

Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG
Engenharia De Minas
Campus Poços de Caldas (MG)

THAÍS GUIMARÃES DOS SANTOS

ESTABILIDADE DE TALUDES DE ESCAVAÇÃO EM MINA DE GRAFITA

Poços de Caldas / MG

2014

THAÍS GUIMARÃES DOS SANTOS

ESTABILIDADE DE TALUDES DE ESCAVAÇÃO EM MINA DE GRAFITA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Unidade Curricular TCC II
(ICT - 318) do Instituto de Ciência e
Tecnologia da Universidade Federal de
Alfenas, campus de Poços de Caldas.
Área de concentração: Geotecnia
Orientador: Ériclis Pimenta Freire

Poços de Caldas / MG

2014

S237e Santos, Thaís Guimarães dos.

Estabilidade de taludes de escavação em mina de grafita. / Thaís Guimarães dos Santos; .

Orientação de Ériclis Pimenta Freire. Poços de Caldas: 2014.

39 fls.: il.; 30 cm.

Inclui bibliografias: fls. 32-34

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) –
Universidade Federal de Alfenas– Campus de Poços de Caldas, MG.

1. Estabilidade. 2. Taludes de escavação. 3. Mineração. I. Freire, Ériclis Pimenta (orient.). II. Universidade Federal de Alfenas - Unifal. III. Título.

CDD 624.15136

Thaís Guimarães dos Santos

Estabilidade de taludes de escavação em mina de grafita

A banca examinadora abaixo-assinada aprova o Trabalho apresentado à Unidade Curricular Trabalho de Conclusão de Curso II (ICT218), do curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Alfenas (Unifal-MG), campus de Poços de Caldas, como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel e Engenharia de Minas

Aprovada em: 11 de junho de 2014

Examinador: Ériclis Pimenta Freire

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (Unifal-MG)

Assinatura:



Examinador: ~~Maurício Guimarães Bergerman~~

Edmo da Cunha Rodovalho
(Suplente)

Instituição: Unifal-MG

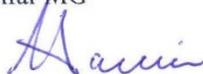
Assinatura:



Examinador: Marco Antonio Alves Garcia

Instituição: Unifal-MG

Assinatura:



AGRADECIMENTOS

A Deus por conduzir-me sempre para o melhor caminho.

Ao professor Ériclis Pimenta Freire pela excelente orientação, compreensão, conhecimentos divididos, confiança e empenho durante todo o processo de elaboração deste trabalho.

Ao corpo docente do núcleo de engenharia de minas da UNIFAL- MG pelos ensinamentos transmitidos.

À empresa de grafita pela autorização do estudo e fornecimento de todos os dados necessários para que fosse possível alcançar os objetivos deste trabalho.

Ao meu colega Bruno Felipe Zanardo pela ajuda.

À minha família e amigos pelo apoio em todos os momentos.

Acima de tudo, aos meus pais, por não medirem esforços para garantirem que eu tivesse a melhor educação, pela doação sem fim, apoio, amor e carinho.

RESUMO

A crescente importância do tema de estabilidade de taludes deve-se às dimensões cada vez mais significativas que são impostas às escavações em lavra a céu aberto e também aos projetos de infraestrutura em geral. Na mineração, a inclinação dos taludes representa a otimização do binômio economia e segurança das escavações na lavra. Assim, o presente estudo de estabilidade objetiva verificar as condições de estabilidade de taludes de escavação em uma mina de grafita localizada no estado de Minas Gerais, por meio de análises cinemáticas, determinísticas e paramétricas e ainda definir medidas preventivas para a continuação das operações. Os estudos foram realizados através de análises cinemáticas, estereograma de fratura e foliações, e estáticas, com o auxílio do software GeoStudio através da ferramenta Slope/W, versão para estudante. Com as análises determinísticas obtiveram-se os fatores de segurança para as seções verificadas, ambas acima de 1,3, exceto para a seção S 06-06'. Já com as análises paramétricas verificou-se a influência dos parâmetros peso específico, coesão e ângulo interno de atrito no fator de segurança e ainda a inclinação dos taludes e a presença de lençol freático, sendo possível compreender os baixos valores de fatores de segurança para a seção S 06 – S 06', na qual se recomenda o rebaixamento do nível de lençol freático para os períodos chuvosos e monitoramento do mesmo. Finalmente, observa-se que a geologia regional tem um grande impacto na estabilidade da cava da mina de grafita, exercida pelas rochas metabásicas e quartzitos, sendo que a primeira apresenta parâmetros baixos de resistência e a segunda parâmetros satisfatórios.

Palavras-chaves: Estabilidade. Taludes de escavação. Mineração. Fator de Segurança.

ABSTRACT

The growing importance of the subject of slope stability is due to the increasingly significant dimensions that are imposed on excavations in open pit mining and also infrastructure projects in general. In mining, the inclination of the slope is the optimization of the binomial involving the economy and safety of the mining excavations. Therefore, this study aims to verify the stability conditions of slope digging in a graphite mine located in the state of Minas Gerais through kinematic, deterministic and parametric analyzes and define preventive measures for the continuation of operations. The studies were performed by so called kinematic analysis, stereogram of fracture and foliation, and static, with the aid of the software GeoStudio, by Slope/W, student version. With deterministic analyzes were obtained factor of safety satisfactory of the observed sections, both above 1.3, except for the section S 06 - S 06 '. Already with the parametric analyzes verified the influence of parameters specific weight, cohesion and internal friction angle of the factor of safety and also the inclination of the slope and the presence of groundwater, with this is possible to understand the low values of factor of safety in section 06 S – S 06 ', in which is recommended the lowering of groundwater for rainy periods and monitoring of the same. Finally, it is noted that the regional geology has a major impact on the stability of the pit graphite mine, exerted by metabasic rocks and quartzites, the first has low strength parameters and the second satisfactory parameters.

Key-words: Stability. Slope of excavations. Mining. Factor of safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Talude e terminologias usuais	11
Figura 2 - Superfície potencial de ruptura.	12
Figura 3 - Variáveis que influenciam no movimento translacional	17
Figura 4 - Variáveis atuantes no movimento rotacional	19
Figura 5 - Análise de uma fatia.....	19
Figura 6 - Estereograma de foliações	24
Figura 7 - Estereograma de fraturas	24
Figura 8 - Mapa geológico e altimétrico	25
Figura 9 – Gráfico de correlação entre fator de segurança e peso específico	27
Figura 10 - Gráfico de correlação entre fator de segurança e coesão.....	27
Figura 11 – Gráfico de correlação entre fator de segurança e ângulo de atrito interno.....	27
Figura 12 – Gráfico de correlação entre fator de segurança e ângulo de inclinação dos taludes	28
Figura 13 – À direita seção S 06 – S 06 e a esquerda círculo provável de ruptura da seção. ..	29
Figura 14 - Seção S 02 – S 02', perfil e círculo potencial de ruptura.....	35
Figura 15 - Seção S 03 - S 03', perfil e círculo potencial potencial de ruptura.....	35
Figura 16 - Seção S 04 - S 04', perfil e círculo potencial de ruptura	35
Figura 17 - Seção S 05 - S 05', perfil e círculo potencial de ruptura	36
Figura 18 - Seção S 06 - S 06', perfil e círculo potencial de ruptura	36
Figura 19 - Seção S 07 - S 07', perfil e círculo potencial de ruptura.....	36
Figura 20 - Seção S 08 - S 08', perfil e círculo potencial de ruptura	37
Figura 21 - Seção S 09 - S 09', perfil e círculo potencial de ruptura	37
Figura 22 - Seção S 10 – S 10', perfil e círculo potencial de ruptura.....	37
Figura 23 - Seção S 11 - S 11', perfil e círculo potencial de ruptura	38
Figura 24 - Seção AUX - 04 - 04', perfil e círculo potencial de ruptura.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de análise	16
Tabela 2 - Parâmetros das litologias da mina	23
Tabela 3 - Fatores de segurança das seções	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1	Taludes	11
3.2	Classificações dos Movimentos de Massas	11
3.3	Estudo de caso: Análise da estabilidade de taludes de Pedra Azul da Nacional de Grafite Ltda.	14
3.3.1	Aspectos Gerais.....	14
3.3.2	Caracterização Geomecânica dos Materiais	15
3.3.3	Ensaio de laboratório.....	15
3.3.4	Análises de estabilidade de taludes.....	15
3.3.5	Considerações Técnicas.....	16
3.4	Fator de Segurança (FS)	17
3.4.1	Métodos para cálculo do Fator de Segurança.....	20
4	METODOLOGIA	21
5	ANÁLISES DE ESTABILIDADE – RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32
	APÊNDECE A	35

1 INTRODUÇÃO

Os taludes são definidos como superfícies inclinadas de maciços terrosos ou rochosos originados por processos naturais ou artificiais (CAPUTO, 1988).

A estabilidade de taludes tem sido um assunto de bastante estudo, pois as condições de estabilidades são diferentes para os distintos materiais que compõem o solo e rocha e a instabilidade dos mesmos podem envolver perdas econômicas e de vidas humanas (PINTO; JÚNIOR; GATTS, 2001). Assim, as pesquisas relacionadas à estabilidade de talude e encostas naturais concentram desenvolvimento técnico-científico relacionado a diversas áreas do conhecimento, como Engenharia de Minas, Engenharia Civil, Geologia, Geologia da Engenharia, Geomorfologia e Mecânica dos Solos e das Rochas (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

Em se tratando de análise de estabilidade de taludes em mineração, o tema se torna mais amplo e complexo, pois além de englobar análise de estabilidade de talude de pilhas de estéril, talude de barragens para contenção de rejeitos, talude de vias ou acessos rodoviários e talude de escavação, a inclinação deste último representam a otimização do binômio economia e segurança das escavações na lavra (REIS, 2010).

Outros fatores relevantes para os taludes de escavação, segundo Reis (2010), é a dinâmica de escavação, o porte dos equipamentos e o caráter provisório dos taludes. A vida útil menor que os taludes de obra civil convencional permite que sejam executados projetos com taludes bastante íngremes, o que viabiliza o empreendimento do ponto de vista econômico, pois há uma redução da relação estéril/minério e por consequência, diminuição dos gastos com a remoção do estéril.

Como muitas empresas passam constantemente por problemas relacionados à instabilidade de taludes, torna-se necessário o estudo de estabilidade e dos parâmetros que causam a instabilidade para que haja medidas preventivas e intervenções, atentando-se ao fato de que a finalidade para as empresas é, como supracitado, tornar o talude estável para uma inclinação que permita coexistir economia e segurança no mesmo cenário.

Assim, o estudo da estabilidade dos taludes de escavação implica nas investigações geotécnicas das litologias, mecanismos de ruptura, causas e consequências dos mesmos e análises paramétricas que influenciam na determinação da geometria de escavação, para acesso direto ao bem mineral de interesse e com a maior segurança possível.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A proposta desse trabalho é verificar as condições de estabilidade de taludes de escavação em uma mina de grafita localizada no estado de Minas Gerais, por meio de análises determinísticas e paramétricas e definir, se necessário, as medidas preventivas para a continuidade das operações.

2.2 Objetivos Específicos

A fim de alcançar o objetivo geral, faz-se necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Aprimorar o conhecimento sobre estabilidade de taludes e encontrar na bibliografia estudos de casos sobre o assunto;
- Compreender os parâmetros geotécnicos e causas de movimento de massa, bem como o comportamento mecânico das diferentes litologias comumente presentes em jazidas de grafita;
- Coletar e consolidar parâmetros de resistência do maciço alterado, já utilizados em análises anteriores, análise de sondagens e ensaios relativos a região onde se localiza a mina;
- Operar o software utilizado; e
- Realizar as análises determinísticas e paramétricas da mina, bem como sugerir medidas preventivas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Taludes

Segundo Caputo (1988), o nome genérico de taludes compreendem superfícies inclinadas que limitam um maciço de terra, de rocha ou de terra e rocha, podendo ser estes naturais, no caso das encostas, ou artificiais, como os taludes de cortes e aterros. Os taludes artificiais exibem homogeneidade mais acentuada que os maciços naturais e, por isto, adéquam-se melhor as teorias desenvolvidas para as análises de estabilidade. A Figura 1 exemplifica um talude e a nomenclatura usualmente empregada.

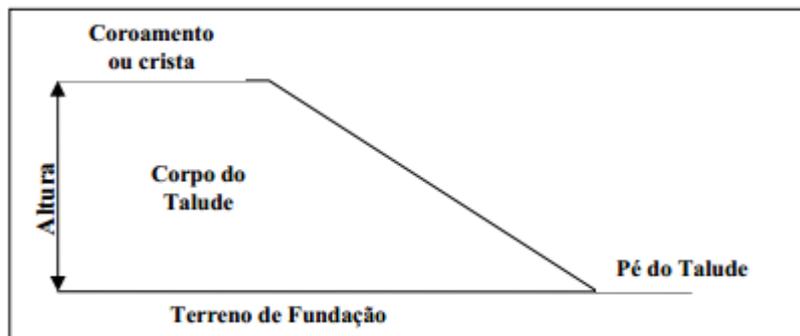
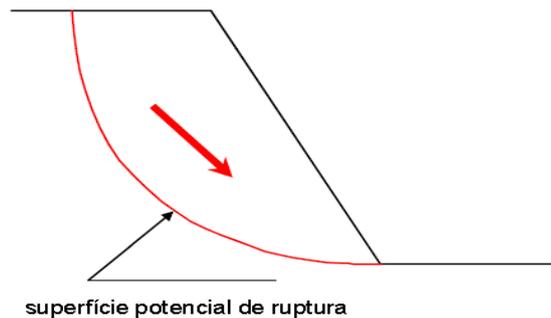


Figura 1 - Talude e terminologias usuais
Fonte: CAPUTO (1988)

4.2 Classificações dos Movimentos de Massas

Em determinadas circunstâncias, uma parte do material de um talude pode desarticular-se em relação ao maciço restante, provocando o processo denominado de movimento de massa que ocorre ao longo de uma determinada superfície denominada superfície de ruptura (GOMES, 2000). Os movimentos de massa podem evoluir de maneira muito lenta até eventos catastróficos.



superfície potencial de ruptura
 Figura 2 - Superfície potencial de ruptura.
 Fonte: GOMES (2000)

Devido aos vários incidentes ocasionados por escorregamentos de massa em todo o mundo, torna-se cada vez mais importante o estudo dos processos de instabilização de taludes e suas formas de contenção.

O termo escorregamento, segundo Tonus (2009) compreende o movimento coletivo de materiais terrosos e/ou rochosos, independentemente da diversidade de processos, causas, velocidades, formas e demais características. O que justifica a dificuldade de análise e abordagem do assunto é a carência de um sistema classificador aceito integralmente, em decorrência da própria falta de definições dos fenômenos envolvidos e da ausência de uma terminologia padronizada (GUIDICINI & NIEBLE, 1984).

A classificação dos movimentos de massa apresentada neste trabalho é a de Magalhães Freire (1965) que procura unificar as noções essenciais contidas nas obras de diversos especialistas. Foi a primeira classificação proposta no Brasil e posteriormente sofreu alterações. Segundo o mesmo, os movimentos coletivos de solo e de rocha são divididos em três grupos: escoamentos, escorregamentos e subsidências.

a) *Escoamentos*: correspondem a deformação, ou movimento contínuo, com ou sem superfície definida de movimentação. Engloba movimentos lentos e rápidos.

- Rastejos: os rastejos são movimentos lentos e contínuos de material, possuindo velocidade tão baixa que não chegam a deslocar o material 0,30 m em dez anos. Esses movimentos chegam a englobar grandes massas de solo, como taludes de uma região inteira, e como consequência da baixa velocidade, pode ocorrer a não identificação entre material em movimento e material estacionário, o que requer uma

atenção especial. Os movimentos são ocasionados por ação da gravidade e por variações de temperatura e umidade; e

- Corridas: as corridas são escoamentos que ocorrem rapidamente como consequência da perda de atrito interno na presença de excesso de água que faz diminuir a resistência mecânica do solo e aumenta a erosão. As corridas classificam-se em função do material e do grau de fluidez em corrida de terra, corrida de areia ou silte e corrida de lama.

b) Escorregamentos: são movimentos rápidos de duração relativamente curta com velocidade variando de acordo com a inclinação do terreno, com a causa inicial do movimento e com a natureza do terreno.

- Rotacional ou circular: neste escorregamento ocorre a separação de uma massa de solo de material do terreno, delimitada de um lado pelo talude e de outro lado por uma superfície contínua de ruptura, podendo ser feita a análise de estabilidade dessa cunha. A forma e posição da superfície de ruptura dependem da distribuição de pressões neutras e da variação da resistência ao cisalhamento; e
- Translacional ou planar: os planos de escorregamentos translacionais são condicionados por anisotropias no interior das massas de solo ou rocha. Ocorre em maciços impermeáveis, com camada de intemperismo delgada, com rede de fluxo paralela a superfície. Diferem dos movimentos rotacionais principalmente pelo fato da superfície de ruptura ser plana e não curva.

c) Subsidiências: são movimentos de deslocamento fortemente vertical por não haver frente livre.

- Subsidiência: ocorre em consequência do adensamento ou afundamento de camadas, pela remoção de alguma fase (sólida, líquida ou gasosa) do subsolo. Podem ser desencadeadas pela ação erosiva das águas subterrâneas e/ou pelo bombeamento das mesmas, em exploração de depósitos subterrâneos, trabalhos de mineração e ação de vibrações sobre sedimentos inconsolidados;
- Recalques: são definidos em engenharia civil para designar o fenômeno que ocorre quando uma edificação sofre um rebaixamento devido ao adensamento do solo sob sua fundação, são movimentos verticais de uma estrutura provocados pelo próprio

peso ou pela deformação do solo por outro agente. Escavações próximas, efeito de bombeamento de água, efeito do rebaixamento generalizado do lençol freático são possíveis causas deste movimento. Recalques se diferenciam de subsidência, pois se trata de movimentos que abrangem áreas substancialmente menores e o pelo fato de os locais de subsidência não serem necessariamente portadores de edificações capazes de provocar deformações verticais (ROSSI et al., 2010); e

- Desabamentos: são formas de subsidências bruscas, podem ser causados por trabalhos subterrâneos de obras de mineração ou por processo natural de dissolução de rochas e substâncias como calcários, dolomitos, gipsita e sal (ROSSI et al., 2010).

4.3 Estudo de caso: Análise da estabilidade de taludes de Pedra Azul da Nacional de Grafite Ltda.

4.3.1 Aspectos Gerais

Um estudo de caso publicado no 1º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia (1990) relata que as minas de grafita, situadas em Pedra Azul, no estado de Minas Gerais, pertencentes a Nacional de Grafite Ltda. se encontravam em operação com taludes de 50 - 60 metros de altura e com inclinação média global entre 58° e 62°, bancadas de 6 m e berma variando de 2 a 5 metros. Este local foi objeto de análise de estabilidade devido a necessidade de aprofundar os taludes para 100 m e conseqüentemente alterar também a geometria das bancadas e larguras das bermas.

Durante todo o histórico da mina não foi registrado instabilizações significativas e sim pequenas rupturas localizadas, caracterizadas por pequenos deslocamentos ao longo de xistosidades ou cunhas formadas por interseção de descontinuidades com xistosidades.

Segundo Cella et al. (1990), o processo de escavação ocorre em solos saprolíticos e saprolito de gnaiss/migmatito, acima do nível de água. Neste local denominado Cava Antiga, localizado entre as minas de Paca e Frente A, ocorreram rupturas por deslizamento, uma delas atingindo praticamente todo o talude e envolvendo massa bastante representativa do material saprolítico. A retroanálise deste escorregamento constitui-se numa importante ferramenta

para o dimensionamento final dos taludes das minas. Para a análise foram considerados também dados geológico-geotécnicos e pluviométricos (CELLA et al., 1990).

4.3.2 Caracterização Geomecânica dos Materiais

Devido ao alto grau de complexidade estrutural e heterogeneidade dos materiais dos taludes da mina estudada, os parâmetros considerados para análise de estabilidade foram (CELLA et al., 1990):

- Resultados de ensaios de laboratório sobre amostras coletadas nas paredes dos taludes já escavados;
- Retroanálise dos taludes existentes nas minas em operação;
- Retroanálise do escorregamento ocorrido na Cava Antiga;

4.3.3 Ensaios de laboratório

Os ensaios geotécnicos de laboratório realizados foram de cisalhamento direto drenado, na umidade natural e com submersão prévia dos corpos de prova, além de triaxiais drenados na umidade natural e saturados (CELLA et al., 1990).

4.3.4 Análises de estabilidades de taludes

Para a verificação da estabilidade global dos taludes das minas Paca e Frente A, foram consideradas as hipóteses de rupturas rotacional e translacional. Em função da acentuada heterogeneidade do material saprolítico onde foram conservadas feições geológicas com continuidade expressiva, o mecanismo de ruptura translacional foi considerado com maior probabilidade de ocorrência.

Foram estabelecidos coeficientes de segurança mínimos, 1,5 para superfícies

translacionais (planar) e 1,2 para rotacionais (circular). Os parâmetros de resistência adotados constam na tabela seguinte:

Tabela 1 - Parâmetros de análise

	Parâmetros para análise de estabilidade	
	Superfície translacional	Superfície circular
C (coesão)	6,0 tf/m ²	13,0 tf/m ²
φ (ângulo de atrito)	34°	33°
γ (peso específico)	1,92 tf/m ³	1,92 tf/m ³

Fonte: CELLA et al. (1990)

Para o presente caso, foram utilizados os ábacos de Hoek e Bray para as análises e concluí-se que para ruptura planar, FS=1,5 e H=100m, a inclinação recomendada para os taludes é de 54°. Para a ruptura circular, FS = 1,2 e H=100, foi definido uma inclinação de 53°. Em função dos dados, foi recomendado uma inclinação de talude global de 53°.

Em locais específicos foram adotados inclinação de 45° por se tratar de solo coluvionar/residual maduro com maior espessura.

4.3.5 Considerações Técnicas

Na avaliação conjunta das condições de estabilidade dos taludes existentes das minas em operação, os resultados permitiram a seleção dos parâmetros de resistência a serem empregados no maciço de saprolito dos taludes de escavação com profundidade de até 100m.

Os resultados das análises apontaram que para profundidades acima de 80m e com ângulos de cerca de 62° como os usados até então, o maciço se encontraria em condições críticas de estabilidade.

Ações permanentes devem ser tomadas durante a execução das cavas:

- Acompanhamento das condições e estabilidade previstas através da verificação de eventual desenvolvimento de fendas de tração próximas ao topo dos taludes;
- Manutenção de condições adequadas de drenagem das águas pluviais nas bermas e no terreno adjacente;
- Monitoramento das variações dos níveis do lençol freático ; e
- Vistorias geológico-técnicas dos taludes, com atenção especial às falhas

anastomosadas de médio ângulo de mergulho.

Por motivos operacionais, os taludes existentes foram mantidos com suas geometrias originais e o aprofundamento seguiu com inclinações inferiores devido aos resultados das análises.

4.4 Fator de Segurança (FS)

A estabilidade de talude é geralmente analisada a partir do fator de segurança. Segundo Fiori e Carmignani (2009), o talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de força, sendo estas o peso dos materiais, o escoamento da água e a resistência ao cisalhamento. Na análise de estabilidade de um talude, deve-se levar em conta o equilíbrio entre estas três forças, uma vez que a força peso dos materiais e a força de escoamento da água se somam e tendem a movimentar a massa de solo para baixo, enquanto a força de resistência ao cisalhamento é a força contrária as duas primeiras, ou seja, é a força que faz com que o talude permaneça estático.

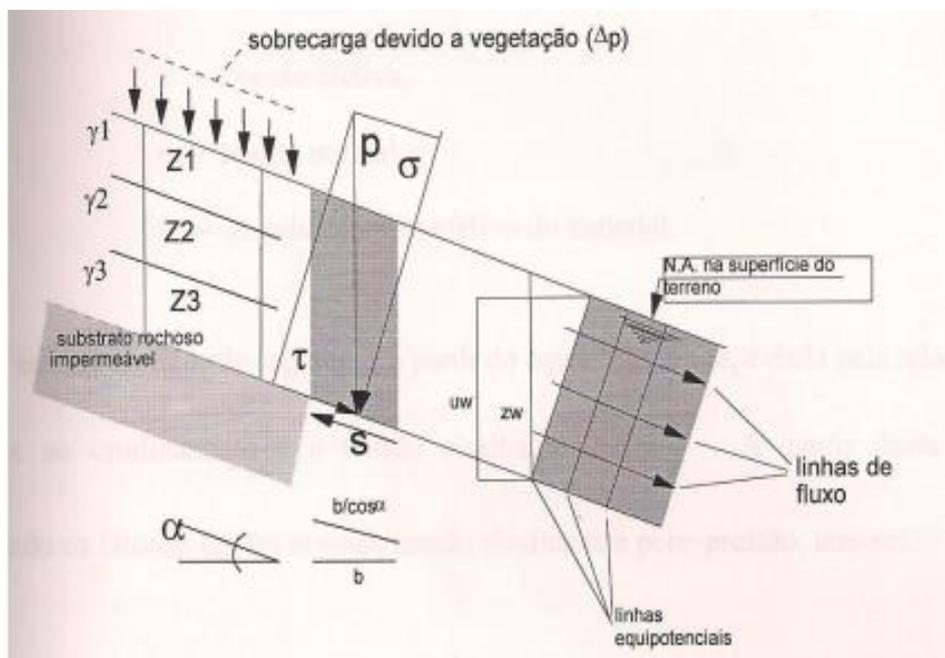


Figura 3 - Variáveis que influenciam no movimento translacional
Fonte: Freire (1995)

Como demonstrado na Figura 3, o bloco é solicitado pelo seu próprio peso P , e a

componente tangencial ($P \sin \alpha$) tende a causar o movimento. A componente normal é igual a ($P \cos \alpha$).

A força que resiste à movimentação (S) é expressa por $S = \tau \cdot l$, sendo τ a resistência ao cisalhamento do contato fatia-plano inclinado. Pela lei de Coulomb, tem-se que $\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$, sendo l , o comprimento da fatia, c a coesão e ϕ o ângulo de atrito interno no contato bloco/superfície de apoio.

Com o propósito de relacionar a estabilidade de taludes em condições diferentes de equilíbrio-limite, define-se um fator de segurança (F_s) como a razão entre a resultante das forças resistentes ao escorregamento e as forças solicitantes, ou favoráveis ao movimento. Sendo assim, o fator de segurança é dado por:

$$F_s = \frac{\text{forças resistentes}}{\text{forças solicitantes}} \quad (1)$$

A partir desta relação e substituindo os valores: tensão normal, tensão cisalhante e poro-pressão, cancelando as variáveis pertinentes têm-se:

$$F_s = \frac{c + (\gamma_z + \Delta p - \gamma_w Z_w) \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \phi}{\gamma_z \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha} \quad (2)$$

Onde:

c' : Coesão efetiva do material (kPa);

γ_z : Peso específico do material (kN/m³);

Z : Espessuras da camada de solo;

Δp : sobrecarga (vegetação ou equipamento);

γ_w : Peso Específico da água;

Z_w : Espessura da camada de água (rede de fluxo);

$\cos^2 \alpha$: componente da força peso e largura da fatia analisada;

$\operatorname{tg} \phi$: tangente do ângulo de atrito do material

$\operatorname{sen} \alpha$: componente da forma peso; e

$\cos \alpha$: componente referente a largura da fatia analisada.

A equação 2 possibilita o cálculo do fator de segurança para um possível escorregamento translacional do talude a ser analisado. Entretanto, quando se trata de uma

ruptura rotacional, as variáveis se alteram (ver Figura 4).

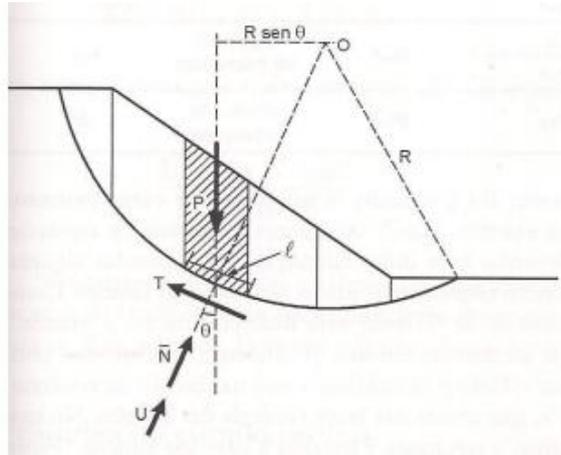


Figura 4 - Variáveis atuantes no movimento rotacional
Fonte: MASSAD (2003)

Os fatores considerados são: geometria, resistência do solo e a distribuição de pressão neutra na base da fatia.

Conforme a Figura 4, este método analisa diversas superfícies de ruptura, e para aquela que apresentar o menor fator de segurança deverá realizar-se o cálculo. Segue abaixo os fatores e variáveis que são analisados em cada fatia (ver Figura 5) (MASSAD, 2003):

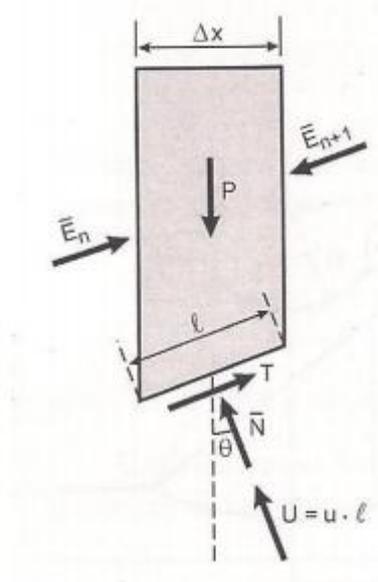


Figura 5 - Análise de uma fatia
Fonte: MASSAD (2003)

Portanto, o fator de segurança no mecanismo de ruptura rotacional é dado por:

$$F_s = \frac{\sum [c\ell + (P \cdot \cos\theta - \mu \cdot \Delta x \cdot \sec\theta) \cdot \tan\phi]}{\sum (P \cdot \sin\theta)} \quad (3)$$

Onde:

c' : Coesão efetiva do material (kPa);

l : comprimento da fatia

μ : pressão d'água na superfície de ruptura (kN/m²);

Δx : espessura da camada; e

$\sec \theta$: componente da poro pressão normal ao peso

4.4.1 Métodos para cálculo do Fator de Segurança

Existem vários métodos para determinar o fator de segurança de uma dada superfície. Segundo Calle (2000), a seleção do modo de ruptura possível deve-se basear no conhecimento da geologia in situ e do perfil do solo intemperizado. Normalmente são utilizadas superfícies circulares para facilitar a solução dos casos. Dentre os métodos para o cálculo do fator de segurança de uma superfície destacam-se: Fellenius (1936), Bishop (1955), Janbu (1973), Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967). No presente trabalho serão abordados apenas os três primeiros e sendo assim, segue abaixo algumas considerações sobre os métodos a serem utilizados (CALLE, 2000):

- Método de Fellenius - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em fatias e não considera forças entre elas, mas considera haver tensão normal ao peso na base das fatias;
- Método de Bishop - considera uma superfície de ruptura circular, divide a massa deslizante em lamelas, considera a resultante das forças interlamelares horizontal e as forças cisalhantes entre lamelas como nulas; e
- Método de Janbu Generalizado - considera uma superfície de ruptura qualquer e a resultante das forças interlamelares é determinada por uma linha de empuxo assumida.

4 METODOLOGIA

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho foi dividida em três etapas:

Etapa 1: Revisão da Literatura

A etapa inicial consistiu na pesquisa de assuntos e estudos de casos relacionados à estabilidade de taludes em geral, os quais foram fundamentais para o entendimento do tema abordado e definições expressas neste trabalho. Além dos estudos de casos, foram investigados os parâmetros geotécnicos que influenciam a estabilidade de taludes.

Etapa 2: Coleta de dados a serem aplicados no estudo

Esta etapa consistiu em determinar quais os parâmetros que seriam necessários para que as análises fossem concretizadas. Após a identificação dos dados necessários, foi feita uma requisição a mineração de grafita, respeitando o sigilo do nome da empresa e da mina. Os materiais cedidos pela empresa foram o mapa geológico e altimétrico, o estereograma de foliações e fraturas, perfis e os parâmetros geotécnicos das litologias presentes na mina.

Etapa 3: Análise das seções e elaboração dos pareceres técnicos

Após o recebimento das informações técnicas foram executadas inicialmente as análises cinemáticas, empregadas para a avaliação de mecanismos de rupturas planares, em cunha e por tombamento.

As análises cinemáticas abrangem a potencialidade de movimentação de zonas específicas do maciço fazendo uso da representação espacial das discontinuidades. Este mapeamento é feito por meio da projeção estereográfica em diagramas de projeção hemisférica de igual área (CASTRO, 2004). Com os dados estruturais representados no estereograma torna-se viável avaliar as condições de estabilidade dos taludes ao longo das seções mais representativas dos domínios lito-estruturais existentes, e definir áreas críticas para estudos mais rigorosos. Dessa forma, foram identificados primeiramente as regiões que potencialmente oferecem mais riscos de ruptura através dos estereogramas.

Estabeleceu-se como base de referência a necessidade de se utilizar um programa computacional para as análises, assim selecionou-se a ferramenta Slope/W do software GeoStudio, sendo utilizada a versão de 2007 para estudantes, fazendo-se uso dos métodos de equilíbrio limite de Fellenius (1936), Bishop (1955) e Janbu (1973).

O método do equilíbrio limite trata-se da metodologia mais difundida atualmente e que assume na análise de estabilidade de taludes a ruptura do maciço, dividida em lamelas (*slice*), ao longo de uma superfície potencial de ruptura (ASSIS, s.d). O fator de segurança é admitido como sendo constante ao longo desta superfície, sendo determinado a partir de equações que satisfaçam o equilíbrio estático de forças em duas direções ortogonais e/ou de momentos (REIS, 2010).

Utilizando tais métodos foram analisados os taludes globais de onze seções para os períodos de maior e menor pluviosidade. Com a escolha de uma seção arbitrária foram feitas análises paramétricas considerando o peso específico, a coesão, o ângulo de atrito interno e o ângulo de inclinação dos taludes, com a finalidade de identificar os parâmetros que mais influenciam na estabilidade. Depois de realizadas as análises foram possíveis elaborar os pareceres técnicos.

5 ANÁLISES DE ESTABILIDADE – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de resistência das litologias presentes na mina, bem como o mapa geológico e altimétrico, perfis e estereogramas de fraturas e foliações foram cedidos pela empresa, conforme solicitado e assim foram possíveis realizar as análises de estabilidade correspondentes para os taludes globais e individuais.

Os parâmetros dos materiais presentes na mina constam da Tabela 2:

Tabela 2 - Parâmetros das litologias da mina

MATERIAL	γ (kN/m ³)	c' (KPa)	ϕ' (°)
Migmatito	20	30	31
Metabásica	18	14	20
Xisto Grafítico	19	90	26
Quartzito	21	280	36
Migmatito Grafítico	19	90	26
Gnaise	18	65	25

Fonte: Arquivos da empresa

Analisando a projeção estereográfica na Figura 6, sobre foliação (Sn), verifica-se que as mesmas possuem mergulho entre 30° - 40° e azimute de 180°. Já para as fraturas, Figura 7, tem-se a indicação que o mergulho das fraturas (Fr) variam de 60° a 70° e azimute de 310° a 320°. Quando se reúne estas informações, percebe-se claramente que na região SW pode haver a ruptura em cunha no encontro das foliações e fratura, pois ambas são descontinuidades. Porém, observou-se que a intersecção destas descontinuidades tem direção do mergulho contrária a face dos taludes, ou seja, para o interior do maciço, sendo a direção da linha de intersecção de aproximadamente 240°. Portanto embora haja a formação de cunhas estas não comprometem a estabilidade do maciço na região analisada.

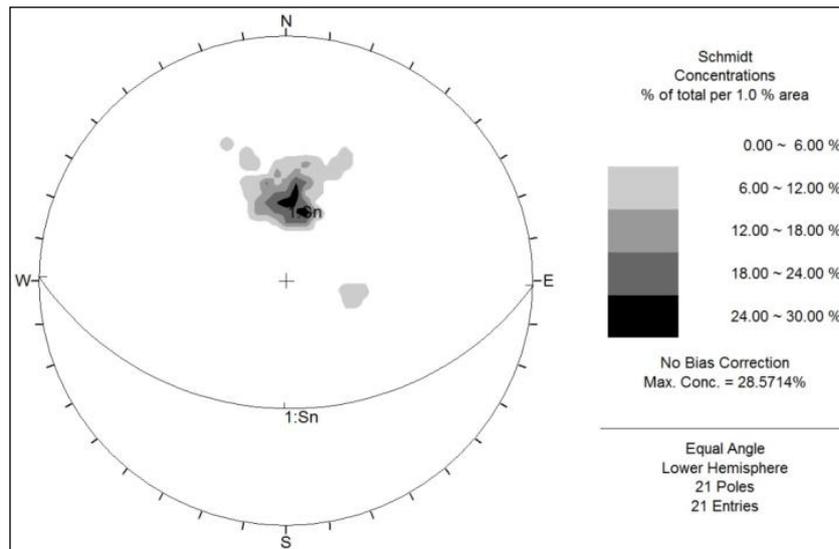


Figura 6 - Estereograma de foliações
Fonte: Arquivos da empresa

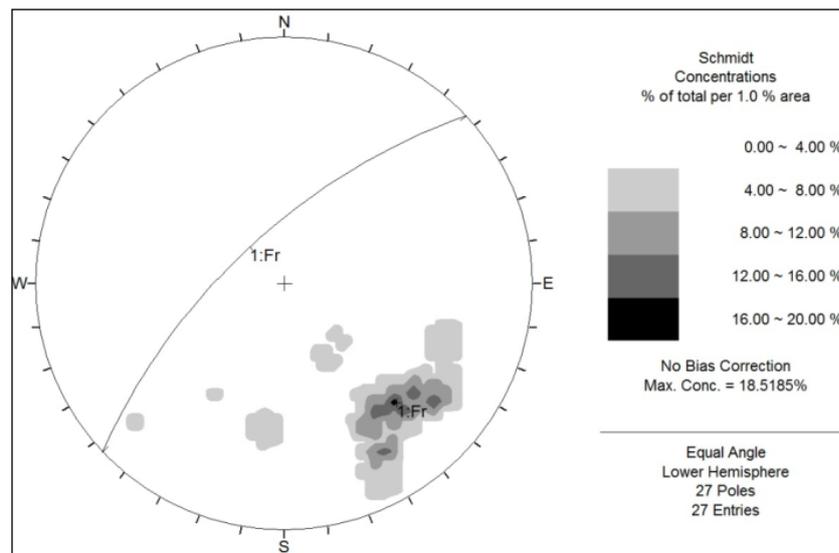


Figura 7 - Estereograma de fraturas
Fonte: Arquivos da empresa

A partir do mapa geológico e altimétrico da mina (Figura 8) foi possível identificar quais eram as seções inseridas na região de interseção das discontinuidades e reforçar a análise das mesmas, pois significam a fragmentação do material embora apresentem direção do mergulho para o interior do maciço. As análises foram feitas no sentido de sul para o centro.

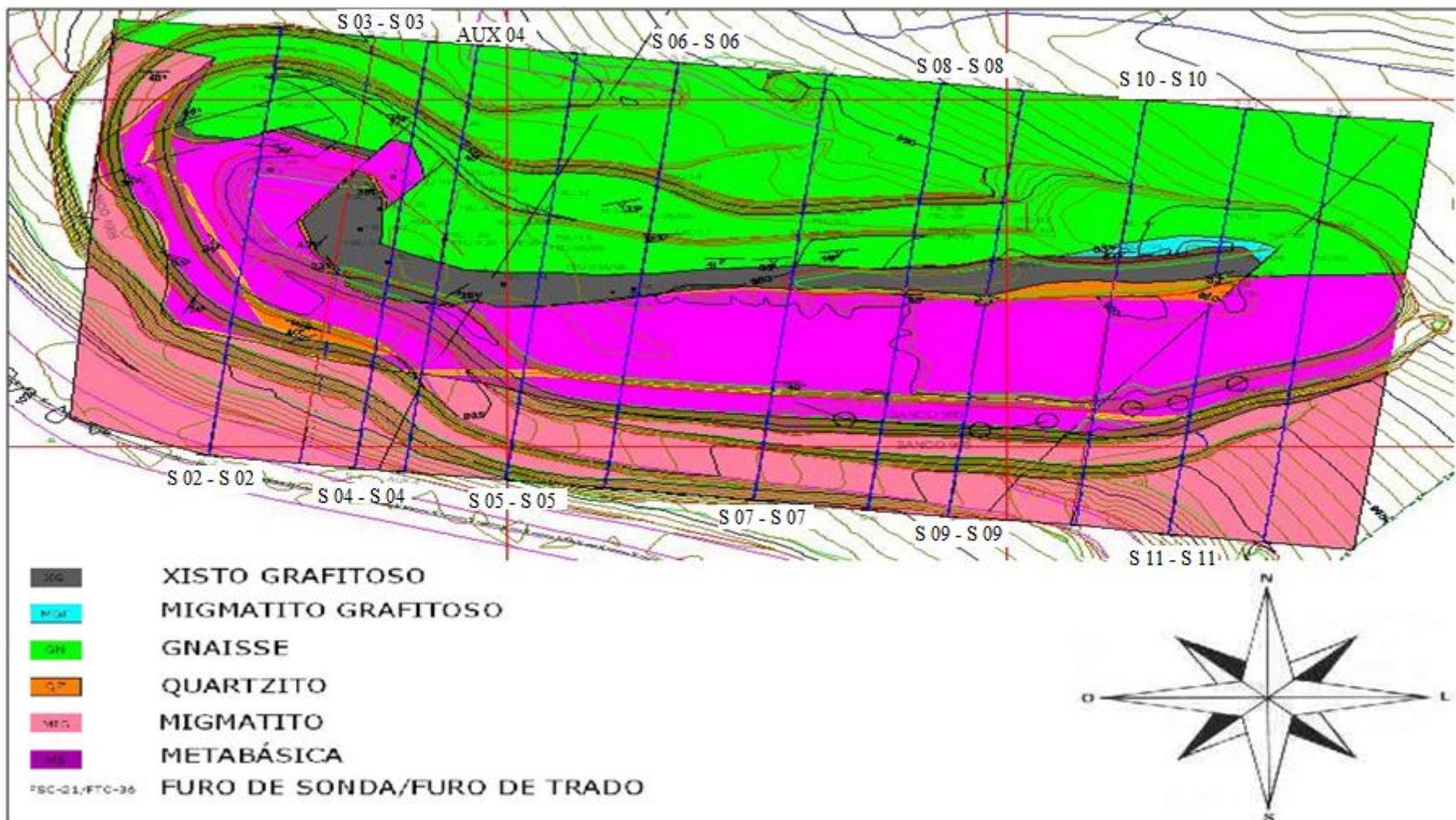


Figura 8 - Mapa geológico e altimétrico
 Fonte: Arquivos da empresa (adaptado pela autora)

Após as análises dos taludes globais das onze seções, obteve-se os fatores de segurança para os casos de períodos de seca ou de menor pluviosidade e períodos chuvoso ou de maior pluviosidade. Em algumas das seções não foram verificados níveis d'água.

Tabela 3 - Fatores de segurança das seções

Seções	FS períodos de menor pluviosidade			FS períodos de maior pluviosidade		
	Fellenius	Bishop	Janbu	Fellenius	Bishop	Janbu
S 02 – S 02'	2,36	2,78	2,35	1,88	2,21	1,86
S 03 – S 03'	1,52	1,64	1,45	1,37	1,44	1,33
S 04 – S 04'	1,65	1,78	1,60	1,64	1,77	1,59
S 05 – S 05'	1,72	1,85	1,77	-	-	-
S 06 – S 06'	1,24	1,35	1,26	0,88	0,99	0,95
S 07 – S 07'	1,68	1,88	1,69	1,27	1,48	1,36
S 08 – S 08'	2,23	2,56	2,16	1,77	2,10	1,79
S 09 – S 09'	1,53	1,77	1,55	1,26	1,57	1,40
S 10 – S 10'	2,03	2,46	2,06	-	-	-
S 11 – S 11'	2,58	2,83	2,55	2,22	2,50	2,27
AUX - 04 - 04'	1,59	1,68	1,50	-	-	-

Fonte: GeoStudio

Observa-se que as análises indicam valores maiores que 1,00, o que indica que as forças solicitantes são de menor magnitude que as resistentes. Outra consideração refere-se ao fato de se tratar de taludes provisórios e portanto adota-se valores de FS, comumente, maiores que 1,3 e menores que 2,00. Portanto os taludes são estáveis, exceto para a seção S 06 – S 06'.

Para os valores de fatores de segurança com presença de água, verificam-se valores menores do que os valores de FS para períodos de seca. Esta diminuição ocorre devido a geração de forças de percolação que gera o araste de partículas e aumento de erosão, além de acarretar o aumento do peso específico dos materiais, o aumento da poro-pressão causando a diminuição da pressão efetiva, o que em outras palavras significa a diminuição da resistência mecânica.

A seção S 02 - S 02', foi escolhida arbitrariamente para as análises paramétricas. Os resultados constam dos gráficos seguintes.

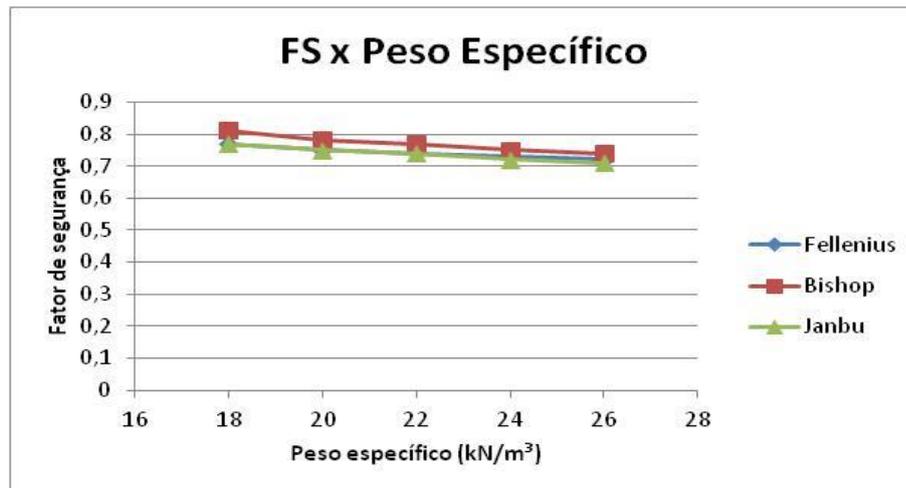


Figura 9 – Gráfico de correlação entre fator de segurança e peso específico
Fonte: GeoStudio

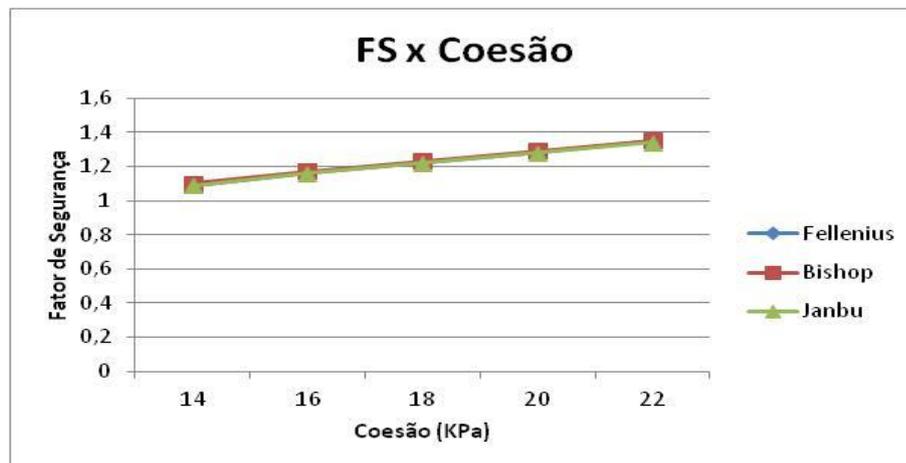


Figura 10 - Gráfico de correlação entre fator de segurança e coesão
Fonte: GeoStudio

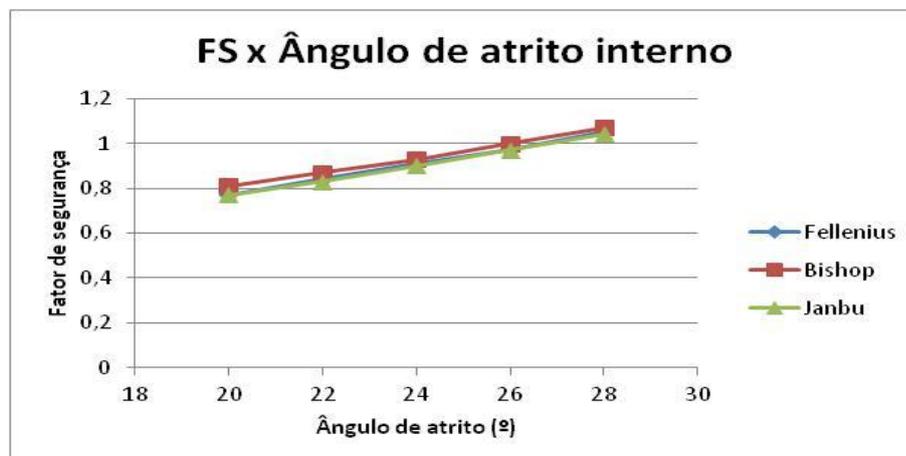


Figura 11 – Gráfico de correlação entre fator de segurança e ângulo de atrito interno
Fonte: GeoStudio

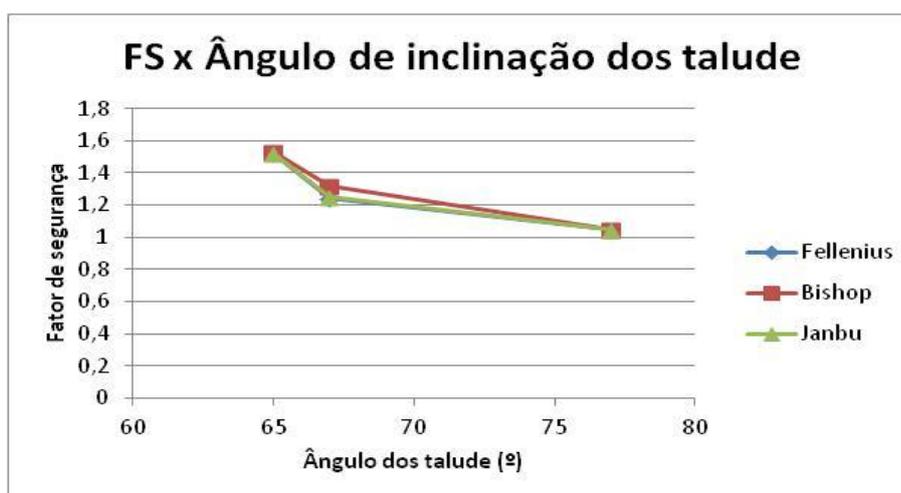


Figura 12 – Gráfico de correlação entre fator de segurança e ângulo de inclinação dos taludes
Fonte: GeoStudio

Para o primeiro caso, a análise revela que o aumento do peso específico faz com que haja uma queda no fator de segurança, pois o aumento da tensão normal é menos significativa que o aumento da tensão cisalhante.

Já com o aumento de coesão e ângulo de atrito ocorre o contrário, ambos são diretamente proporcionais ao fator de segurança. Estes resultados seguem o esperado, pois por definição o ângulo de atrito interno é uma medida de resistência ao cisalhamento dos materiais decorrente do atrito entre as partículas e a coesão é uma medida de resistência decorrente da ação de forças cimentantes presentes entre as partículas minerais, ou seja, são parâmetros de resistência ao cisalhamento, portanto quanto maiores a coesão e o ângulo de atrito interno maiores devem ser as forças resistentes a ruptura.

Para a inclinação de talude, os maiores ângulos implicam em menores fatores de segurança, devido ao fato de que maiores inclinações aumentam as componentes tangenciais e assim aumentam as forças favoráveis ao movimento de massa.

Após as análises, verifica-se que a seção com menores fatores de segurança (S 06 – S 06', Figura 13) é justamente a seção com menor presença de quartzito, se comparada as demais (ver APÊNCIDE A). Examinando a Tabela 2, o quartzito é a litologia que apresenta maior coesão e maior ângulo de atrito, em contrapartida, na seção há predominância do material migmatito que possui os menores fatores de resistência ao cisalhamento, verificando-se então a importância da geologia na estabilidade dos taludes. Outro fator que faz com que os FS dessa seção sejam baixos é a inclinação dos taludes que são de 71° e 72° fazendo com que a inclinação global seja de 73°, enquanto nas outras seções foram verificados inclinações menos íngremes em média.

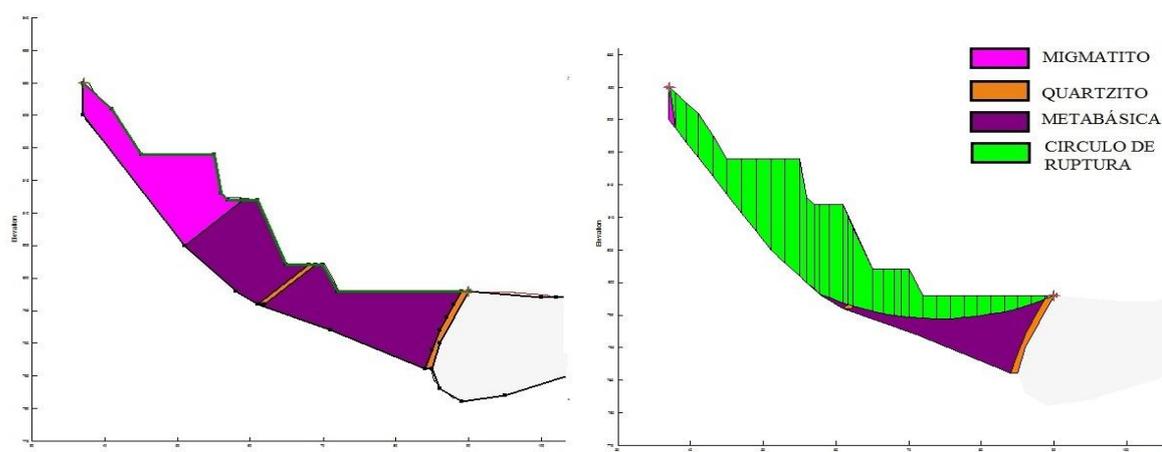


Figura 13 – À direita seção S 06 – S 06 e a esquerda círculo provável de ruptura da seção.
Fonte: GeoStudio

Conforme identificado nos estereogramas, a região SW apresenta a formação de cunha com mergulho favorável e de acordo com o mapa geológico e altimétrico, as seções inseridas na região são S 02 – S 02', S 03 – S 03', S 04 – S 04', S 05 – S 05', AUX - 04 - 04' e S 06 - S 06'. As cinco primeiras seções possuem valores de fatores de segurança satisfatórios, visto que são maiores que 1,3, o que apresenta uma margem consideravelmente boa de segurança. Entretanto, a seção S 06 – S 06', que é também a que apresenta menor FS das seções estudadas, está inserida na região mais fragmentada, o que o torna a seção muito peculiar.

Outro fato a se considerar ainda sobre a mesma seção são os baixos fatores de segurança nos períodos de maior pluviosidade. A análise feita é que nesses períodos, o círculo de ruptura apresenta um ligeiro deslocamento para baixo, indicando ruptura, entretanto a dinâmica das operações de lavra dificultam a visualização desses pequenos movimentos de massa, além de se tratar de breves períodos de tempo.

Sendo assim, recomenda-se que haja um rebaixamento do lençol freático nos períodos chuvosos e um monitoramento do “NA”, o que o tornará seguro do ponto de vista operacional, sabendo que em períodos de menor pluviosidade o FS da seção é próximo de 1,3.

Outra intervenção poderia ser o retaludamento, mas a prática de rebaixamento de NA se mostra mais viável por não alterar a geometria dos taludes e ser uma técnica comum na mineração e menos dispendiosa.

Todavia, a análise estática é uma análise bidimensional e o que realmente se encontra na mina é uma situação tridimensional. Isso significa que essas fatias podem estar sendo sustentadas por outras que não foram analisadas, ou seja, pode estar ocorrendo um confinamento lateral.

Outros fatores como análise de ruptura em cunha não foram aprofundados por

requererem um estudo geológico estrutural da área. Mas considerou-se que o ângulo de mergulho da interseção das descontinuidades (plungue) é maior que o do talude, provocando o calçamento da cunha.

6 CONCLUSÃO

A geologia regional tem um grande impacto na estabilidade da cava da mina de grafita. Isso pôde ser constatado com as análises paramétricas que contribuíram para verificar a influência das variáveis nos resultados dos fatores de segurança. O aumento de peso específico faz diminuir significativamente o fator de segurança e o aumento da coesão e do ângulo interno de atrito contribui de forma efetiva para a estabilidade. O aumento da inclinação e a presença de lençol freático são também determinantes no valor do “FS”, fazendo com que haja diminuição deste.

O rebaixamento de nível de água na seção S 06 – S 06’ deve ser considerada uma intervenção necessária pelo fato da região apresentar um maciço fragmentado em cunha, embora com mergulho favorável. As outras seções apresentam fatores de segurança satisfatórios, não necessitando de intervenções.

Ao contrário da rocha metabásica, as análises revelaram que o quartzito é de grande importância na estabilidade da mina de grafita, isso porque apresenta o maior ângulo de atrito interno e coesão seis vezes maior que a média dos outros materiais estudados.

Dentre os métodos estudados, recomenda-se a utilização do método de Janbu, pois atribui mais fatores a se considerar nas análises e por isso apresenta valores mais próximos dos reais por ser um método menor conservador.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. S. S., Aterro sobre Solos Moles: da Concepção à Avaliação do Desempenho. Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil. 215 p, 1996.
- ASSIS, André Pacheco de. **Mecânica das Rochas**. Brasília: Unb, s.d. Notas de aula.
- BISHOP, A.W.(1955). The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes. *Geotechnique*, Vol. 5, p. 7-17.
- CALLE, J. A. C. **Análise de Ruptura de Talude em Solo não Saturado**. 156f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2000.
- CAPUTO, H.P. *Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos*. 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234p.
- Castro, W.J. (2004). Síntese de estudos de estabilidade de taludes de minas de minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero / MG. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, 202p.
- CELLA, Paulo Roberto da Costa et al. **Estudo da Estabilidade dos Taludes das Minas de Pedra Azul**. : Abms, 1990
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. *2nd Congress of large Dams*, pg 463.
- Fiori, Alberto Pio e Carmignani, Luigi - *Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes* - 2 ed. Ver. E ampl. - Curitiba: Ed. UFPR, 2009
- FREIRE, Ériclis Pimenta. *Análise de Estabilidade de Taludes em Solo Nos Morros da Cidade de Santos, SP*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília DF, 120p. 199
- GOMES, Romero César. **Taludes e Movimentos de Massa**. Ouro Preto: Ufop, 2000. Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~romerocesar/Aula1PPT.pdf>>. Acesso em: 7 dez. 2013.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Abge, 1998

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. Editora Edgard Blücher. 2ª edição. São Paulo, 1984.

GOMES, Romero César. **Taludes e Movimentos de Massa**. Ouro Preto: Ufop, 2000.
Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~romerocesar/Aula1PPT.pdf>>.
Acesso em: 7 dez. 2013.

JANBU, N. (1973). Slope stability computations. Embankment-Dam Engineering Casagrande volume, R.C Hirschfeld & S.J.Poulos, John Wiley, New York, USA, pp.47-86.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 170 p.

MORGENSTERN, N. R. y Price, V. E. (1965), “ The Analysis of Stability of General Slip Surfaces”, Geotechnique, Vol. 15, No.1, pp.79-93

PINTO, Wendell Dias; SABOYA JÚNIOR, Fernando; GATTS, Carlos Eduardo Novo. **Avaliação do Potencial de Ruptura de Taludes: Uma Abordagem Fuzzy**. Rio de Janeiro: Abms, 2001.

REIS, Renato Capucho. **ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES DA MINA DE TAPIRA-MG**. Ouro Preto: Ufop, 2010. Disponível em:
<[http://www.nugeo.ufop.br/joomla/attachments/article/11/Dissertação Renato Capucho Reis.pdf](http://www.nugeo.ufop.br/joomla/attachments/article/11/Dissertação%20Renato%20Capucho%20Reis.pdf)>. Acesso em: 2 dez. 2013.

ROSSI, Bruno Marcello Citon et al. **MOVIMENTOS DE MASSA**. São Paulo: Instituto Federal, 2010. Disponível em:
<<http://xa.yimg.com/kq/groups/23508773/1023511474/name/Movimento+de+Massas.pdf>>.
Acesso em: 16 jan. 2014.

SPENCER, E. (1967), “ A Method of Analysis of Stability of Embankments Assuming Parallel Interslice Forces”, Geotechnique, Vol.17, No.1,pp.11-26

TONUS, Penteadó de Almeida. **ESTABILIDADE DE TALUDES: AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE APLICADOS A UMA ENCOSTA COLUVIONAR E RESIDUAL DA SERRA DO MAR PARANAENSE**. 2009. 147 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Geotecnia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009. Disponível em: <<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0116.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

APÊNDICE A – Perfis e análises de estabilidade das seções

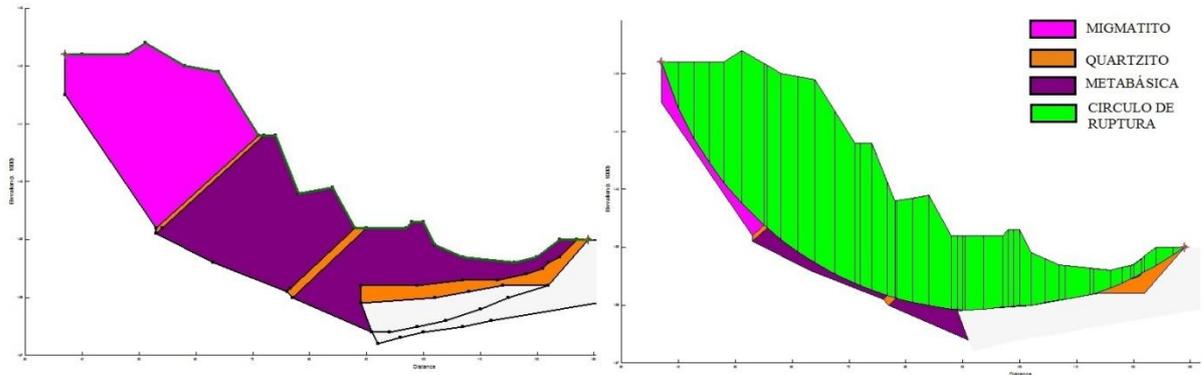


Figura 14 - Seção S 02 – S 02', perfil e círculo potencial de ruptura
Fonte: GeoStudio

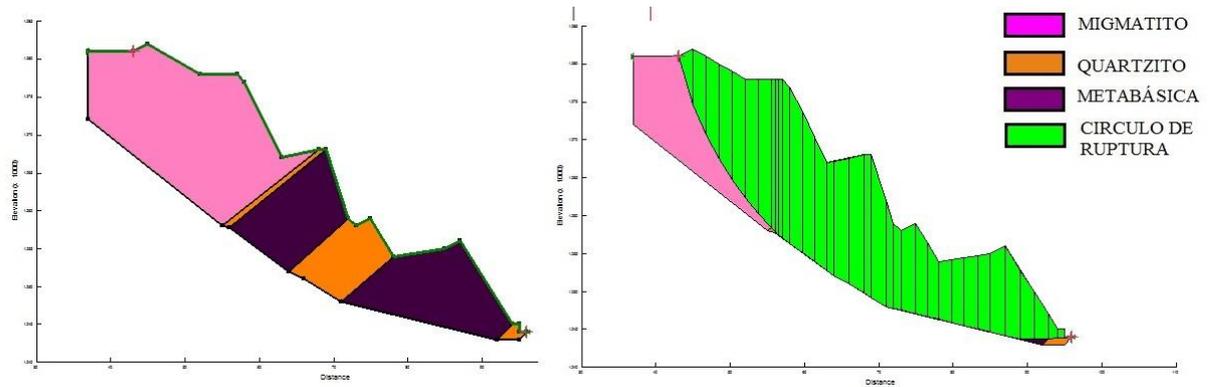


Figura 15 - Seção S 03 - S 03', perfil e círculo potencial de ruptura.
Fonte: GeoStudio

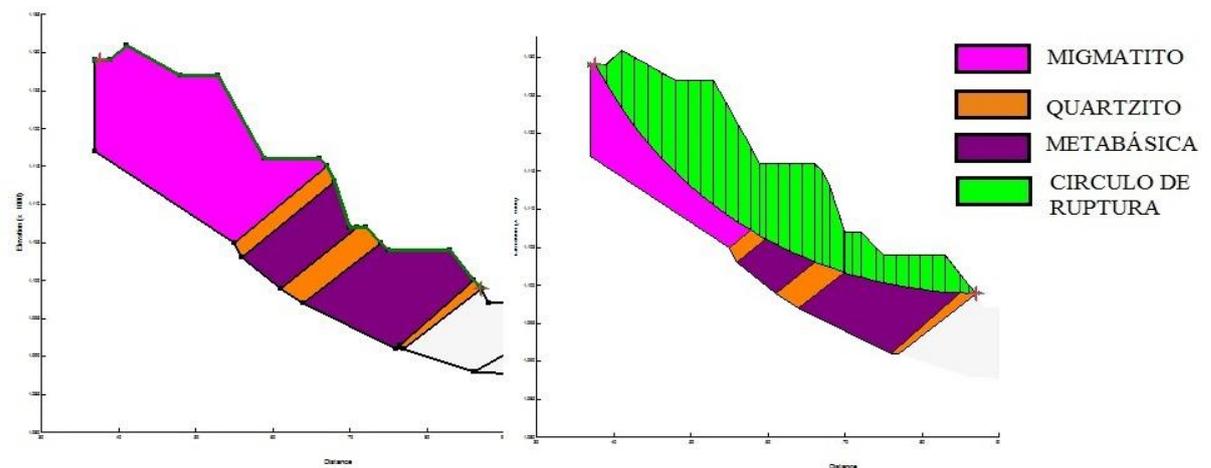


Figura 16 - Seção S 04 - S 04', perfil e círculo potencial de ruptura
Fonte: GeoStudio

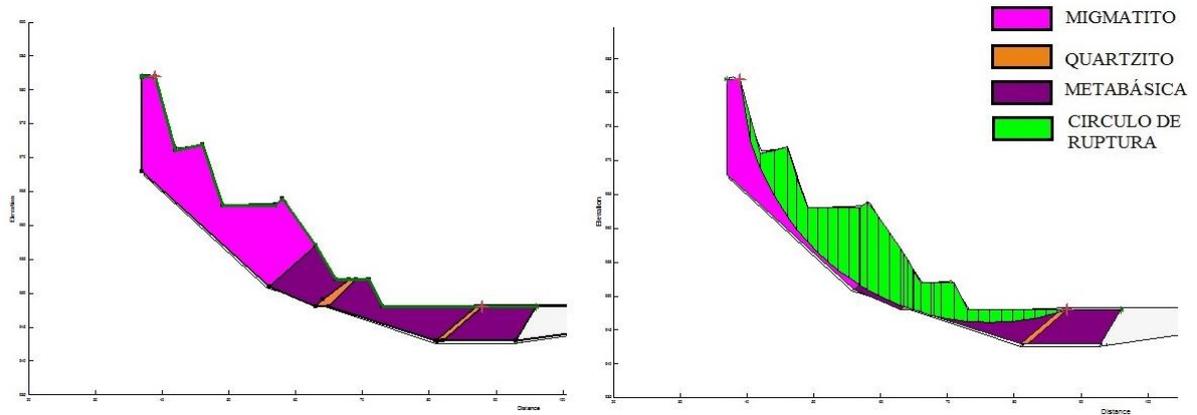


Figura 17 - Seção S 05 - S 05', perfil e círculo potencial de ruptura
 Fonte: GeoStudio

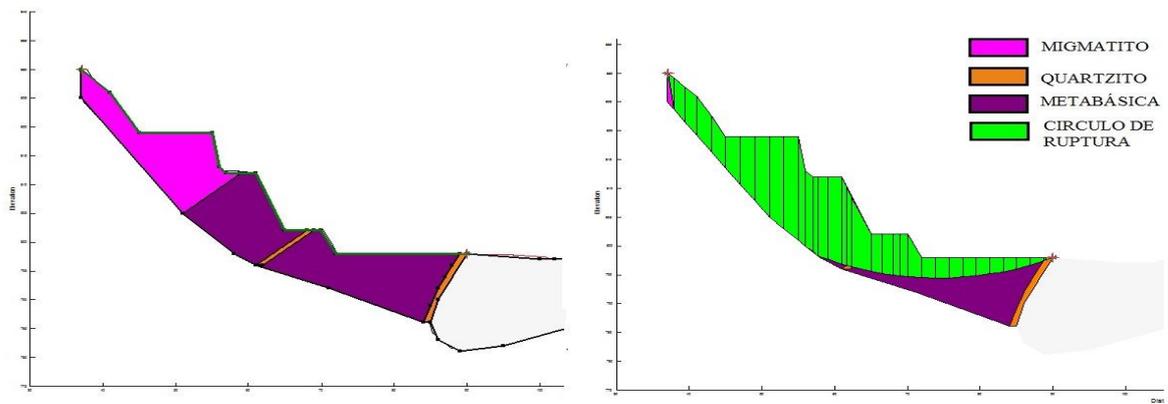


Figura 18 - Seção S 06 - S 06', perfil e círculo potencial de ruptura
 Fonte: GeoStudio

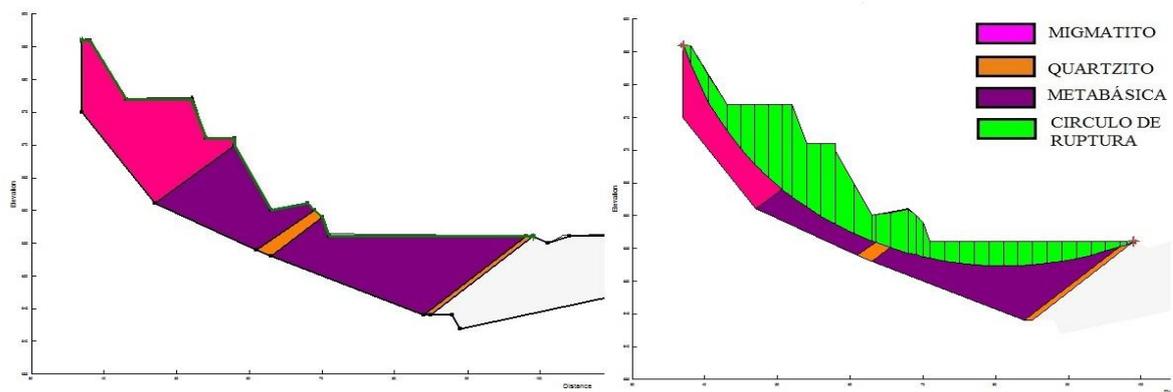


Figura 19 - Seção S 07 - S 07', perfil e círculo potencial de ruptura
 Fonte: GeoStudio

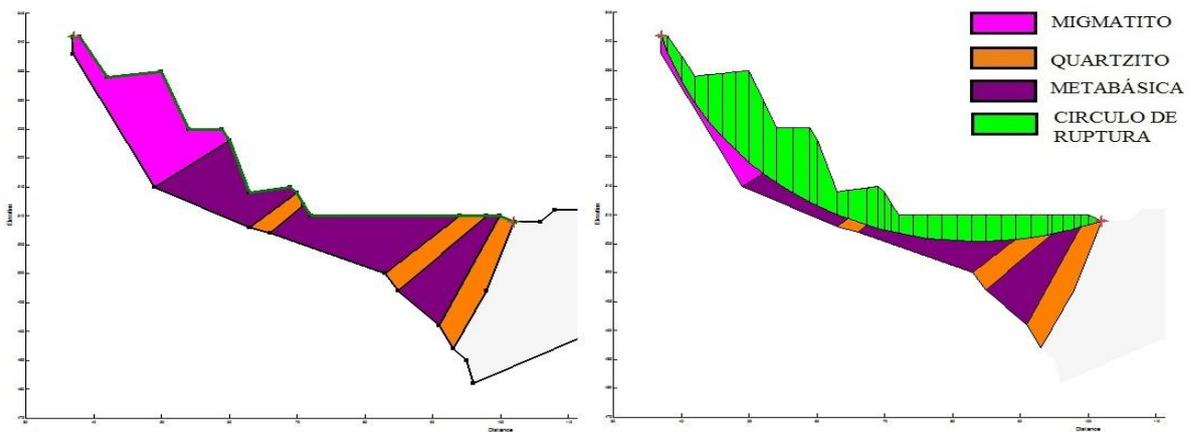


Figura 20 - Seção S 08 - S 08', perfil e círculo potencial de ruptura
 Fonte: GeoStudio

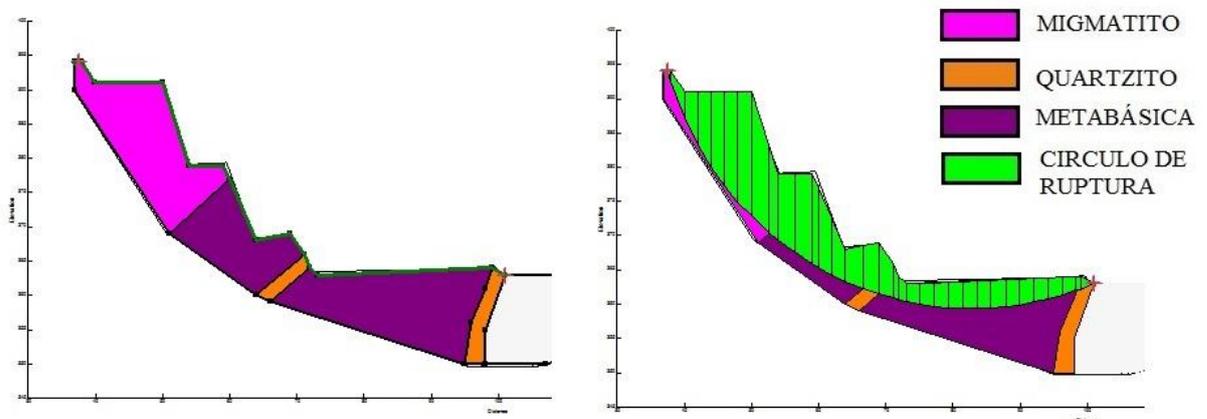


Figura 21 - Seção S 09 - S 09', perfil e círculo potencial de ruptura
 Fonte: GeoStudio

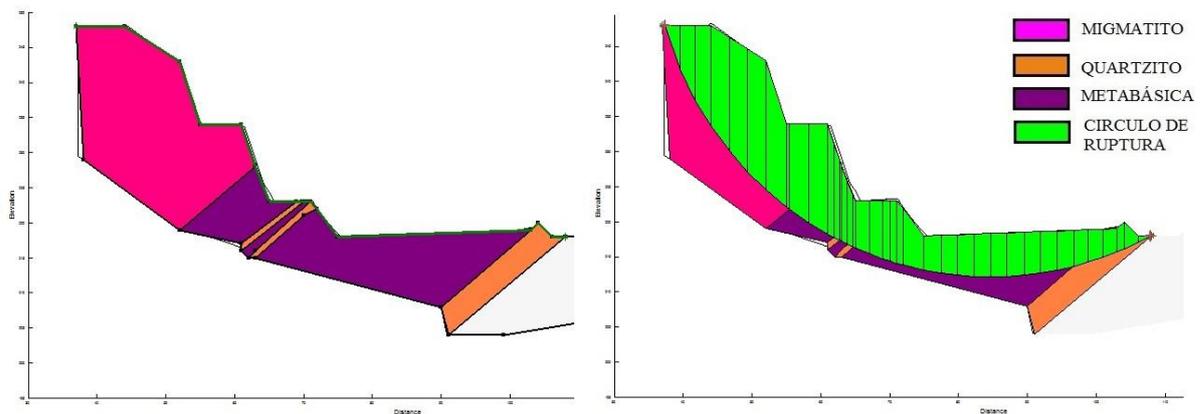


Figura 22 - Seção S 10 - S 10', perfil e círculo potencial de ruptura
 Fonte: GeoStudio

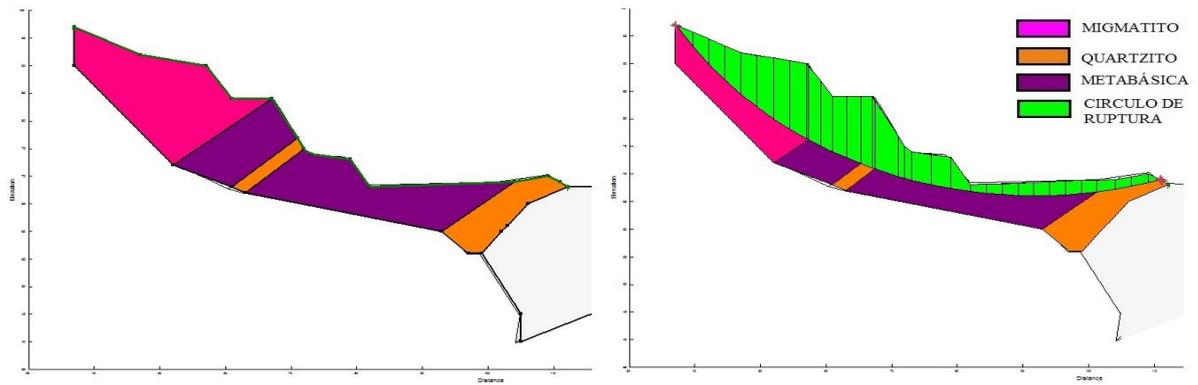


Figura 23 - Seção S 11 - S 11', perfil e círculo potencial de ruptura
Fonte: GeoStudio

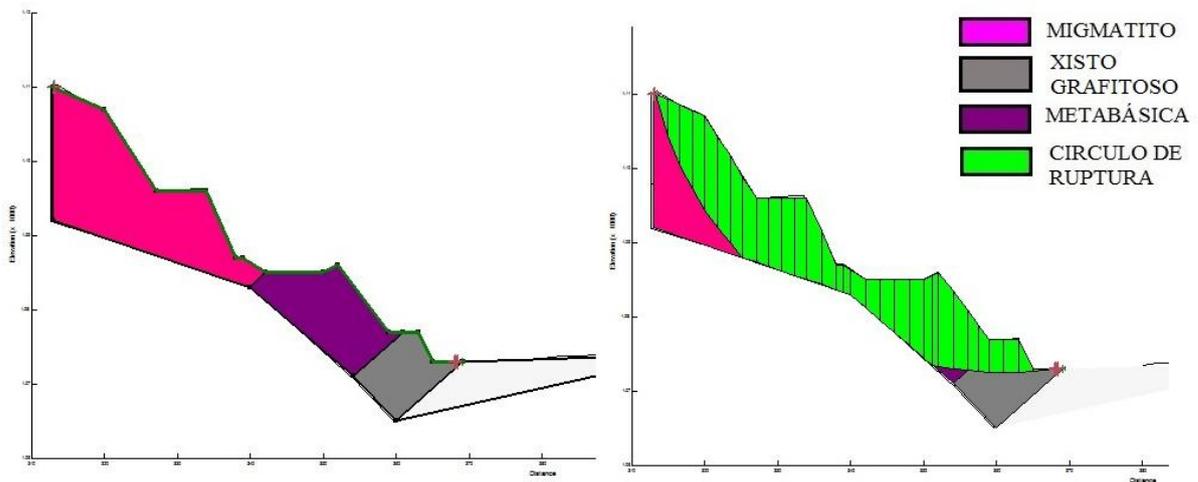


Figura 24 - Seção AUX - 04 - 04', perfil e círculo potencial de ruptura
Fonte: GeoStudio