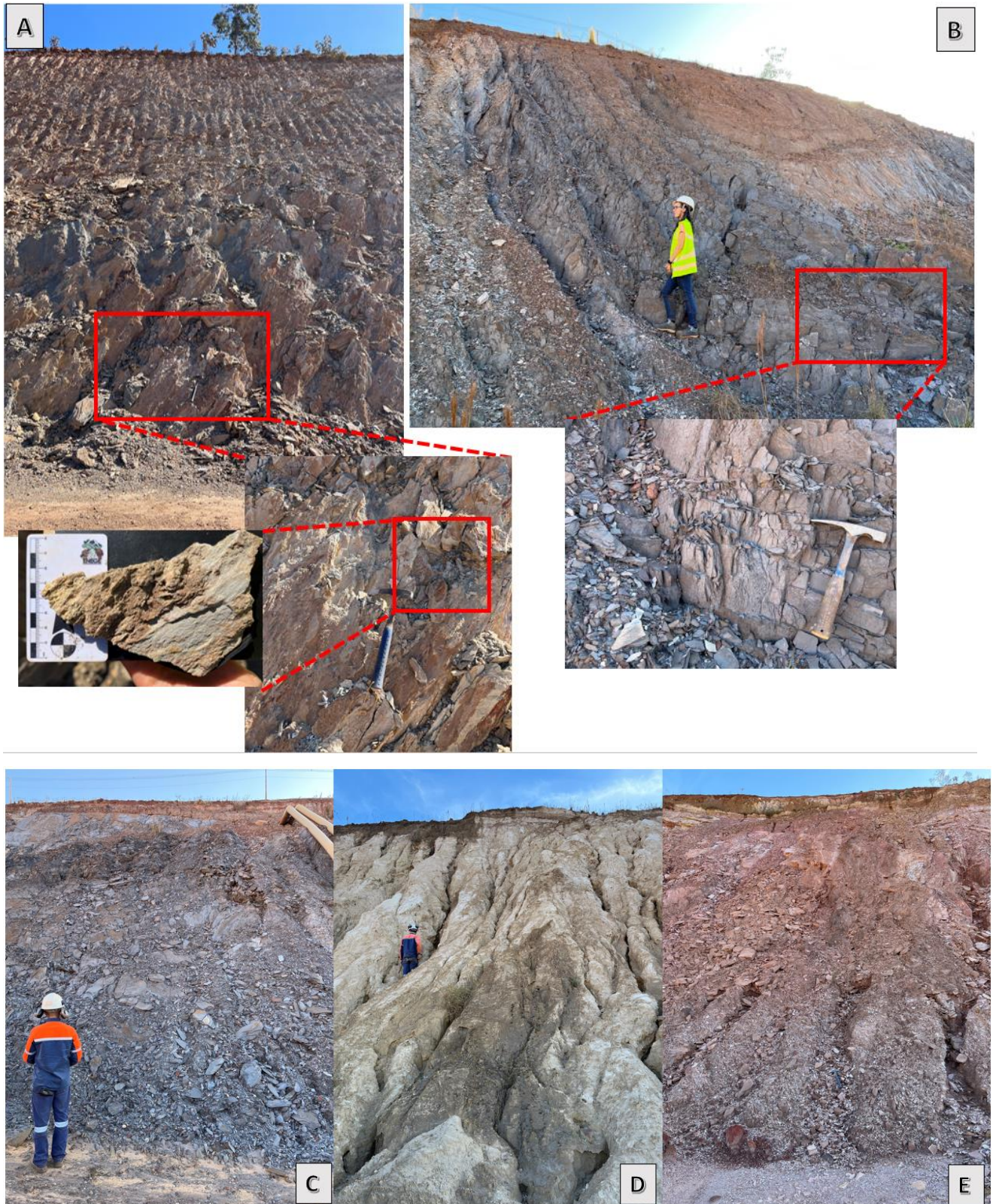


Figura 9: Imagens dos materiais observados na cava entre as seções B-B' e C-C'. Itens A, B e E possuem classificação de resistência R1 e os itens C e D foram classificados como R0.

4.3. 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. No relatório apresentado, os objetivos centrais eram:

- Identificação por meio de uma análise cinemática, dos modos de ruptura prováveis ou já ocorridos em cada setor da mina;
- Avaliação geomecânica das principais descontinuidades que influenciam a estabilidade dos taludes, considerando os parâmetros de resistência ao cisalhamento, de acordo com as condições geomecânicas analisadas;
- Análises de estabilidade foram conduzidas por meio do método de equilíbrio limite, abrangendo uma escala que vai desde bancadas e interrampas, considerando potenciais rupturas planares e em cunha. Já para potenciais rupturas circulares, foi adotada uma escala global, em função da correlação com a baixa resistência do material.

Os parâmetros obtidos estão organizados na Tabela 4, foram compilados a partir de estudos anteriores e validados pelos geólogos responsáveis da mineradora por meio de revisão bibliográfica e vistorias técnicas.

Tabela 4: Parâmetros geotécnicos.

LITOLOGIA	ÍNDICE DE RESISTÊNCIA	E (MPa)	ν'	C' (kPa)	ϕ (°)	γ (KN/m ³)
FIILITO	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

Foram conduzidas análises de estabilidade global com o objetivo de calcular o Fator de Segurança, considerando o cenário atual de 2022 e projetando para a topografia planejada em 2030 (tabela 5). A empresa responsável por conduzir as análises para a mineradora, optou pelo uso do *software Slide 2*, empregando os métodos de *Spencer*, *Bishop* e *GLE/Morgenstern-Price*.

Tabela 5: Fator de segurança

MÉTODO	VALOR MÍNIMO SEÇÃO B-B'		VALOR MÍNIMO SEÇÃO C-C'	
	2022	2030	2022	2030
<i>Bishop simplified</i>	1.46	1.64	1.39	1.62
<i>Spencer</i>	1.48	1.67	1.41	1.64
<i>GLE/Morgenstern-Price</i>	1.48	1.67	1.41	1.64

Ao longo dos anos, o talude oeste tem manifestado um histórico de evidências deformacionais, sugerindo um processo de baixa estabilidade. Sua composição majoritária de filitos alterados, um material altamente deformável e de baixa resistência, levanta dúvidas significativas sobre a adequação dos métodos clássicos de equilíbrio limite como a única abordagem para avaliar a estabilidade.

4.4 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.

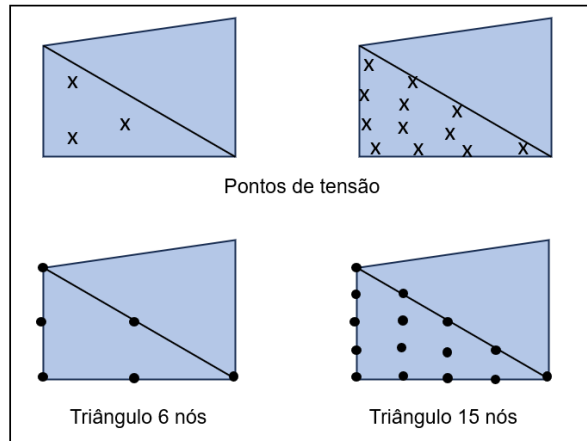


Figura 10: Tipo de elementos 2D e pontos de tensão do PLAXIS. Fonte: adaptado de Soares (2004)

4.4.1 Etapas da modelagem numérica

Ao iniciar o software, são solicitados alguns dados (*input*) (Fig.11) que são essenciais para a formulação do modelo, bem como para definir as unidades de medida a serem empregadas em cada parâmetro.

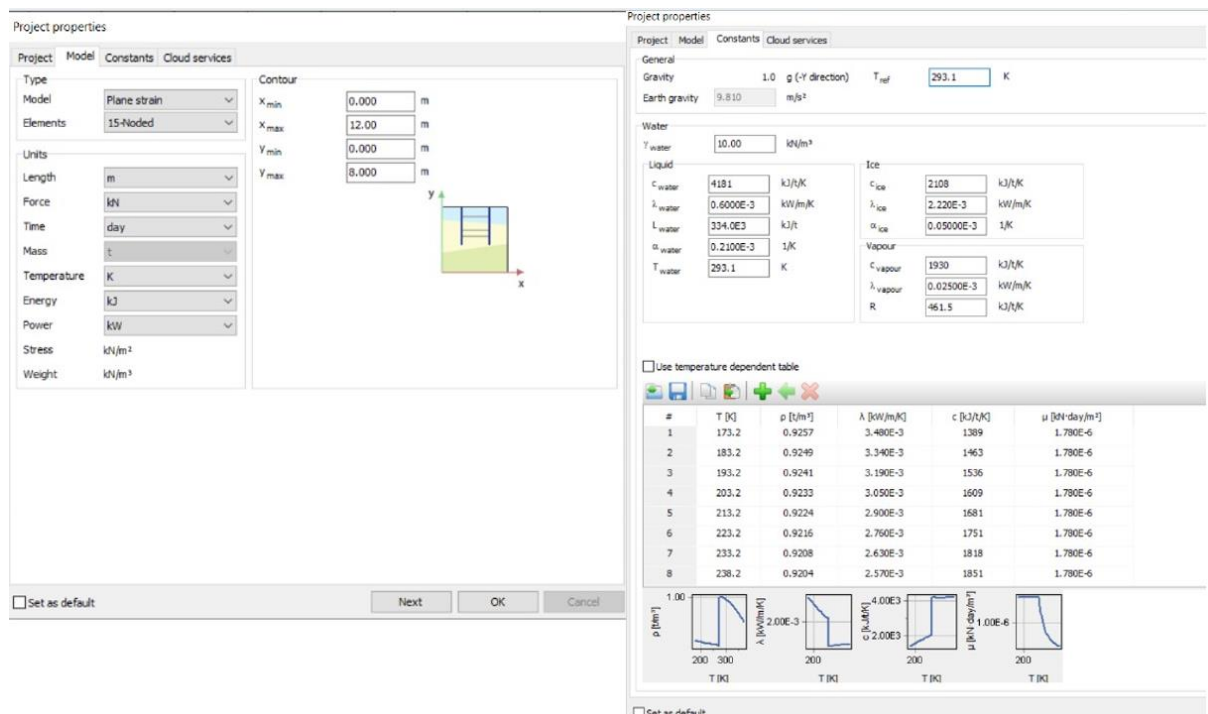


Figura 11: Dados iniciais do projeto. Fonte: Autora (2023)

Após a disponibilização dos dados necessários, dá-se início à fase de construção da geometria do modelo, que envolve a inclusão de todos os materiais com seus parâmetros específicos, alinhados às características do modelo selecionado (Fig.12). Neste projeto, optou-se pelo critério de ruptura Mohr-Coulomb, considerando que o material encontrado nas seções estudadas consiste em rochas extremamente brandas a brandas, apresentando um comportamento semelhante ao de solos.

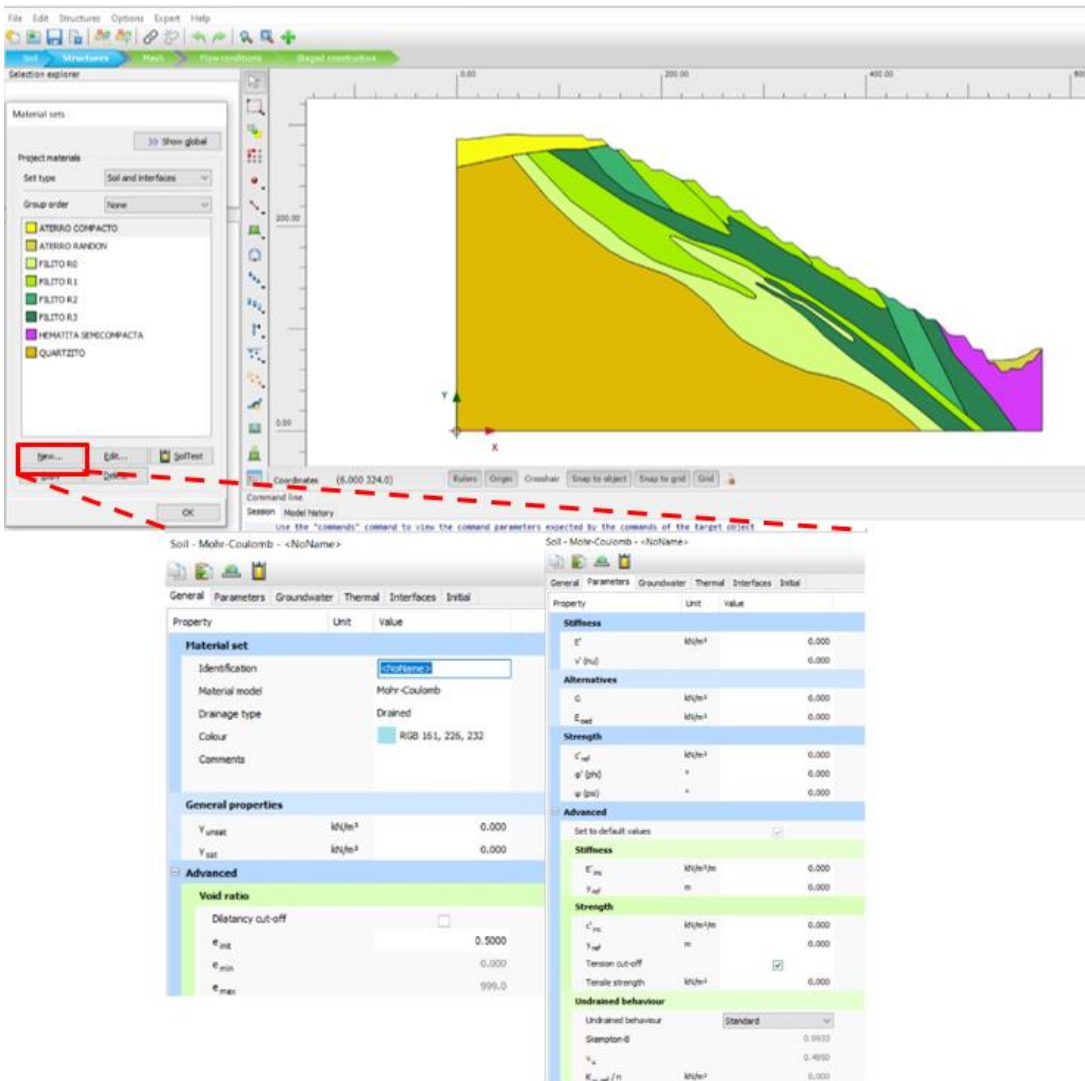


Figura 12: Desenho da geometria da seção e parâmetros dos materiais. Fonte: Autora (2023)

Antes de avançar para a etapa de cálculos, é necessário criar as malhas da estrutura que será modelada. O *software* oferece opções automáticas para a discretização do modelo, permitindo refinar essas malhas em uma escala que vai de muito fina a muito grossa. Além disso, é possível realizar essa operação de forma manual, inserindo os valores desejados conforme necessário.

Após gerar as malhas, é feita a seleção da aba destinada aos cálculos, onde é possível criar as fases que serão analisadas. São disponibilizadas três opções: *Plastic* (Plástica), *Safety* (Fator de Segurança) e *Consolidation* (Adensamento). Posteriormente, é possível realizar os cálculos e obter os resultados.

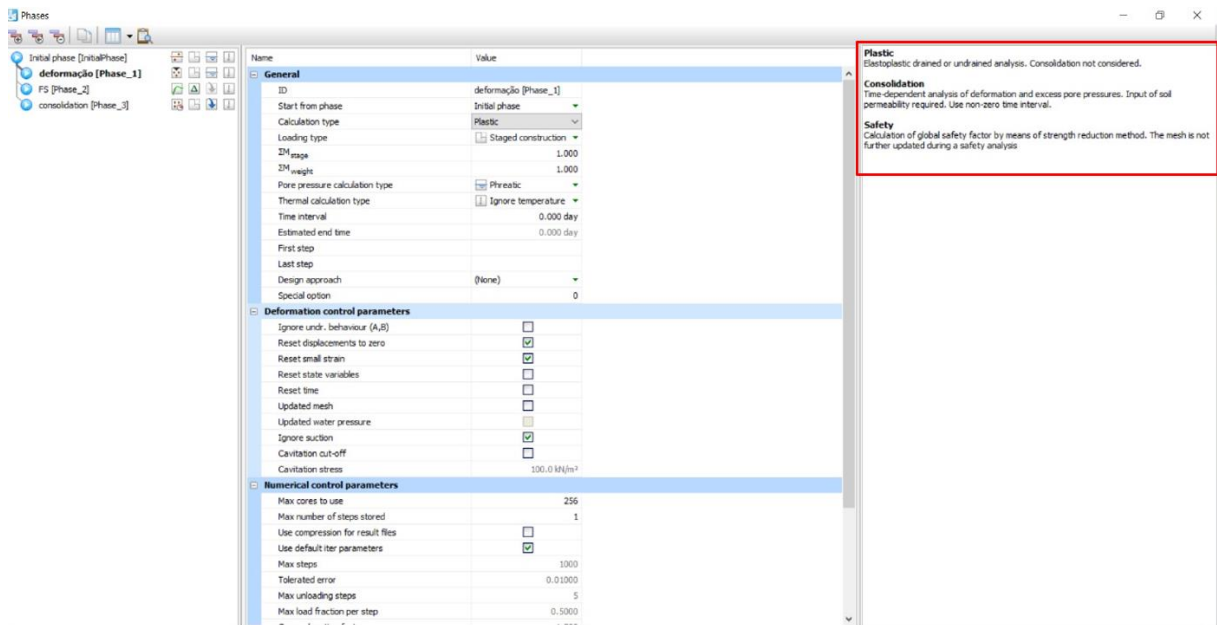


Figura 13: Fases de cálculo. Fonte: Autora (2023)

5. 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 as seções analisadas. 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 4. Os demais parâmetros dos materiais utilizados são automaticamente calculados no PLAXIS e estão apresentados a seguir:

Tabela 6: Parâmetros calculados pelo PLAXIS 2D

LITOLOGIA	GRAU DE RESISTÊNCIA	PARÂMETROS OBTIDOS NO PLAXIS 2D	
		G (Mpa)	E _{oed} (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

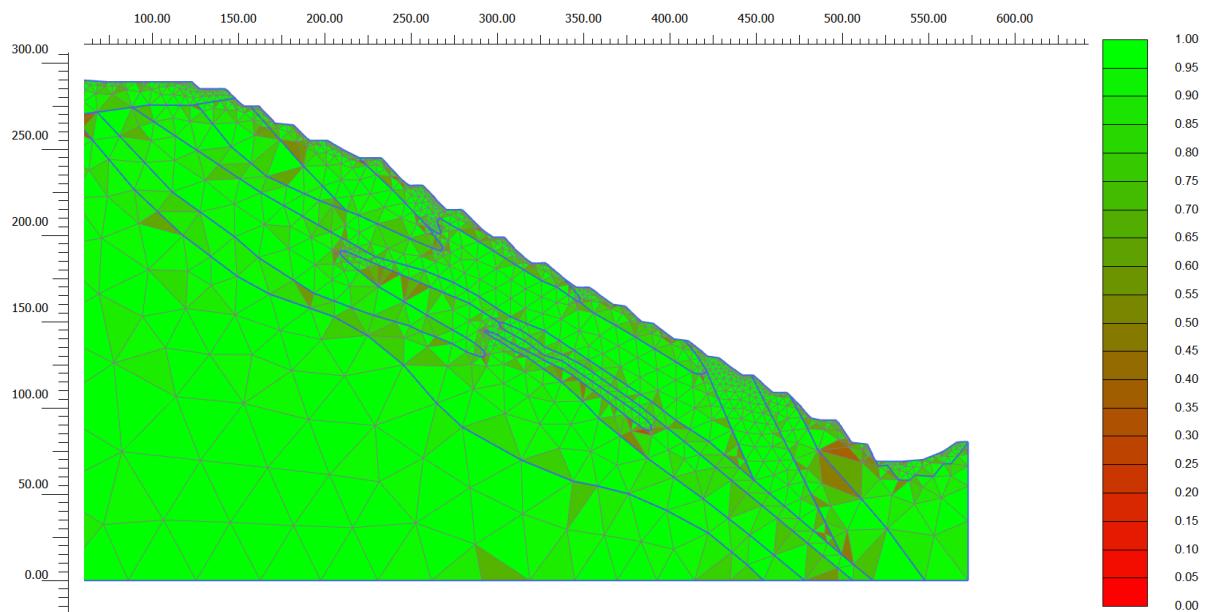


Figura 14: Refinamento da malha gerada na seção B-B'. Fonte: Autora (2023)

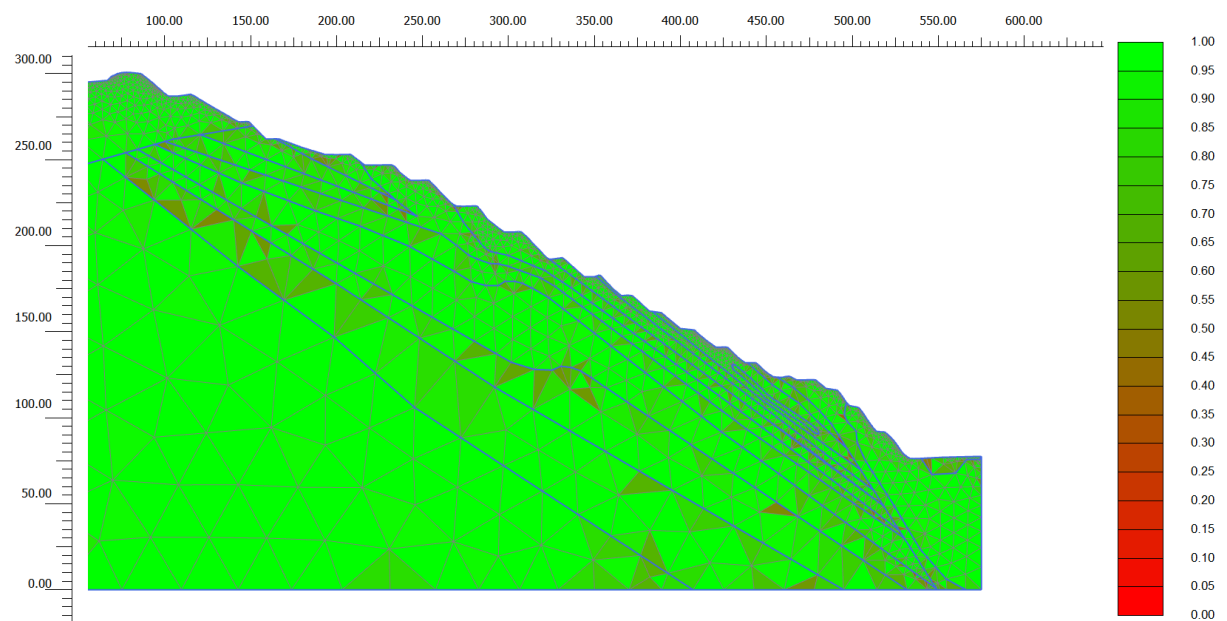


Figura 15: Refinamento da malha gerada na seção C-C'. Fonte: Autora (2023)

Após verificar a qualidade da malha conforme ilustrado nas figuras 14 e 15, foi escolhida a fase Plástica para conduzir os cálculos. A seguir, estão apresentados os resultados para os deslocamentos totais, nos eixos verticais e horizontais nas seções B-B' e C-C' obtidos:

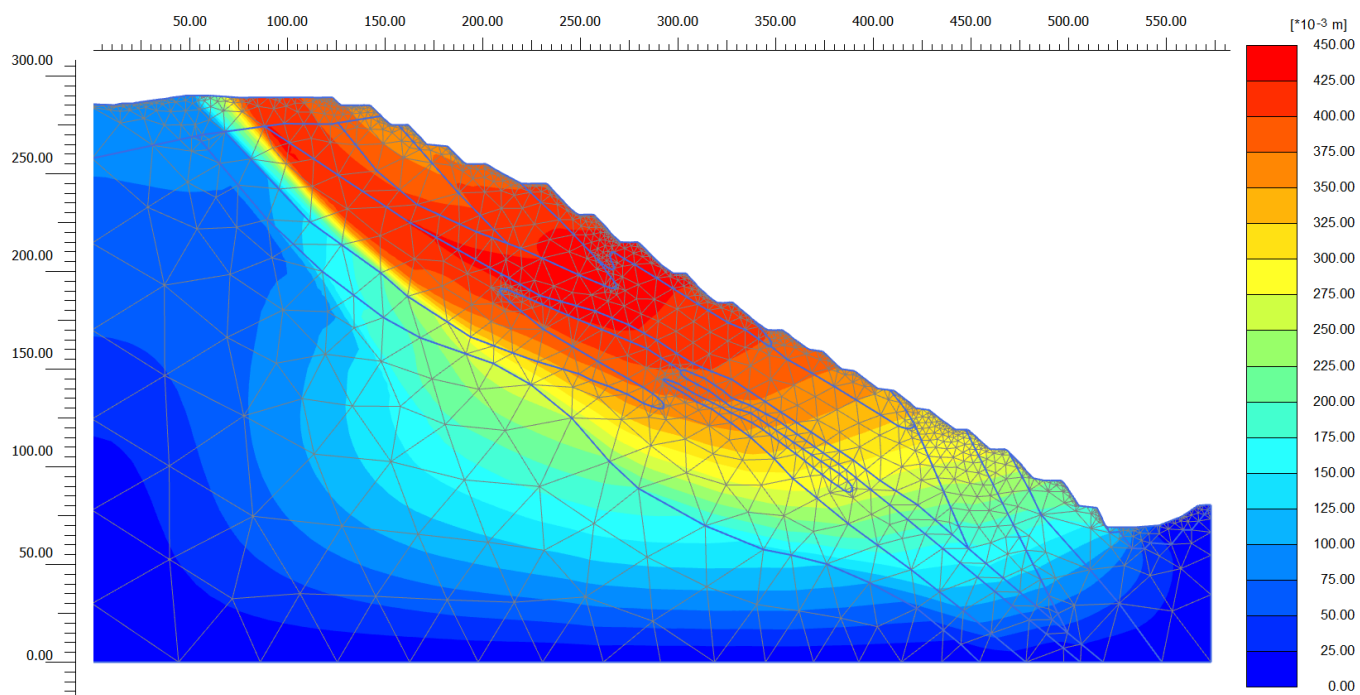


Figura 16: Deslocamentos total da seção B-B'. Fonte: Autora (2023)

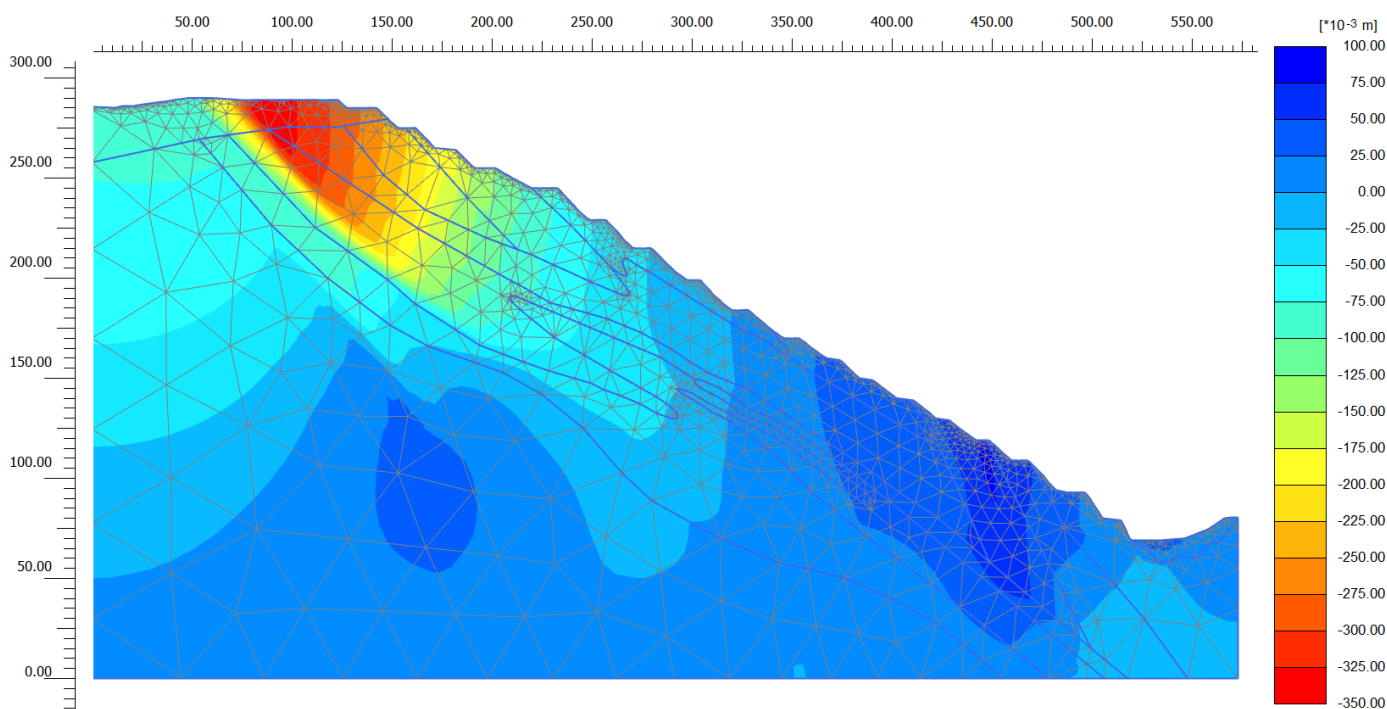


Figura 17: Deslocamentos no eixo vertical da seção B-B'. Fonte: Autora (2023)

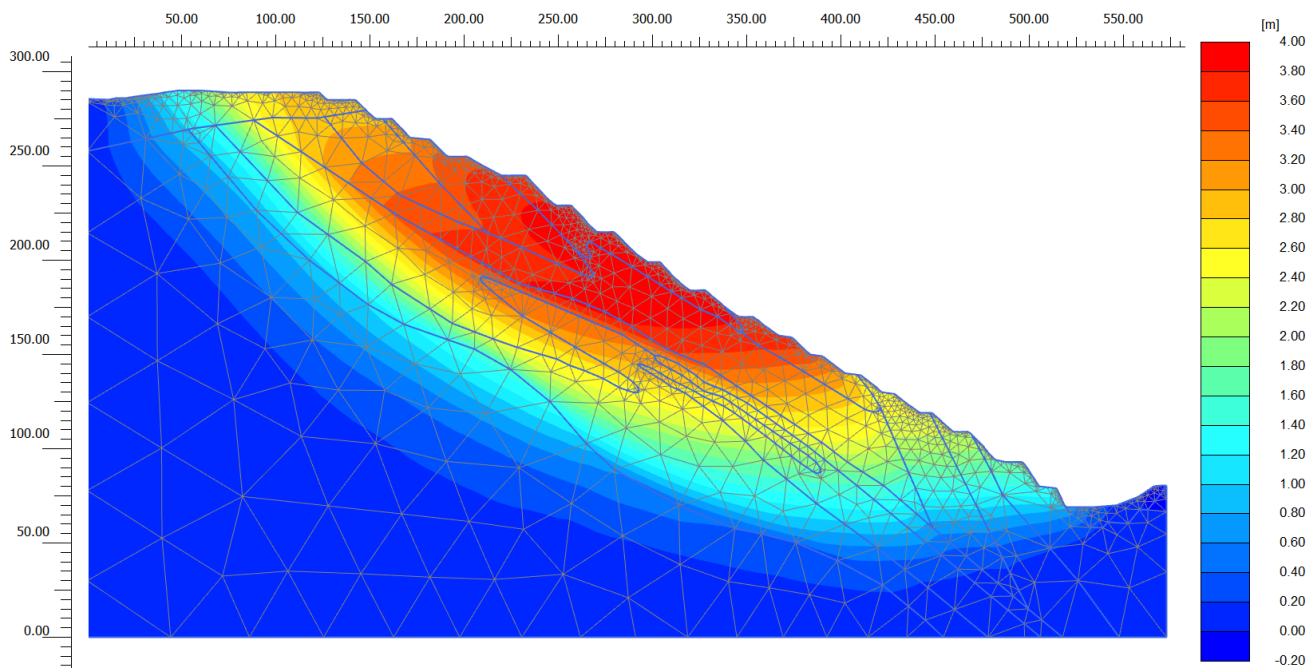


Figura 18: Deslocamentos no eixo horizontal da seção B-B'. Fonte: Autora (2023)

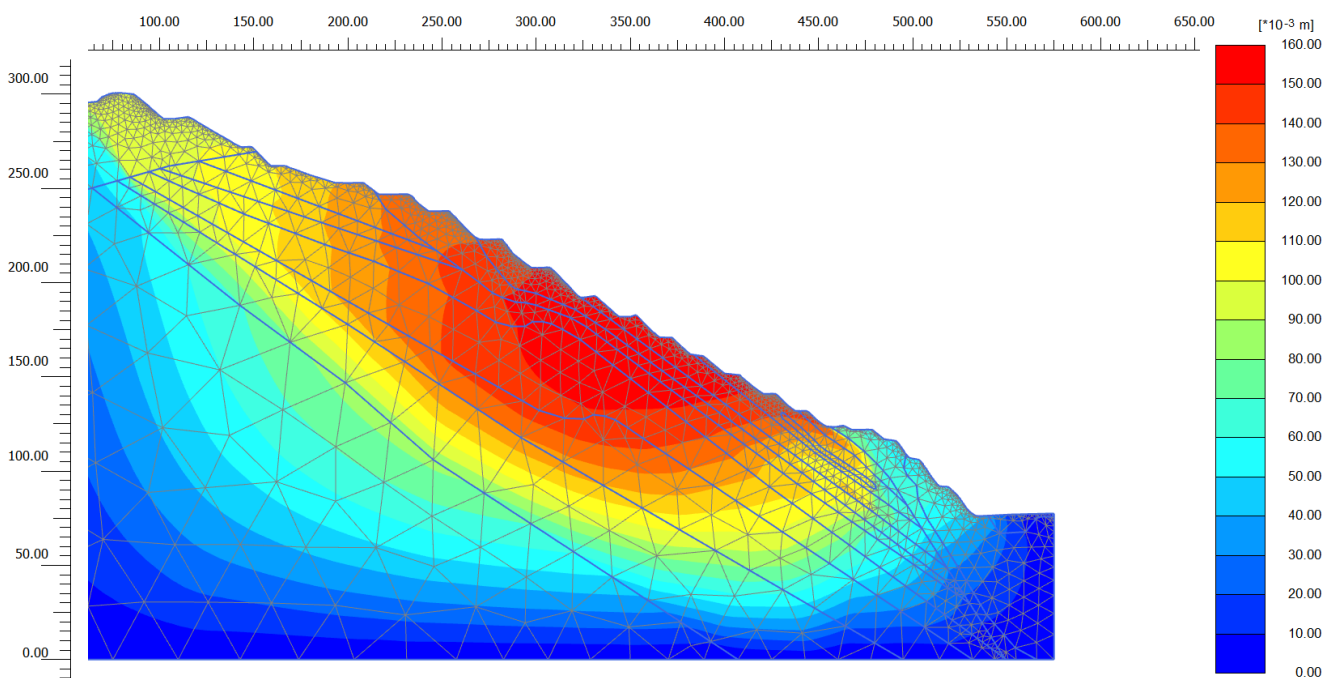


Figura 19: Deslocamentos total da seção C-C'. Fonte: Autora (2023)

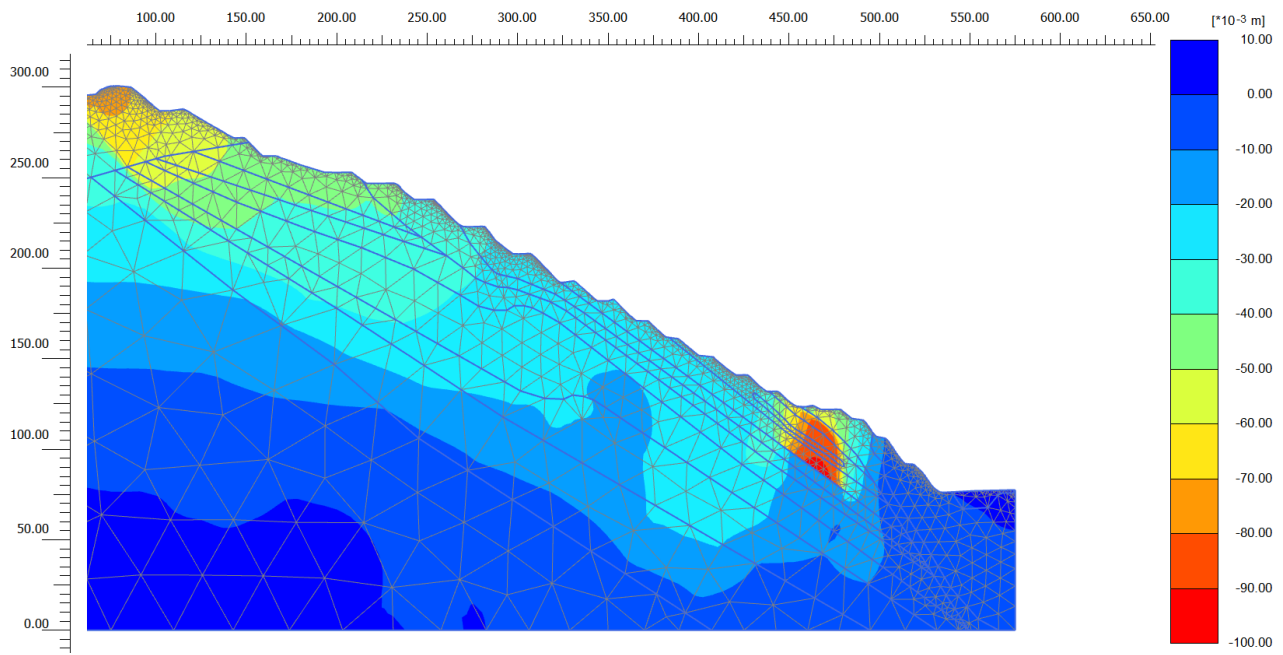


Figura 20: Deslocamentos no eixo vertical da seção C-C'. Fonte: Autora (2023)

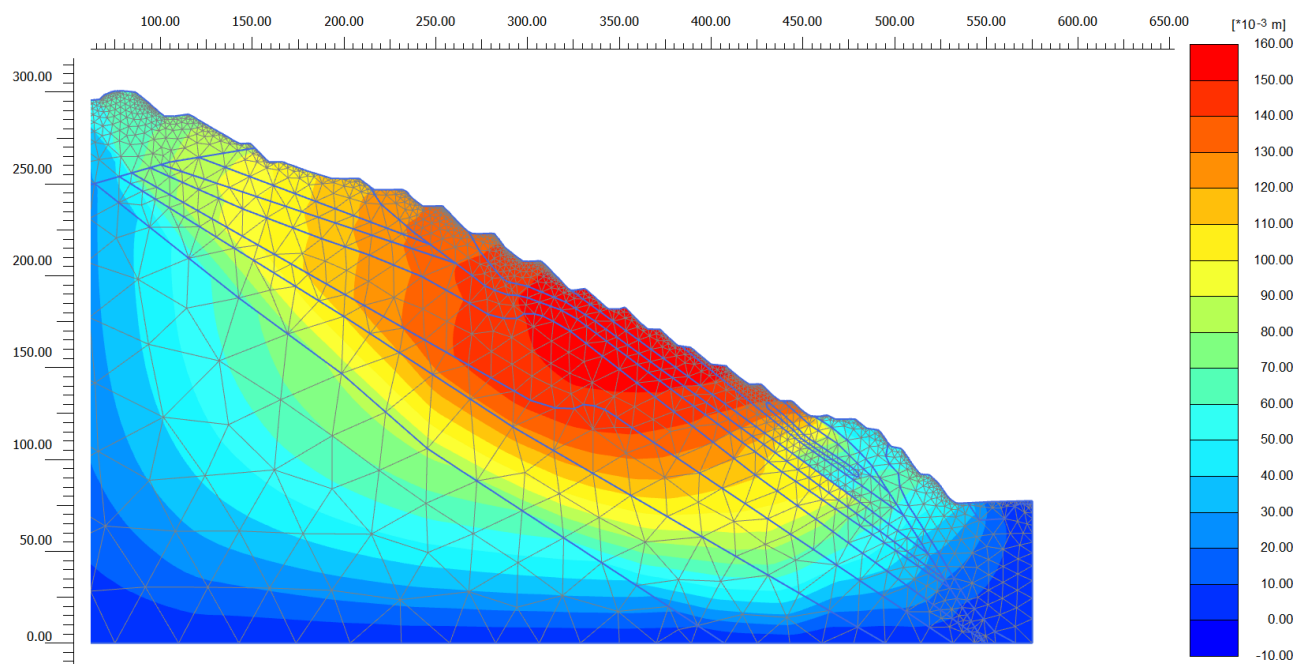


Figura 21: Deslocamentos no eixo horizontal da seção C-C'. Fonte: Autora (2023)

5.1 Interpretação dos resultados

Conforme evidenciado nas imagens fornecidas, os modelos adotam uma escala de cores para representar diferentes características. Nas figuras 14 e 15, 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 16 a 21, são apresentadas tonalidades mais quentes (vermelho, laranja e amarelo), representando maiores deformações nos taludes, e tonalidades mais frias (verde, ciano e azul), 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 particularmente próximos ao topo. Esses taludes são predominantemente compostos pelas camadas de aterro estéril e filito, cujo índice de resistência foi classificado como R1. Os valores mais expressivos estão destacados na região onde a cor vermelha prevalece, indicando deslocamentos de $350,00 \times 10^{-3} \text{m}$ no eixo vertical (Fig.17).

Ao comparar esses resultados com o relatório de 2022 fornecido pela mineradora, no qual foi realizado um estudo pelo método de equilíbrio limite, resultando em um círculo de ruptura (Fig. 22), observamos uma correlação com a Figura 18, 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.

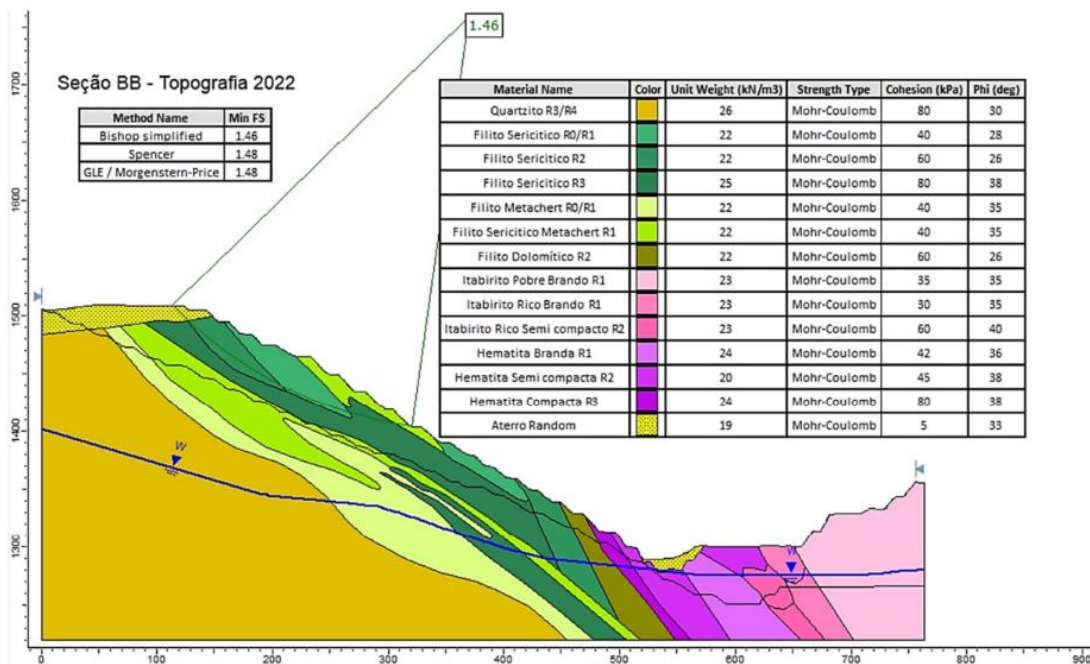


Figura 22: Análise de ruptura circular da seção B-B'. Fonte: Relatório (2022)

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 com índice de resistência R0, indicando deslocamentos de $100,00 \times 10^{-3}m$ no eixo vertical (Fig.20), 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. 23) e aqueles representados pela Figura 21, 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.

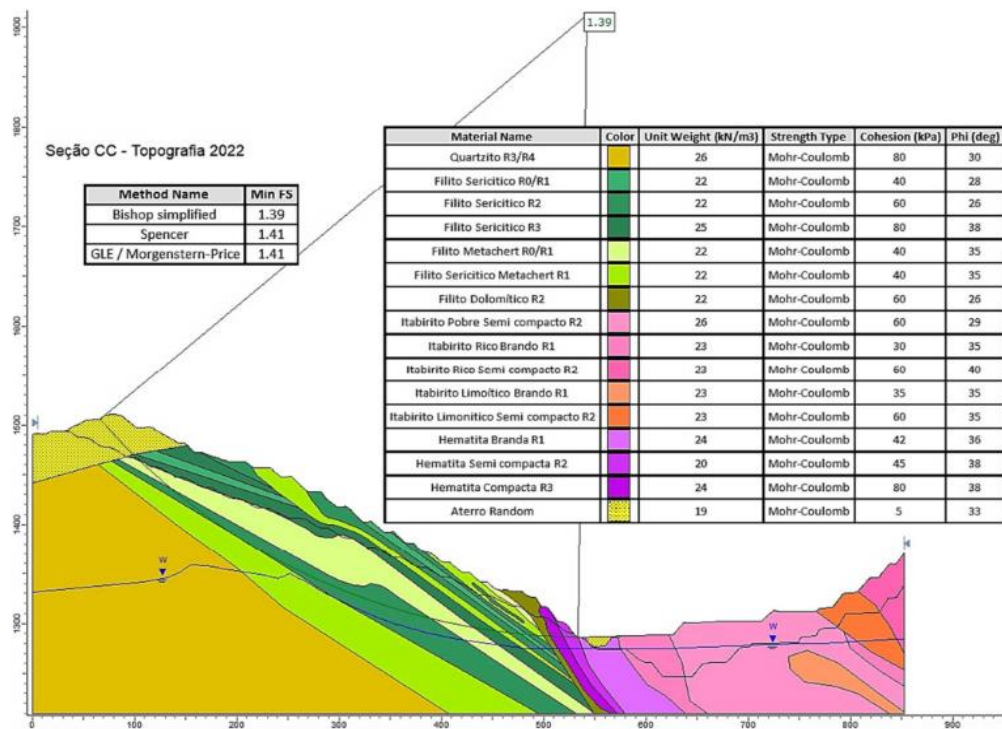


Figura 23: Análise de ruptura circular da seção C-C'. Fonte: Relatório (2022)

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, enquanto a análise tensão-deformação está diretamente relacionada à distribuição das rochas com diferentes resistências. 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 22 e 23, pode proporcionar um nível de segurança semelhante ao obtido nas análises pelo modelo de tensão-deformação.

6. 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 *insitu*. Após coletar informações no mapeamento geotécnico, adquirimos uma compreensão mais detalhada dos comportamentos mecânicos e estruturais.

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.

7. 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
- BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for design of tunnel support*. Rock Mechanics,6: 189-236.
- BIENIAWSKI Z. T. (1973). *Rock mass classification in rock engineering in exploration for rock engineering, proc. Of the symp*. Balkema,1, 97-106.
- BIENIAWSKI, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications. A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 251 p.
- DARDENNE, M. A., SCHOBENHAUS, 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.
- DEERE, D. U. AND MILLER, R. P. (1966) *Engineering Classification and Index Properties of Intact Rock*. Technical Report No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Laboratory, Kirkland Air Force Base, New Mexico.
- DEERE, D. U., & DEERE, D. W. (1989). Rock quality designation after twenty years. *US Army Corps of Engineers, Technical Report GL-89-1*.
- 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.
- GRIFFITH, A.A.(1924) *Theory of rupture*. In: *Proceedings of the 1st international congress on applied mechanics*. Delft, The Netherlands; 1924. p. 55e63.
- HOEK, E, BROWN, ET. (1980a) *Underground excavations in rock*. London: *Institution of Mining and Metallurgy*.
- HOEK, BROWN, ET. (1980 b). *Empirical strength criterion for rock masses*. Journal of the Geotechnical Engineering Division;106(GT9):1013e35.
- HOEK, E. (1994). *Strength of rock and rock masses*. ISRM. News Journal 2(2), 4–16.
- HOEK, E.; LONDE, P. (1974). *The Design of Rock Slopes and Foundations*. Proc. 3rd International Congress of Rock Mesch, ISRM, Denver.

- HUANG, Y. H. (2014) *Slope Stability Analysis by the Limit Equilibrium Method: Fundamentals and Methods*. 1th. ed. Reston, USA: ASCE, 365 p.
- HUDSON, J.A. & HARRISON, J.P. (2009). *Engineering rock mechanics – an introduction to the principles*. Elsevier Science.
- 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.
- MARINOS P., HOEK E. (2000). GSI: *A geologically friendly tool for rockmass strength estimation*. In: *Proc. GeoEng2000 at the Int. Conf. on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Technomic publishers, Lancaster, Pennsylvania*, pp 1422–1446
- MARTIN, D.; LORING, L.; STACEY, P. (2018). *Slope Design Considerations*. In: MARTIN, D. & STACEY, P. (ed.). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO PUBLISHING.
- MARTIN, D. & STACEY, P. (ed.) (2018). *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO PUBLISHING.
- MESQUITA, JOÃO BATISTA DE. (2008). Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica / João Batista de Mesquita. - Rio Claro: [s.n.], 269 f.
- MILANEZ, B. (2017). Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. Boletim regional, urbano e ambiental, p. 93-101, jan-jun. 2017.
- PIO FIORI, A. & CARMIGNANI, L. (2009). Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 602 p. Editora UFPR, Oficina de texto.
- 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.
- WYLLIE, D. C. (1999) *Foundations on Rock*, 2nd edn, Taylor and Francis, London, UK, 401 pp.

ANEXOS

Anexo I- Tabelas utilizadas no índice Q (Rock Mass Quality)

Anexo II- Palitos das sondagens apresentadas nas seções B-B' e C-C'

Anexo III- Medidas estruturais obtidas no mapeamento e estereogramas obtidos.

ANEXO I

Tabela I- Classificação do parâmetro RQD para o índice Q (modificado – Barton *et al.*,1974).

ÍNDICE RQD		RQD
A	Muito Ruim	0-25
B	Ruim	25-50
C	Razoável	50-75
D	Bom	75-90
E	Ótimo	90-100

Observações: 1. Se RQD é medido ≤ 10 (incluindo 0), assumir o valor nominal de 10 para calcular Q./
2. Intervalos de 5 em 5 no valor de RQD são considerados de boa acurácia (p.ex. 95, 100).

Tabela II- Classificação do parâmetro Jn para o índice Q (modificado – Barton *et al.*, 1974).

DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO		VALOR
Número de famílias de descontinuidades		Jn
A	Descontinuidades esparsas ou ausentes	0,5-1
B	Uma família de descontinuidades	2
C	Uma família mais descontinuidades esparsas	3
D	Duas famílias de descontinuidades	4
E	Duas famílias mais descontinuidades esparsas	6
F	Três famílias de descontinuidades	9
G	Três famílias mais descontinuidades esparsas	12
H	Quatro ou mais famílias de descontinuidades	15
I	Rocha extremamente fraturada (triturada)	20

Observações: 1. Para interseções usar $3x Jn$. /2. Para emboques usar $2x Jn$

Tabela III- Classificação do parâmetro Jr para o índice Q (modificado – Barton *et al.*, 1974).

DESCRIÇÃO DO PARÂMETRO		VALOR
Condição de rugosidade das paredes		Jr
a) Paredes das descontinuidades em contato		
b) Paredes das descontinuidades em contato com deslocamentos diferenciais < 10 cm		
A	Descontinuidades não persistentes	4
B	Descontinuidades rugosas ou irregulares, onduladas	3
C	Descontinuidades lisas e onduladas	2
D	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5
E	Descontinuidades rugosas ou irregulares e planas	1,5
F	Descontinuidades lisas e planas	1
G	Descontinuidades polidas ou estriadas e planas	0,5
c) Sem contato entre as paredes das descontinuidades quando cisalhadas		
H	Descontinuidades preenchidas com material argiloso	1
I	Descontinuidades preenchidas com material granular	1
<p>Observações: 1. As descrições dos itens a) e b) referem-se a escalas de amostragens pequenas e médias dimensão, respectivamente. / 2. Acrescentar 1,0 se o espaçamento entre descontinuidades for > 3 m./ 3. Jr = 0,5 no caso de descontinuidades planas e estriadas e com orientação na direção da tensão mínima</p>		

Tabela IV- Classificação do parâmetro Ja para o índice Q (modificado - Barton *et al.*, 1974).

CONDIÇÕES DE ALTERAÇÃO DAS PAREDES		Ja	ϕ_r (°)
a. Descontinuidades com contato rocha/rocha e sem deslocamento relativo entre as paredes			
A	Paredes duras, compactas, com preenchimento de materiais impermeáveis	0,75	-
B	Descontinuidades sem alteração, pigmentação superficial incipiente	1	25-35
C	Paredes levemente alteradas; películas de materiais arenosos ou minerais abrasivos	2	25-30
D	Paredes com películas de material siltoso com pequena fração argilosa	3	20-25
E	Paredes com películas de material mole (micas, clorita, talco, gesso, grafite etc.), eventualmente com minerais expansivos	4	8-16
b. Descontinuidades com contato rocha/rocha e com deslocamento relativo incipiente entre as paredes (deslocamento diferencial inferior a 10 cm)			
F	Paredes com partículas arenosas, fragmentos de rocha etc.	4	25-30
G	Paredes com preenchimento contínuo e poucos espessos (< 5 mm) de material argiloso fortemente sobreadensado	6	16-24
H	H. Paredes com preenchimento contínuo e pouco espesso (< 5 mm) de material argiloso pouco ou medianamente sobreadensado.	8	12-16
I	J. Paredes com preenchimento de materiais argilosos expansivos; valores variáveis com a porcentagem dos argilo-minerais expansivos presentes e com a ação conjugada da água intersticial.	8-12	6-12
c. Descontinuidades sem contato rocha/rocha e com deslocamento relativo entre as paredes			
J	K. Zonas de preenchimento com fragmentos de rocha	6	
K	L. Rocha e material argiloso (ver G, H e J para caracterizar as condições das argilas)	8	
L	M.	8-12	6-24
M	N. Zonas de preenchimento com material arenoso ou siltoso-argiloso, sendo pequena a fração argilosa	5	
N	O. Zonas contínuas de preenchimento com material argiloso	10-13	
	P e R (ver G, H e J para a condição das argilas)	6-24	
Observações: 1. ϕ_r ângulo de atrito residual (indicativo das propriedades mineralógicas dos produtos de alteração)			

Tabela V- Classificação do parâmetro J_w para o índice Q (modificado - Barton *et al.*, 1974).

CONDIÇÕES DE AFLUÊNCIA DE ÁGUA		J_w	u (MPa)
A	Escavação a seco ou com pequena afluência de água (<5 l/min)	1	<0,1
B	Afluência média da água com eventual carregamento do preenchimento	0,67	0,1-0,25
C	Afluência elevada de água em rochas competentes de descontinuidades não preenchidas	0,5	0,25-1
D	Afluência elevada de água com carregamento significativo do preenchimento	0,33	0,25-1
E	Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), com decaimento com o tempo	0,1-0,2	>1
F	Afluência excepcionalmente elevada de água (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	0,05-0,1	>1
Observações: 1. Valores aproximados das poro pressões da água / 2. Reduzir os valores de J_w no caso de instalação de dispositivos de drenagem (C a F) / 3. Não são considerados os problemas especiais causados por formação de gelo			

Tabela VI- Classificação do parâmetro SRF para o índice Q (modificado - Barton et al., 1974).

CONDIÇÃO DAS TENSÕES NO MACIÇO				SRF
a. Zonas de baixa resistência interceptando a escavação				
A	Ocorrências múltiplas contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (qualquer profundidade)			10
B	Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação < 50 m)			5
C	Ocorrência específica contendo material argiloso ou rocha quimicamente decomposta (profundidade da escavação > 50 m)			2,5
D	Ocorrência múltiplas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de argila e com blocos desagregados de rocha (qualquer profundidade)			7,5
E	Ocorrência específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (profundidade de escavação < 50 m)			5
F	Ocorrências específicas de zonas de material cisalhado em rochas competentes, isentas de material argiloso (profundidade da escavação > 50 m)			2,5
G	Ocorrência de juntas abertas e intenso fraturamento do maciço (qualquer profundidade)			5
b. Rochas competentes (comportamento rígido)				
		(σ_c/σ_1)	(σ_t/σ_1)	
H	Tensões baixas, subsuperficiais	>200	>13	>2,5
I	Tensões Moderadas	10-200	0,66-13	1,0
J	Tensões elevadas (eventuais problemas de estabilidade das paredes)	5-10	0,33-0,66	0,5-2
K	Condições moderadas de fraturamento (rockburst)	2,5-5	0,16-0,33	5-10
L	Condições intensas de rocha explosiva (rockburst)	<2,5	<0,16	10-20
c. Rochas incompetentes (comportamento plástico às deformações)				
M	Tensões moderadas			5-10
N	Tensões elevadas			10-20
d. Rochas expansivas (atividade expansiva química dependente da presença da água)				
O	Tensões moderadas			5-10
P	Tensões elevadas			10-20
<p>Observações: 1. No caso de ocorrência de zonas de baixa resistência relevantes, mas não interceptando a escavação, recomenda-se a redução dos valores de SRF de 25 a 50%. / 2. No caso de tensões subsuperficiais (ver H), adotar SRF = 5 quando a profundidade da abóbada da escavação abaixo da superfície do terreno for menor que a sua dimensão característica (largura do vão) / 3. Para os itens H a M, σ_1, σ_3 são tensões principais; σ_c é a resistência à compressão simples e σ_t a resistência a tração. / 4. Para maciço muito anisotrópico, introduzir correções nos itens H a M de acordo com os seguintes critérios: (a) $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$: reduzir σ_c para $0,8\sigma_c$ e σ_t para $0,8\sigma_t$ (b) $\sigma_1/\sigma_3 > 10$: reduzir σ_c para $0,6\sigma_c$ e σ_t para $0,6\sigma_t$</p>				

Tabela VII- Classes de maciços rochosos em função de Q (modificado - Barton *et al.*, 1974).

PADRÃO GEOMECÂNICO DO MACIÇO	VALORES DE Q
Péssimo	< 0,01
Extremamente ruim	0,01 - 0,1
Muito ruim	0,1 - 1,0
Ruim	1,0 - 4,0
Regular	4,0 - 10,0
Bom	10,0 - 40,0
Muito bom	40,0 - 100,0
Ótimo	100,0 - 400,0
Excelente	> 400,0

ANEXO II

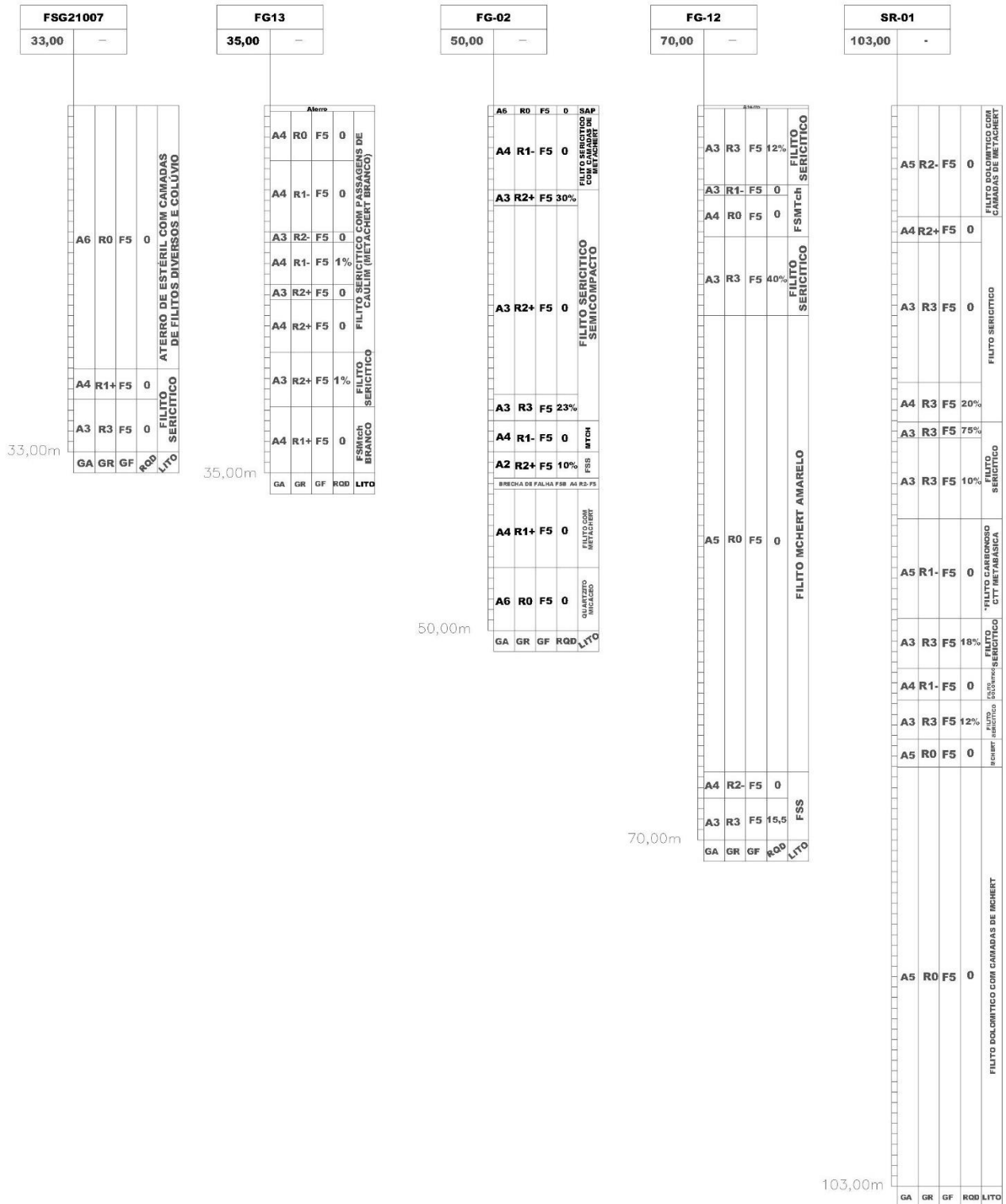


Figura I- Palitos das sondagens presentes nas seções B-B' e C-C'.

ANEXO III

Tabela I- Dados das estruturas observadas em campo nas seções B-B' e C-C'.

FRATURA		FOLIAÇÃO
215/60	326/34	035/60
044/60	185/88	104/52
290/22	112/44	040/60
193/62	150/80	110/45
123/80	260/83	107/48
302/20	174/78	135/40
115/80	140/52	040/62
304/30	260/60	035/50
134/71	265/62	038/62
116/48	144/50	070/58
240/32	200/50	065/58
240/61	265/30	065/60
242/62	328/47	076/74
310/80	310/45	090/64
004/74	165/70	095/38
156/88	165/72	080/68
180/86	126/80	055/84
202/38	240/80	
160/44	192/51	

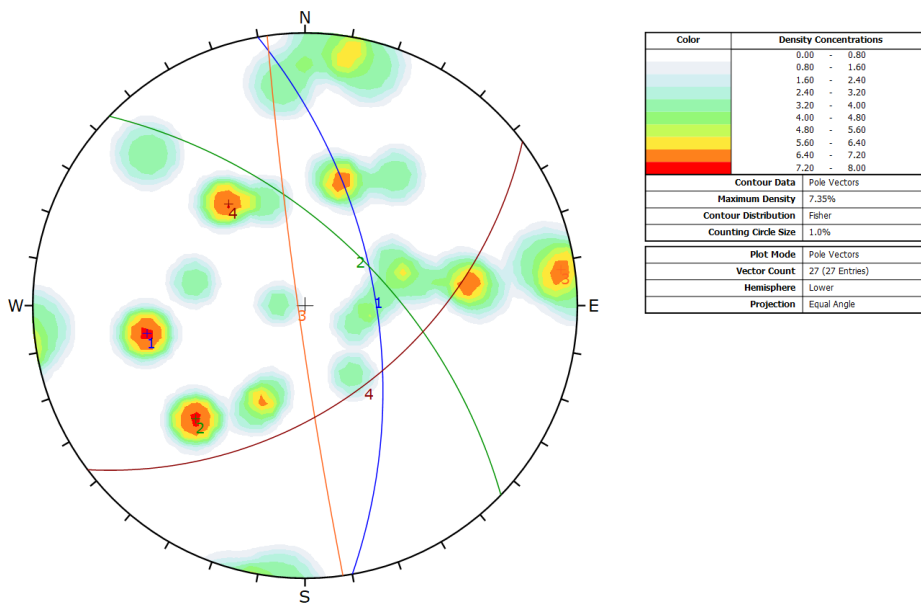


Figura I- Estereograma da seção B-B' obtido com o *software* DIPS.

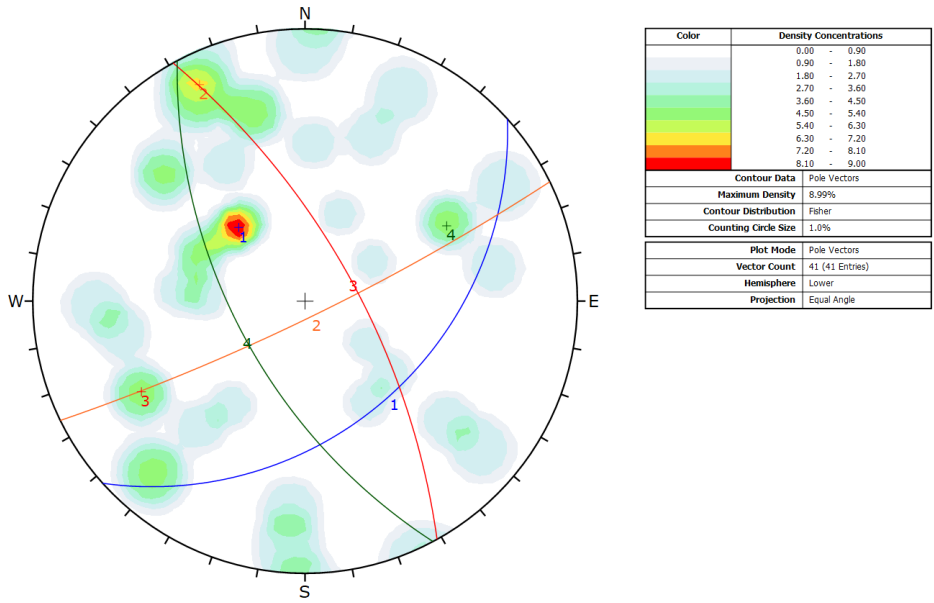


Figura II- Estereograma da seção C-C' obtido com o *software* DIPS.

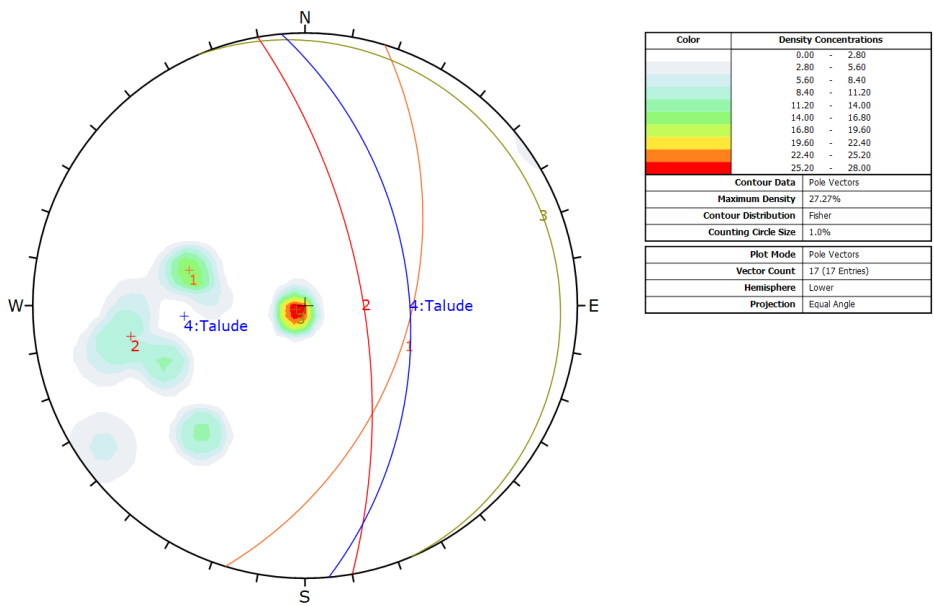


Figura III- Estereograma das medidas de foliações obtido com o *software* DIPS.