



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

INFLUÊNCIA DA HIDROGEOLOGIA NA ESTABILIDADE DE TALUDE EM SOLO

EDUARDO SALDANHA ALVIM

ARAXÁ

2016

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ
DEPARTAMENTO DE MINAS E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS

INFLUÊNCIA DA HIDROGEOLOGIA NA ESTABILIDADE DE TALUDE EM SOLO

EDUARDO SALDANHA ALVIM

ORIENTADOR

Prof. Dr. FELIPE DE MORAES RUSSO

ARAXÁ
2016

A475i Alvim, Eduardo Saldanha
Influência da hidrogeologia na estabilidade de talude em solo / Eduardo Saldanha Alvim. - Minas Gerais, 2016.
49 f.
Orientador: Felipe de Moraes Russo.
Trabalho de conclusão de curso (graduação)-
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de minas e construção civil, 2016.

1. Estabilidade de Talude. 2. Engenharia de Minas. 3. Hidrogeologia. 4. Geotecnia. I. Russo, Felipe de Moraes, orient. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

EDUARDO SALDANHA ALVIM

INFLUÊNCIA DA HIDROGEOLOGIA NA ESTABILIDADE DE TALUDE EM SOLO

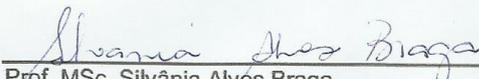
Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Centro de Educação tecnológica de Minas
Gerais, Unidade Araxá, como requisito
parcial para obtenção do título de Engenheiro
de Minas.

Data de aprovação: 02/08/2016

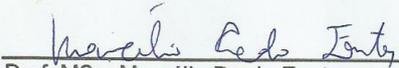
Banca Examinadora:



Prof. Dr Felipe de Moraes Russo – CEFET/ARAXÁ
Presidente da Banca Examinadora - Orientador



Prof. MSc. Silvânia Alyes Braga
Examinador – CEFET/ARAXÁ



Prof. MSc. Marcelo Prado Fontes
Examinador – CEFET/ARAXÁ

Para meus pais e minha irmã, que nós possamos lutar sempre juntos as batalhas de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a minha família, que sempre esteve ao meu lado e que me ensinou acima de tudo, a ser uma pessoa com os melhores princípios. Em especial a minha mãe, ao meu pai, a minha irmã. As minhas madrinhas Lenir e Adriane, aos meus padrinhos João Batista, Donisete e Vinícius. Aos demais tios, tios, tias e primos. Em especial tio Edson, Mauri e Regina.

Aos meus amigos de CEFET e aos amigos de Divinópolis a quem sempre carreguei no coração.

Ao professor Domingos Sávio de Resende e CAPES pela oportunidade de realizar meu projeto de iniciação científica.

Finalmente ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo e ao Prof. Dr. Mauricio Antonio Carneiro que foram fundamentais nesse projeto, e aos demais professores que colaboraram diretamente e indiretamente na realização deste trabalho, na minha formação acadêmica e na minha formação moral.

A todos eu sou eternamente grato...

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.” Charles Chaplin.

RESUMO

Apresenta-se nesse trabalho simulações por computador de estabilidade de um talude hipotético de 100 metros, utilizando o método de Bishop, realizando quatro variações no nível de água no talude. Os níveis de água escolhidos para as simulações foram de 80, 50, 30 metros e, por fim, realizou-se a simulação para a ausência de água no talude. Para cada simulação verificou-se o fator de segurança do talude inicial adotado e criou-se um talude ideal com fator de segurança de 1,3. Observou-se que o talude inicial adotado, com água no nível de 80 metros, apresentou menor fator de segurança de 0,784, e o talude ideal encontrado para este caso, apresentou maior retenção de minério. Verificou-se ainda que o talude na ausência de água apresentou a maior liberação de minério e maior fator de segurança de 1,28. Posteriormente realizou-se os cálculos de variação da área dos taludes e dos volumes para uma mina real de 1km de diâmetro, comparando a melhor e a pior hipótese dos taludes ideais. Sendo que essa liberação foi 12.573.704,69 m³ de minério em relação à variação de volume da mina.

Palavras chaves – Estabilidade de talude; nível de água; Bishop; fator de segurança.

ABSTRACT

This work presents a computer simulations stability model from hypothetical slope of 100 meters using Bishop method, performing four changes in water level in the slope. Since the water levels chosen for the simulations were 80, 50, 30 meters, and finally held for simulating absence of water in slope. Each simulation was performed using a necessary degree slope to guarantee safety factor of 1.3. The initial slope adopted, with water level of 80 meters, presents less of 0.784 safety factor, and the ideal slope found for this case has higher ore retention. It was further found that the slope in the absence of water showed the greatest release of ore and greater safety factor of 1.28. Later held the variation calculations the area of slopes and volumes for a real mine 1km in diameter, comparing the best and the worst of the ideal slope. Since this release was 12,573,704.69 cubic meters of ore in relation to the mine volume change.

Key words - Slope stability; Water level; Bishop; Safety factor.

ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Geometria de mina a céu aberto segundo Wetherelt & Wielen (2011). ...4	4
Figura 2.2 – Representação do talude de acordo com Kliche (2011).....5	5
Figura 2.3 – Representação do talude segundo Vásquez <i>et al.</i> (1998).....6	6
Figura 2.4 – Modos de ruptura do talude segundo Wyllie & Mah (2004).....9	9
Figura 2.5 – Demonstração gráfica do método de análise de fatias..... 10	10
Figura 2.6 - Demonstração gráfica do método de Bishop. 11	11
Figura 2.7 – Interface gráfica do programa Slide da Rocscience..... 14	14
Figura 3.1 – Representação gráfica do talude inicial estudado. 16	16
Figura 4.1 – Análise do fator de segurança do talude individual de argila. 18	18
Figura 4.2 – Análise do fator de segurança do talude individual de titânio seco. 19	19
Figura 4.3 – Análise do fator de segurança do talude individual de titânio saturado. 19	19
Figura 4.4 – Análise do fator de segurança do talude individual de fosfato. 20	20
Figura 4.5 – Análise da estabilidade com nível de água de 80 metros. 21	21
Figura 4.6 – Talude ideal com nível de água de 80 metros..... 22	22
Figura 4.7 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado..... 23	23
Figura 4.8 – Análise da estabilidade com nível de água de 50 metros. 24	24
Figura 4.9 – Talude ideal com nível de água de 80 metros..... 25	25
Figura 4.10 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado..... 25	25
Figura 4.11 – Análise da estabilidade com nível de água de 30 metros. 26	26
Figura 4.12 – Talude ideal com nível de água de 30 metros..... 27	27
Figura 4.13 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado..... 28	28
Figura 4.14 – Análise da estabilidade na ausência de água no talude..... 29	29
Figura 4.15 – Talude ideal na ausência de água..... 29	29
Figura 4.16 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado..... 31	31
Figura 4.17 – Comparação entre os taludes ideais na ausência de água (a) e água no nível de 80 metros (b). 31	31
Figura 4.18 – Variação do volume de minério e estéril. 33	33

TABELAS

Tabela 2.1 - Utilização de modelos matemáticos	8
Tabela 3.1 - Propriedades do solo utilizadas de acordo com. Reis (2010).	15
Tabela 3.2 - Comprimento e ângulo dos taludes em cada simulação.	16
Tabela 4.1 - Validação dos parâmetros de construção do talude.....	20
Tabela 4.2 - Parâmetros geométricos do talude com água no nível 80.	22
Tabela 4.3 – Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, água nível 80 metros.	23
Tabela 4.4 - Parâmetros geométricos do talude com água no nível 50.	25
Tabela 4.5 - Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, água nível 50 metros.	25
Tabela 4.6 - Parâmetros geométricos do talude com água no nível 30.	27
Tabela 4.7 - Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, água nível 30 metros.	27
Tabela 4.8 - Parâmetros geométricos na ausência de água no talude.	30
Tabela 4.9 - Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, na ausência de água.	30
Tabela 4.10 - Comparação entre taludes ideais.....	32
Tabela 4.11 - Volumes presente nos taludes ideais encontrados.	32
Tabela 4.12 - Comparação dos volumes dos taludes e liberação.	33

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

FS – Fator de segurança

NA – Nível de água.

SÍMBOLOS

σ_s – Pressão normal atuante ao longo da superfície de ruptura;

c – Coesão do material;

C_I – Força de resistência;

F_r – Força de resistência ao cisalhamento;

H_n – componente de força horizontal;

P – peso;

R_n – reações das fatias vizinhas;

S – força cisalhante;

U – força neutra;

V_n – componente de força vertical;

M – pressão neutra;

Φ – ângulo de atrito interno.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
	1.1 <i>Apresentação</i>	<i>1</i>
	1.2 <i>Justificativa.....</i>	<i>1</i>
	1.3 <i>Objetivos</i>	<i>3</i>
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
	2. 1. <i>Modos de rupturas</i>	<i>8</i>
	2. 2. <i>Métodos de análises de rupturas</i>	<i>9</i>
	2. 2. 1. <i>Método sueco ou de fatias.....</i>	<i>9</i>
	2. 2. 2. <i>Método de Bishop.....</i>	<i>10</i>
	2. 2. 3. <i>Morgenstern-Price</i>	<i>13</i>
	2. 3. <i>Programa Slide.....</i>	<i>13</i>
3.	METODOLOGIA	15
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	18
	4.1 <i>Validação de dados.....</i>	<i>18</i>
	4.2 <i>Análise da influência da água na estabilidade do talude.....</i>	<i>21</i>
	4.2 <i>Cálculo da variação da área do talude</i>	<i>31</i>
	4.3 <i>Calculo para uma mina</i>	<i>32</i>
5.	CONCLUSÃO	34
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1.INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Este é o Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas do CEFET/ARAXA do aluno Eduardo Saldanha sob a orientação do Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo, desenvolvido no Departamento de Minas e Construção Civil, no âmbito das disciplinas TTC I e II, ministrada pelo Prof. Dr. Maurício Antônio Carneiro. O assunto estudado foi a influência da hidrogeologia na estabilidade de talude em solo no planejamento de uma mina a céu aberto.

Esse trabalho compreende a realização de simulações de análise de estabilidade de talude que visam demonstrar a variação do fator de segurança e o volume de minério que pode ser liberado em uma mina hipotética, em decorrência da mudança do nível de água e da modificação da geometria do talude.

Como se sabe, no planejamento de uma mina a céu aberto, existem vários parâmetros que precisam ser estudados para que o empreendimento obedeça a sua principal finalidade, o lucro. Alguns desses parâmetros exercem maior influência nas estratégias de gestão do projeto e podem definir o limite da cava, a quantidade de material movimentado, a segurança, etc.

A geometria do talude é um desses fatores, conforme a geologia permita, seu aprimoramento possibilita um acesso maior a reserva mineral. O que faz com que o empreendimento seja mais rentável. Esse aprimoramento se dá por meio da análise de estabilidade de talude. Isso permite que o talude tenha a melhor configuração possível com a segurança necessária.

1.2 Justificativa

A mineração é uma das atividades mais antigas da humanidade e vem evoluindo desde seus métodos de prospecção até o beneficiamento mineral. E o

desenvolvimento da engenharia de minas e da geotecnia, nas últimas décadas, permitiu que a mineração pudesse alcançar altos patamares de exploração. Essa evolução se fez necessária e beneficia tanto a fatores ambientais quanto a fatores econômicos.

Uma das grandes conquistas do desenvolvimento dessas áreas foram os estudos hidrogeológicos e geotécnicos, que possibilitaram que lugares antes restritos por fatores hidrológicos sejam, atualmente, objetos de exploração mineral. O que permite o alargamento e aprofundamento da cava, resultando em um melhor aproveitamento da jazida mineral. Favorecendo assim ao meio ambiente, enquanto pode-se ter uma maior lucratividade sem que seja necessário abrir uma nova mina.

Esses estudos hidrogeológicos, em projetos de cava de minas a céu aberto, podem influenciar no aprimoramento da geometria ideal do talude e no sequenciamento de lavra. Sendo que a mudança na configuração do talude impactará diretamente na relação estéril/mineiro, o que pode significar o melhor aproveitamento da jazida, maior lucratividade e produtividade, sem que haja prejuízos à segurança.

Junto a isso, os estudos geotécnicos verificam as influências dos efeitos que a água tem sobre a estabilidade do talude, demonstrando que a saturação exerce uma força que tenderá a desestabilizá-lo. Agindo fortemente sobre a coesão do solo, atuando como lubrificante das suas partículas, e principalmente reduzindo a tensão efetiva entre as partículas, o que por sua vez prejudica significativamente a segurança das operações.

A fim de maximizar o aproveitamento de jazidas, e ainda garantir a estabilidade do talude, deve-se buscar soluções integradas entre a geotecnia e hidrogeologia que influenciaram diretamente no planejamento de mina. Por meio do estudo hidrogeológico e geotécnico, pode-se fazer análises de ruptura e estabilidade do talude e verificar os efeitos da sua modificação, mantendo-se condições de segurança. A partir dessas análises é possível determinar o ângulo de talude ideal e fazer um comparativo entre algumas situações.

As análises de rupturas são realizadas a fim de verificar as características do talude e garantir a estabilidade do maciço, para isso têm-se disponíveis métodos de análises baseados em métodos de equilíbrio limite, que auxiliam na elaboração do projeto da cava. Alguns desses métodos são: Fellenius (1936), Bishop (1955) e Morgenstern-Price (1965).

Esses métodos são elaborações matemáticas que levam em consideração forças e fatores (por exemplo: estruturas de suporte e água), que tendem a estabilizar e desestabilizar o talude, resultando em um coeficiente, chamado fator de segurança (FS), que determina o grau de segurança para uma condição específica.

Baseados nos métodos de análise de ruptura mencionados anteriormente foram criados programas de computador, que além de verificar o fator de segurança, ainda determinam a superfície crítica de ruptura, que se trata da superfície preferencial onde o talude tende a se romper.

Portanto, utilizando os programas computacionais, pode-se obter uma geometria aprimorada do talude conforme as condições de cada litologia permitam e com a segurança adequada. Fazendo assim que haja o máximo aproveitamento da jazida, favorecendo a rentabilidade do projeto e ao meio ambiente.

1.3 Objetivos

Considerando o que foi dito no item anterior, objetiva-se neste trabalho verificar a influência da variação do nível de água na escolha do ângulo ideal de talude em um corte hipotético, sem a modificação do fator de segurança global adotado.

E ainda, verificar o percentual de alteração da área e do volume de extração no corte, caso haja variação do ângulo do talude.

Assim, torna-se possível fazer uma comparação quantitativa do impacto da má gestão da hidrogeologia na operação de uma mina real.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mineração a céu aberto pode ser definida como o processo de escavação de qualquer depósito de minério perto da superfície, por meio de uma escavação ou corte, usando uma ou mais bancadas horizontais para extrair o minério, enquanto a deposição de estéril e rejeitos é feito em um local dedicado à sua eliminação, fora do limite de cava final (Wetherelt & Wielen 2011).

Na mineração em superfície, um importante aspecto do projeto implantado é a geometria da cava. Sua relevância se estende desde aspectos econômicos do empreendimento até as questões relacionadas à segurança. Uma das variáveis que influenciam diretamente na geometria da cava é o ângulo geral de talude. Na figura 2.1 podemos observar a geometria simplificada do talude de uma mina a céu aberto e sua terminologia comumente adotada.

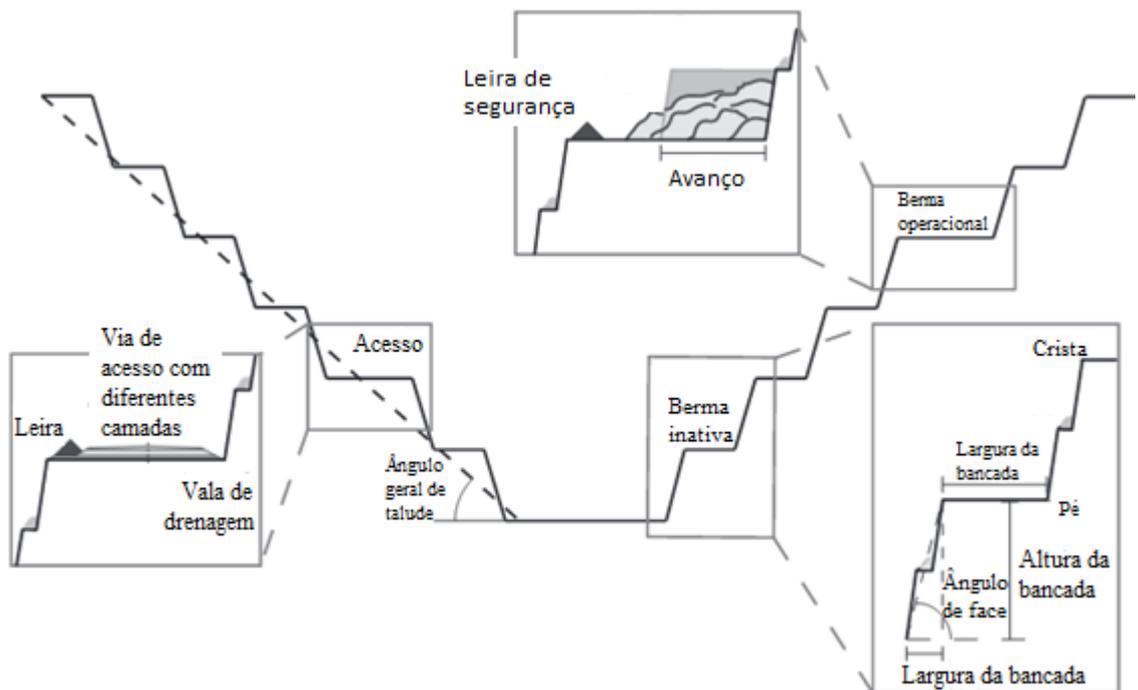


Figura 2.1 – Geometria de mina a céu aberto segundo Wetherelt & Wielen (2011).

O talude em corte, que é observado simplificado na figura 2.2, é um termo genérico compreendendo qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos. Pode ser natural, caso das encostas ou vertentes, ou artificial quando construído pelo homem, caso dos cortes e aterros (Fiori & Carmignani 2009). Sendo que para Wyllie & Mah (2004) os componentes principais de um projeto de encosta foram definidos como sendo: (1) o ângulo de inclinação geral do pé da escavação para a crista, que incorpora todas as rampas e bancadas; (2) o ângulo interrampa, que é o declive, ou pistas, que se encontra entre cada rampa ou segmento de rampa que depende do número de rampas e as suas larguras; e (3) o ângulo da face das bancadas individuais, o que depende do espaçamento vertical entre as bancadas, bem como a largura de qualquer berma nela incluído.

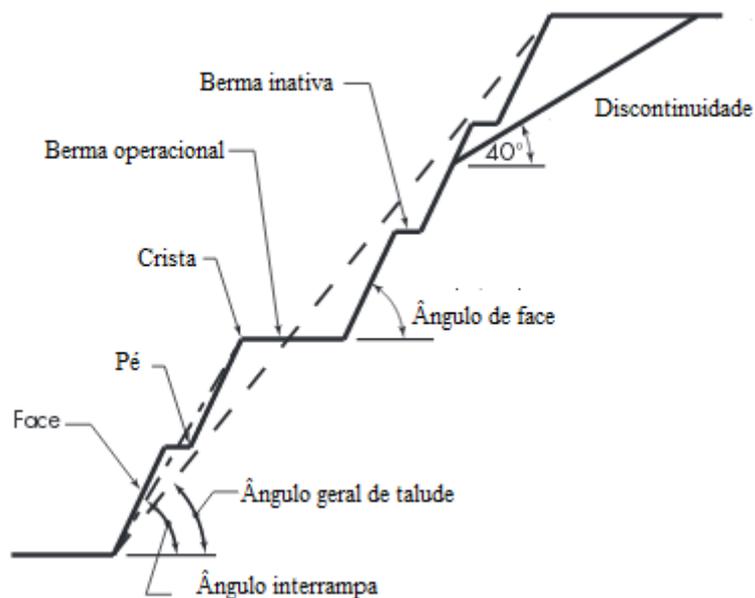


Figura 2.2 – Representação do talude de acordo com Kliche (2011).

Vásquez *et al.* (1998) salienta que, como o ângulo de inclinação restringe nossa operação, a sua pequena variação irá gerar dois efeitos diretos:

- Alterações na estabilidade da inclinação e da exploração.
- Alterações nos benefícios econômicos da exploração.

Ainda para Vásquez *et al.* (1998), ao aumentar o ângulo de inclinação é reduzida a quantidade de estéril para extração de uma mesma quantidade de minério, e até mesmo acessar outras reservas minerais que não era possível antes da remoção de estéril, como pode ser observado na figura 2.3. Isso gera um aumento nos lucros. No entanto, este aumento será apenas até o ângulo de inclinação aceitáveis pelas condições geomecânica do solo.

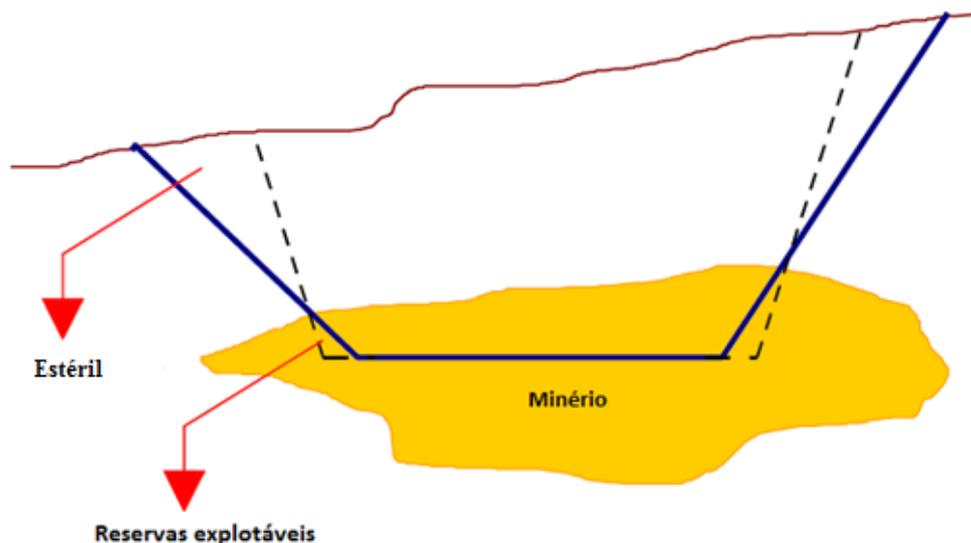


Figura 2.3 – Representação do talude segundo Vásquez *et al.* (1998).

Vásquez *et al.* (1998) ainda diz que os efeitos da mudança de inclinação no ângulo, são claramente refletidos na relação estéril/minério, e pode significar a inviabilidade do projeto, assim a informação relacionada com o ângulo de inclinação deve ser tão confiável quanto possível. Lembrando ainda que não há necessidade que seja um único ângulo de inclinação, mas este depende das rochas, estruturas, orientações, etc. Assim, pode haver mais de um ângulo ideal de inclinação em diferentes setores da mina.

Para Fiori & Carmignani (2009), do ponto de vista teórico, a estabilidade do talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças distintas: forças devido ao peso dos materiais, forças devido ao escoamento da água e forças devido à resistência ao cisalhamento. O estudo de estabilidade dos taludes

deve, necessariamente, levar em conta o equilíbrio entre forças, uma vez que as duas primeiras se somam e tendem a movimentar a massa de solo encosta abaixo, enquanto a última atua como um freio a essa movimentação. Além do mais é importante compreender exatamente o mecanismo de atuação de cada força, a fim de projetar corretamente as medidas preventivas ao escorregamento.

Como já foi dito anteriormente, as forças devido ao escoamento da água tendem a desestabilizar o solo causando deslizamentos e rupturas. Esse fato deve-se ao empuxo que segundo o princípio de Arquimedes, quando um corpo está parcialmente ou completamente imerso em um fluido, o fluido exerce sobre o corpo uma força de baixo para cima igual ao peso do volume do fluido deslocado pelo corpo. A desestabilização do talude pela água também está relacionada à diminuição do coeficiente de atrito entre as partículas do solo, diminuindo assim, sua resistência.

Além disso Fiori & Carmignani (2009) diz que em virtude do atrito viscoso que aparece no escoamento da água através de um meio poroso, haverá transferência de energia da água para esse meio, que é igual à perda de carga entre os pontos de entrada e de saída da água. Essa perda de carga é denominada de “força de percolação” e se desenvolve nos solos onde existe fluxo de água.

Já para Kliche (2011), do ponto de vista da mecânica simples, a estabilidade de uma encosta é a relação entre a resistência do material para as tensões na inclinação tendendo a desestabilizá-lo. Se a tensão de desestabilização excede a resistência, a inclinação é instável, e o fator de segurança é menor que uma unidade. Por outro lado, se a força exceder a tensão desestabilizadora, a inclinação é estável, e o fator de segurança da inclinação é maior do que uma unidade. Esse índice, denominado fator de segurança, tem sido a base para a análise de estabilidade em engenharia por muitos anos. O fator de segurança para que a inclinação é uma função do risco envolvido, isto é, a condição do talude e a exposição.

Além das questões relacionadas à segurança, Bertachini & Almeida (2003) ressalta que grande parte dos depósitos minerais está situada abaixo da superfície piezométrica dos aquíferos. Dependendo das condições de armazenamento e circulação das águas subterrâneas do aquífero, a água pode vir a ser mais uma dificuldade para as operações de lavra.

Segundo a NBR 11.682 da ABNT (1991), os padrões de avaliação dos parâmetros de segurança para o projeto de taludes, devem atender, quando da utilização de modelos matemáticos, conforme o método usado, aos padrões da tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Utilização de modelos matemáticos

Grau de segurança necessário	Padrão: Fator de segurança mínimo
Alto	1,5
Médio	1,3
Baixo	1,1

A NBR 11.682, ainda diz que podem ser adotados valores de fator segurança diferentes ao da tabela 2.1, desde que sejam justificados. (ABNT, 1991).

2. 1. Modos de rupturas

Para Cruden & Vernes (1996) as rupturas de taludes são classificadas em cinco categorias principais (figura 2.4), são elas:

- Quedas – É o desprendimento de solo e/ou fragmentos de rocha que caem de um talude.
- Tombamentos – É o movimento de rotação a frente do solo e/ou de massas rochosas aproximadamente no eixo abaixo do centro de gravidade da rocha que está sendo deslocada.

- Escorregamento (ou deslizamento) – É o movimento descendente de uma massa de solo. Ocorre na superfície da ruptura.
- Expansões laterais (ou espalhamento) – É uma forma de deslizamento que ocorre por translação. Ocorre através do movimento súbito de uma fração de areia ou silte recoberta por argila retentora de água ou sobrecarregada por aterro.
- Escoamento – É o movimento, ladeira abaixo, da massa de solo, de forma similar a de fluidos viscosos.

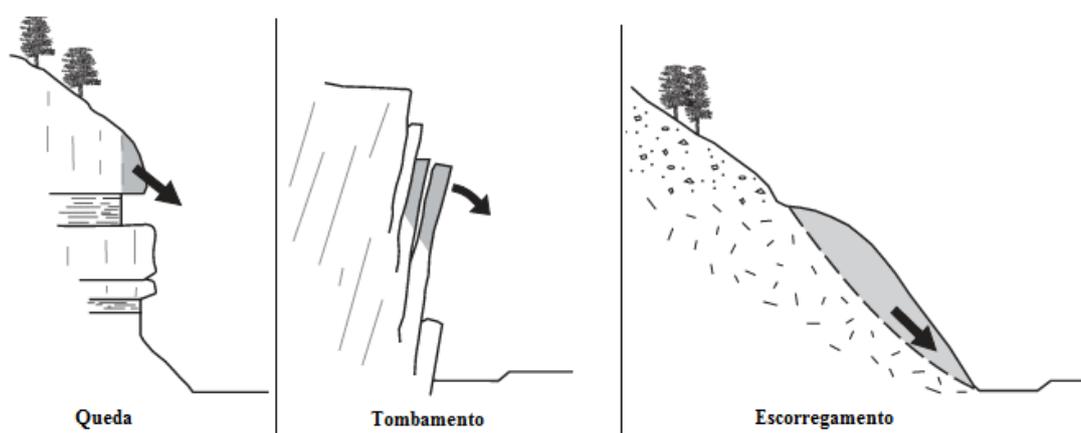


Figura 2.4 – Modos de ruptura do talude segundo Wyllie & Mah (2004).

2. 2. Métodos de análises de rupturas

Para análise de ruptura de taludes dispõe-se de vários métodos que foram sendo adaptados ao longo do tempo. Os mais conhecidos são:

2. 2. 1. Método sueco ou de fatias

Segundo Fiori & Carmignami (2009), esse método foi desenvolvido pelo engenheiro Fellenius (1936), e é conhecido como método sueco ou de fatias. Baseia-se na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície potencial de escorregamento de secção circular, e esse volume é dividido em fatias verticais. Conforme pode ser observado na figura 2.5.

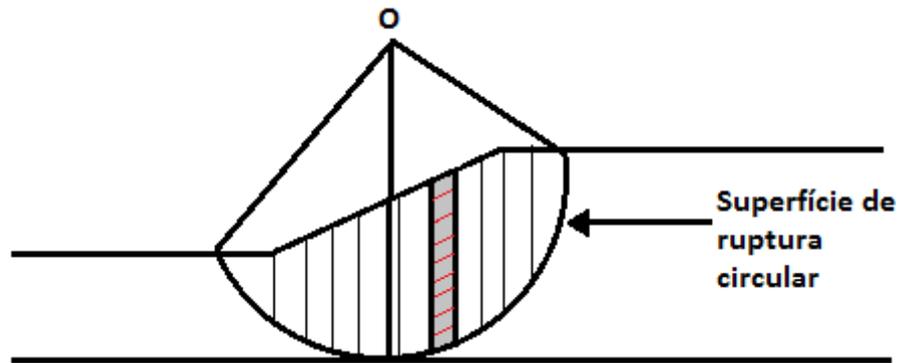


Figura 2.5 – Demonstração gráfica do método de análise de fatias.

2. 2. 2. Método de Bishop

Esse método foi proposto por Bishop (1955) segundo Fiori & Carmignami (2009) e considera a análise da estabilidade de um talude utilizando a divisão da cunha de escorregamento em diversas fatias. Na realidade, representa uma modificação do método de Fellenius, levando em conta as reações entre as fatias vizinhas. Para Rogério (1977), o Método de Fellenius (1936) leva a uma superestimativa do fator de segurança da ordem de 15% em reação ao de Bishop, fornecendo, assim, um valor conservador.

Para Fiori & Carmignami (2009), o método de Bishop (1955) a seguir, mostra que a resistência ao longo da superfície de escorregamento em presença de pressão neutra é igual a:

$$\tau = \frac{1}{F_s} [c + (\sigma_s - \mu) \tan \phi] R_{n-1}$$

Onde c é a coesão do material, ϕ é o ângulo de atrito interno σ_s é a pressão normal atuante ao longo da superfície de ruptura, μ é a pressão neutra e F_s é o fator de segurança.

Considere-se a fatia de ordem n e levemos em conta as reações R_{n-1} e R_{n+1} das fatias vizinhas. Suas componentes horizontais são designadas por H_{n-1} e H_{n+1} , e as verticais por V_{n-1} e V_{n+1} . Figura 2.6.

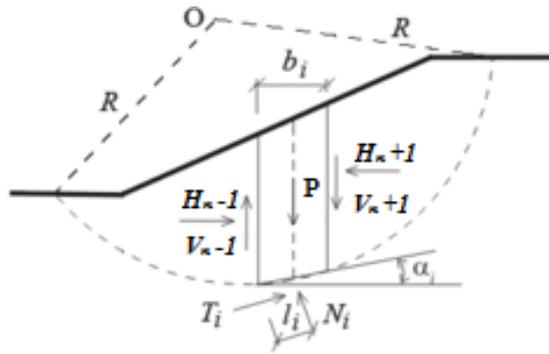


Figura 2.6 - Demonstração gráfica do método de Bishop.

Do polígono de forças indicado na figura obtém-se projetando as forças segundo a direção do peso P, para um solo sem coesão:

$$P_n + V_{n-1} - V_{n+1} = N \cos \alpha + \frac{(N - U) \tan \alpha}{F_s} \sin \alpha + \frac{c \Delta l}{F_s} \sin \alpha$$

Onde U é a força neutra. Como $N = P_e + U$, tem-se:

$$P_n + V_{n-1} - V_{n+1} = P_e \cos \alpha + U \cos \alpha + \frac{P_e \tan \alpha \sin \alpha}{F_s} \sin \alpha + \frac{c \Delta l}{F_s} \sin \alpha$$

Ou:

$$P_e \left(\cos \alpha + \frac{\tan \alpha \sin \alpha}{F_s} \right) = P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos \alpha - \frac{c \Delta l}{F_s} \sin \alpha$$

E, logo:

$$P_e = \frac{P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos \alpha - \frac{c \Delta l}{F_s} \sin \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \alpha \sin \alpha}{F_s}}$$

Ou ainda, substituindo-se o valor de P_e :

$$N - U = \frac{P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos \alpha - \frac{c \Delta l}{F_s} \sin \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \alpha \sin \alpha}{F_s}}$$

O fator de segurança (F_s) definido em função da força de resistência ao cisalhamento (F_r) e da força cisalhante (S) atuante ao longo do arco AB, por definição é dado por:

$$F_s = \frac{F_r}{S}$$

Donde: $S = \frac{F_r}{F_s}$

Por outro lado, a resistência ao cisalhamento (S), ao longo do arco AB é igual a (por Coulomb):

$F_s = cl + (N-U) \tan \phi$, onde cl é a força de resistência devido a coesão (c') do solo, e logo, substituindo-se acima:

$$S = \frac{c\Delta l}{F} + \frac{(N - U) \tan \phi}{F}$$

Considerando-se a igualdade dos momentos em relação ao centro O do círculo de raio R, tem-se:

$$\sum P_n x = \sum SR = \frac{R}{F} \sum [c\Delta l + (N - U) \tan \phi]$$

Como $x = R \text{ sen } \alpha$, tem-se:

$$F_s = \frac{\sum [c\Delta l + (N - U) \tan \phi]}{\sum P_n \text{ sen } \alpha}$$

Substituindo-se o valor de $(N-U)$ anteriormente obtido, tem-se:

$$F_s = \frac{1}{\sum P_n \text{ sen } \alpha} \sum c\Delta l + \left(\frac{P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos \alpha - c\Delta l \text{ sen } \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \alpha \text{ sen } \alpha}{F_s}} \right) \tan \phi$$

$$F_s = \frac{1}{\sum P_n \text{ sen } \alpha} \sum \left(\frac{P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \alpha \text{ sen } \alpha}{F_s}} \right) \tan \phi - \left(\frac{\frac{c\Delta l \text{ sen } \alpha \tan \phi}{F}}{\left(\cos \alpha + \frac{\tan \alpha \text{ sen } \alpha}{F_s} \right) \tan \phi} \right) \tan \phi$$

E, finalmente:

$$\text{Equação 1} \quad F_s = \frac{1}{\sum P_n \sin \alpha} \sum \frac{(P_n + V_{n-1} - V_{n+1} - U \cos \alpha) \tan \phi + c \Delta l \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{F_s} \tan \phi}$$

Na equação 1, a diferença $(V_{n-1} - V_{n+1})$ pode ser igualada a zero, pois segundo Bishop, o erro resultante dessa simplificação é da ordem de apenas 1%.

2. 2. 3. Morgenstern-Price

Segundo Freitas (2011), o método de Morgenstern-Price (1965) consiste num método de análise de estabilidade de taludes no qual todas as condições de equilíbrio e de fronteira são satisfeitas e a superfície de ruptura poderá tomar qualquer forma. É também uma aplicação do método das fatias, e exige cálculo computacional derivado do complexo processo iterativo.

2. 3. Programa Slide

Segundo a Rocscience (2016), o Slide é um programa de análise de estabilidade de taludes em encostas de solo ou rocha. O programa fornece um conjunto abrangente de recursos de análise, incluindo projetos de suporte, análise integrada elemento finitos de águas subterrâneas (infiltração) e análises probabilísticas.

A interface gráfica baseado em CAD oferece uma ampla gama de opções de modelagem e interpretação de dados que permite realizar análises rápidas, completas e precisas.

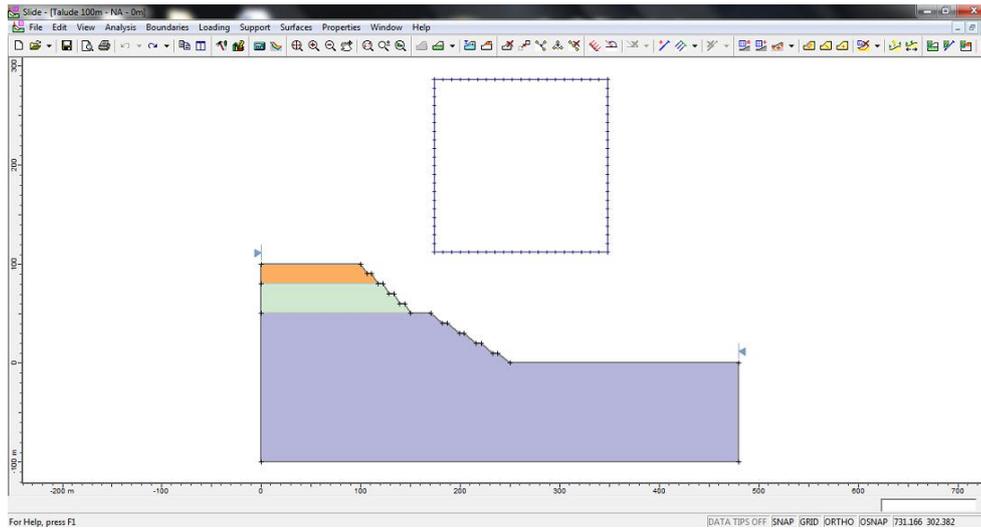


Figura 2.7 – Interface gráfica do programa Slide da Rocscience.

3.METODOLOGIA

Com intuito de verificar a influencia da água na estabilidade do talude definiu-se as propriedades geomecânicas dos solos e geométrica do talude, utilizando os parâmetros geométricos e as propriedades do solo encontrado por Reis (2010), em seu estudo das seções C; G; H e I; da mina de fosfato de Tapira, descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Propriedades do solo utilizadas de acordo com. Reis (2010).

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	Φ (°)	Altura da bancada(m)	Talude (V:H)	Talude (°)	FS
Argila vermelha	19	50	31	10	1 : 0,6	59	2,26
Titânio seco	20	50	30	10	1 : 0,6	59	2,15
Titânio saturado	21,1	30	33	10	1 : 1	45	1,31
Fosfato saturado	22	30	30	10	1 : 1,19	40	1,39

Posteriormente adotou-se o fator de segurança igual a 1,3, sendo que esta é a prática mais adotada atualmente, tendo-se constante monitoramento da cava.

Validou-se a metodologia com as propriedades e geometrias adotados, gerando uma bancada individual para cada litologia e comparando os fatores de segurança encontrado e o descrito por Reis (2010).

Em seguida criou-se um talude hipotético com duas bancadas de argila vermelha, 3 bancadas para o titânio e 5 bancadas de fosfato, sendo cada uma com 10 metros de espessura, totalizando-se assim 100 metros de talude, conforme a figura 3.1. e a tabela 3.2.

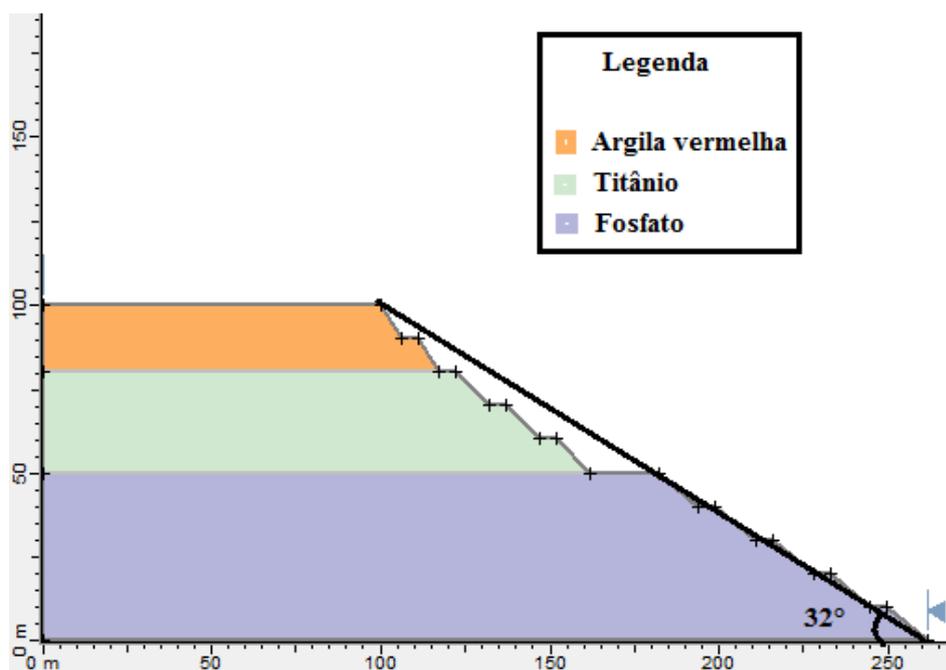


Figura 3.1 – Representação gráfica do talude inicial estudado.

Tabela 3.2 - Comprimento e ângulo dos taludes em cada simulação.

Simulação	Comprimento (m)	Ângulo (°)
Água nível de 80 metros	161,5	32
Água nível de 50 metros	149,60	33,76
Água nível de 30 metros		
Ausência de água		

Com o propósito de verificar a influência da água na estabilidade do talude adotado, fez-se a simulação utilizando o método de Bishop, no programa Slide, para quatro hipóteses de níveis de freática.

Sendo a primeira com o nível de água a 80 metros, coincidindo com a transição entre a argila e o titânio. No segundo caso, para o nível de água a 50 metros, coincidindo com a interface entre titânio e fosfato. Para a terceira situação, utilizou-se o nível a 30 metros. E como última simulação, verificou-se a estabilidade do talude na hipótese de rebaixamento completo do lençol freático, ou seja, na

ausência completa de água no talude. Define-se ainda, que argila vermelha e titânio são considerados como estéril e o fosfato como o minério de interesse.

Verificou-se o fator de segurança com a geometria inicial adotada e posteriormente adequou-se os taludes que apresentaram fator de segurança diferente ao adotado e finalmente verificou-se qual seria o ângulo geral de talude para o fator de segurança pré-estabelecido.

E por fim, comparou-se o maior ângulo de talude ideal encontrado nas simulações, com o de menor ângulo. E assim, foram realizados cálculos de variações da área dos taludes e a porcentagem dessa variação tanto para o minério quanto para o estéril.

4.RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação de dados

A fim de validar os parâmetros encontrados por Reis (2010), criou-se para cada componente do talude, uma análise no software Slide, utilizando o mesmo método de análise de estabilidade de talude. Assim foi possível verificar quaisquer desvios e erros entre as duas análises.

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, demonstram as análises realizadas em cada material. Sendo argila, titânio seco, titânio saturado e fosfato, mostrados respectivamente.

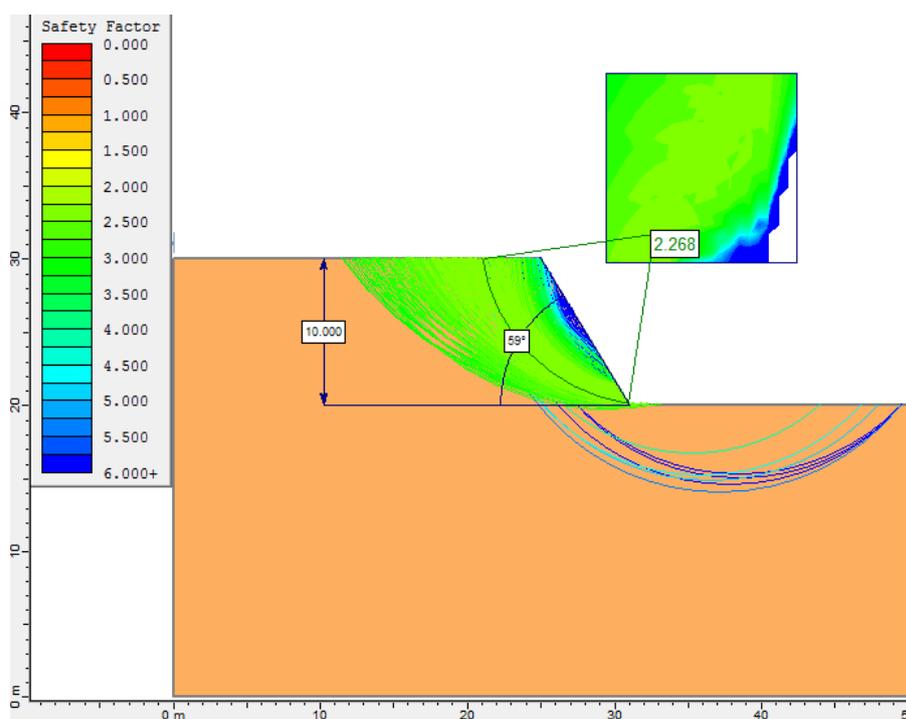


Figura 4.1 – Análise do fator de segurança do talude individual de argila.

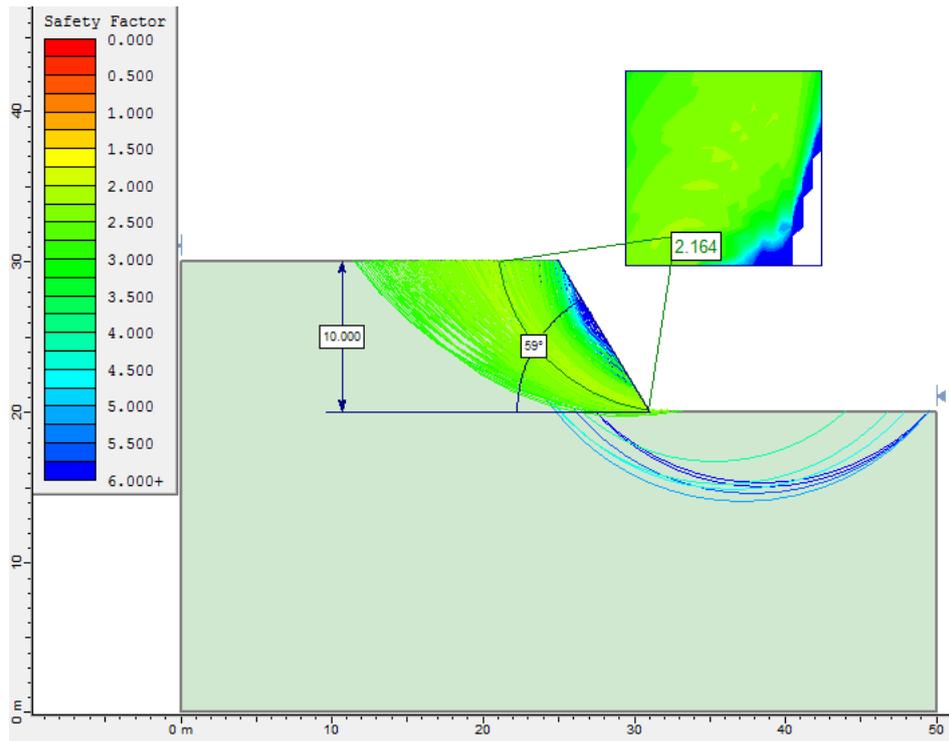


Figura 4.2 – Análise do fator de segurança do talude individual de titânio seco.

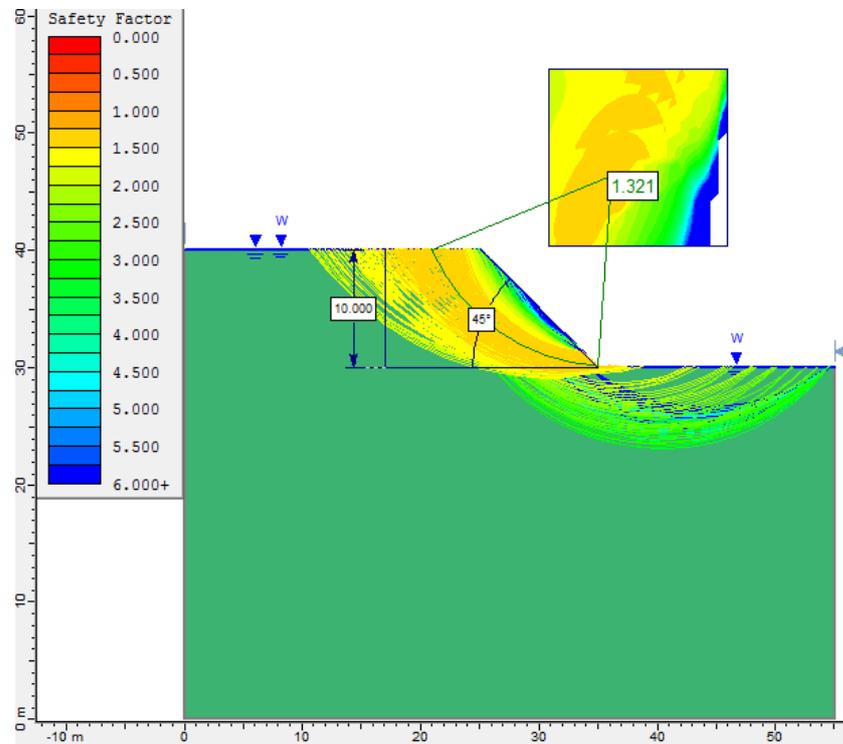


Figura 4.3 – Análise do fator de segurança do talude individual de titânio saturado.

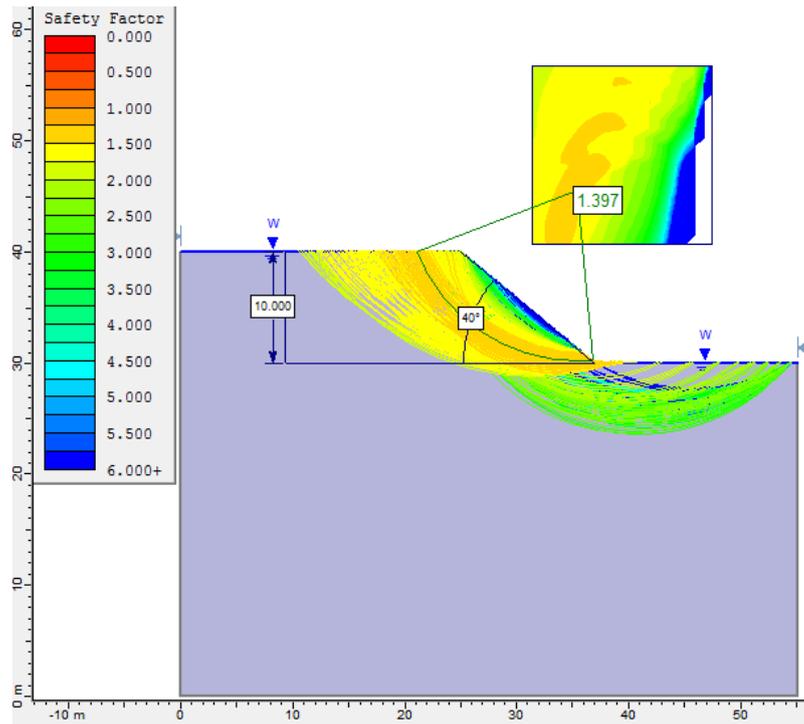


Figura 4.4 – Análise do fator de segurança do talude individual de fosfato.

Nas figuras 4.3 e 4.4, deve-se notar que o nível de água está acima do talude devido à saturação presente neste solo.

A partir das análises realizadas, observa-se que os valores encontrados, para ambas as análises, são semelhantes e estão de acordo com os mencionados por Reis (2010), conforme mostra a tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Validação dos parâmetros de construção do talude.

Material	FS (Reis, 2010)	FS (validação)
Argila vermelha	2,26	2,268
Titânio seco	2,15	2,164
Titânio saturado	1,31	1,321
Fosfato saturado	1,39	1,397

4.2 Análise da influência da água na estabilidade do talude

Primeira simulação: Água no nível de 80 metros.

Utilizando o talude adotado realizou-se o modelamento com a água no nível de 80 metros, pode-se observar para essa hipótese um fator de segurança de 0,784, como mostrado na figura 4.5, o que é insatisfatório devido às condições de segurança estabelecidas. Esse valor indica que as forças a favor do movimento de massa são maiores que as forças a favor da estabilidade do maciço.

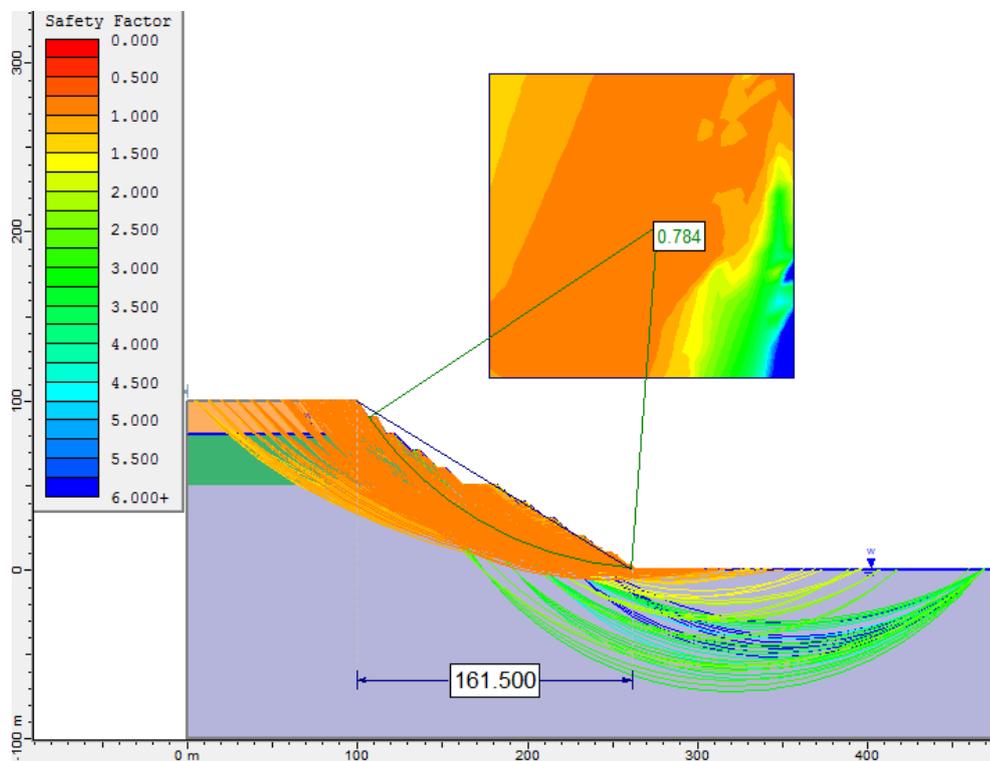


Figura 4.5 – Análise da estabilidade com nível de água de 80 metros.

Com o intuito de que o talude fique estável com as propriedades utilizadas, é necessário que esse apresente configuração semelhante ao da figura 4.6. Com o ângulo geral de talude de 20 graus e fator de segurança de 1,311. Assim, a geometria ideal do talude tem inclinação menor que a adotada inicialmente.

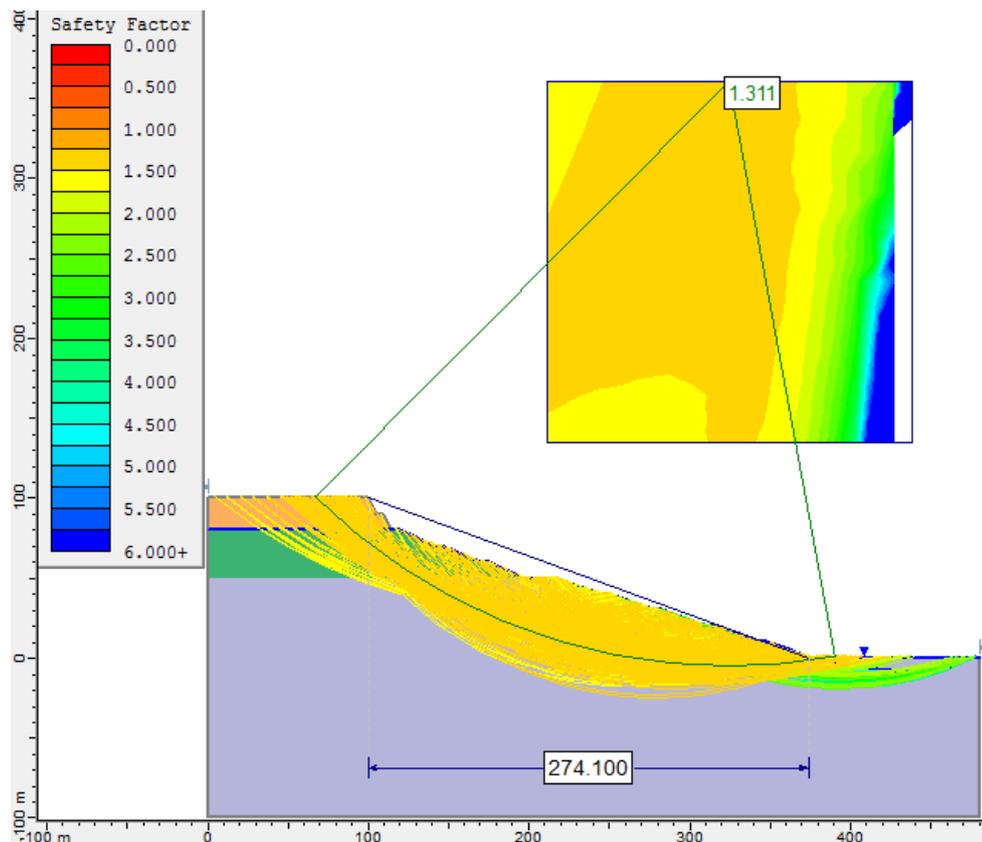


Figura 4.6 – Talude ideal com nível de água de 80 metros.

As tabelas 4.2 e 4.3 demonstram os parâmetros geométricos utilizados para gerar o talude ideal para esta situação.

Tabela 4.2 - Parâmetros geométricos do talude com água no nível 80.

Material	Altura dos bancos (m)	Ângulo individual inicial(°)	Ângulo individual final(°)
Argila vermelha	10	59	65
Titânio saturado	10	45	25
Fosfato saturado	10	40	20

A figura 4.7 ilustra a comparação entre o talude inicial utilizado e o talude ideal encontrado com fator de segurança de 1.311.

Tabela 4.3 – Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, água nível 80 metros.

Parâmetros	Talude inicial	Talude final
Ângulo (°)	32	20
Comprimento (m)	161,5	274,1

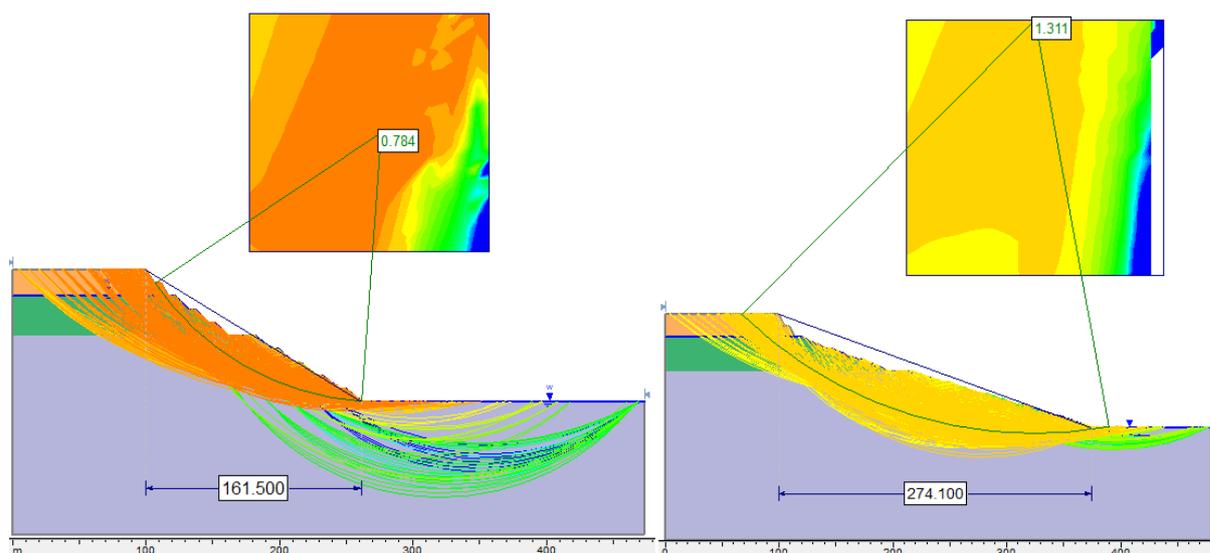


Figura 4.7 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado.

Segunda simulação: Água no nível de 50 metros.

Observa-se que houve uma variação do ângulo geral do talude inicial adotado, isso ocorre devido à utilização das propriedades do titânio seco a partir da segunda simulação devido ao rebaixamento do nível.

Considerando que haja um rebaixamento no nível de água para o nível de 50 metros, verifica-se a partir da figura 4.8, um pequeno aumento do fator de segurança em relação à simulação anterior. Sendo esse valor igual a 0,820. Deve-se observar ainda, que a superfície crítica de ruptura modificou sua circunferência para a região onde há a presença de água.

Assim, para que haja estabilização do talude, foi necessário diminuir seu ângulo, passando este a ser igual a 23 graus e fator de segurança de 1,300, conforme a figura 4.9 demonstra.

As tabelas 5.4 e 5.5 mostram os parâmetros geométricos do talude da nova configuração para esta simulação.

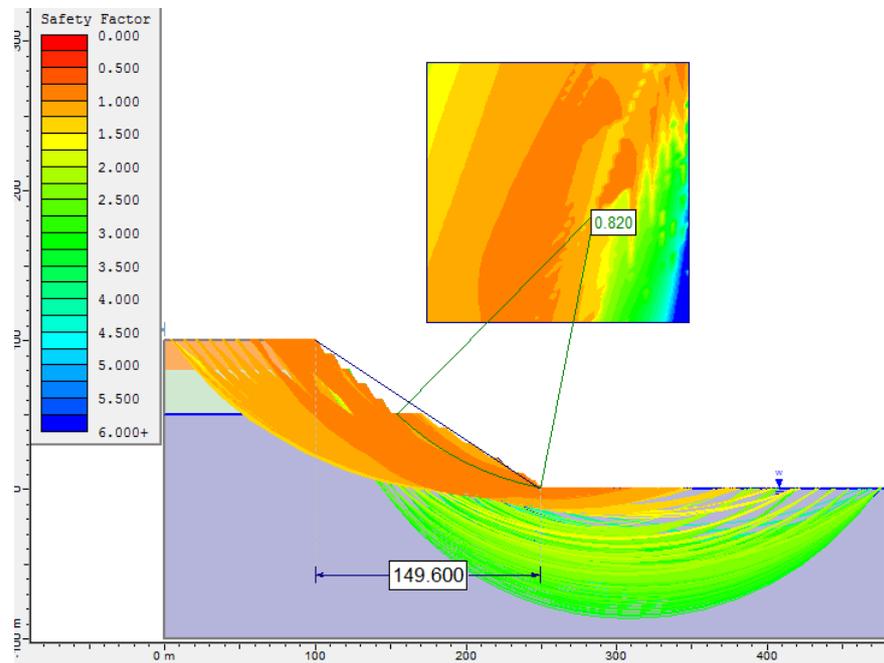


Figura 4.8 – Análise da estabilidade com nível de água de 50 metros.

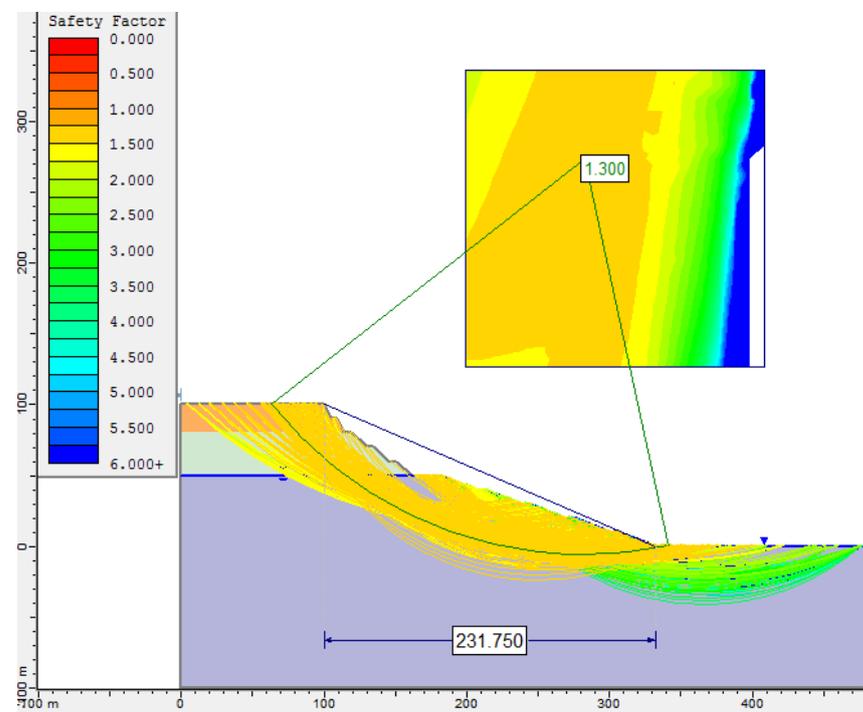


Figura 4.9 – Talude ideal com nível de água de 80 metros.

A partir da figura 4.10 observa-se a diminuição do ângulo de talude ideal em relação ao adotado.

Tabela 4.4 - Parâmetros geométricos do talude com água no nível 50.

Material	Altura dos bancos (m)	Ângulo individual inicial(°)	Ângulo individual final(°)
Argila vermelha	10	59	65
Titânio seco	10	59	43
Fosfato saturado	10	40	21

Tabela 4.5 - Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, água nível 50 metros.

Parâmetros	Talude inicial	Talude final
Ângulo (°)	33,76	23
Comprimento (m)	149,6	231,75

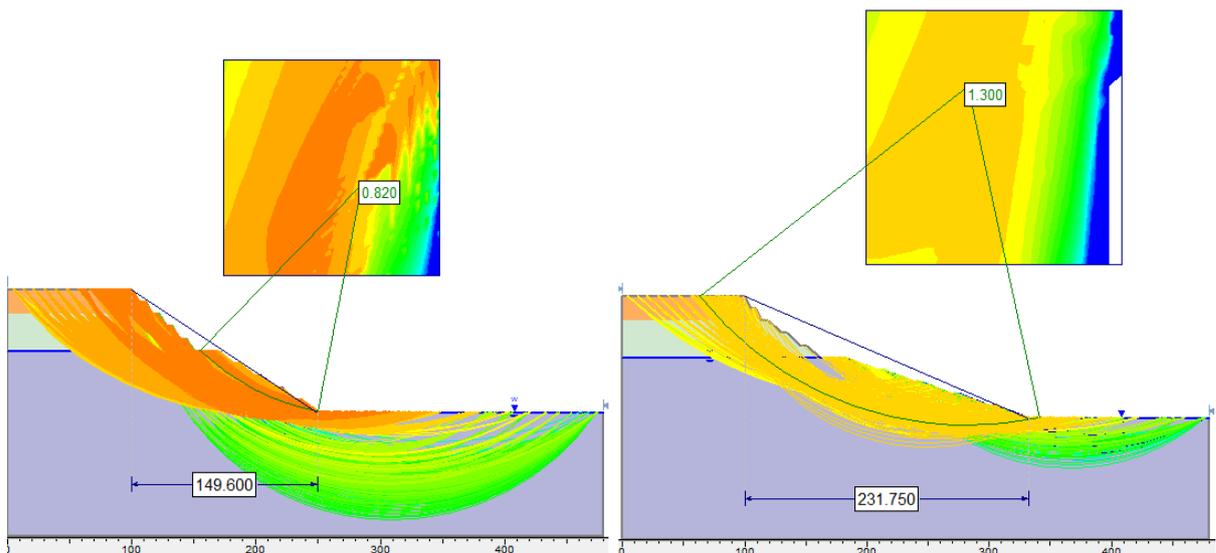


Figura 4.10 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado.

Terceira simulação: Água no nível de 30 metros.

Modificando o nível freático para 30 metros, a partir da figura 4.11 verifica-se que houve uma mudança mais significativa no fator de segurança em relação às simulações anteriores. Passando este a ser de 1,063, o que indica que o talude está quase na iminência de ruptura. Ainda observa-se que também houve a mudança na superfície crítica de ruptura, como no caso anterior, para a região de ocorrência de água.

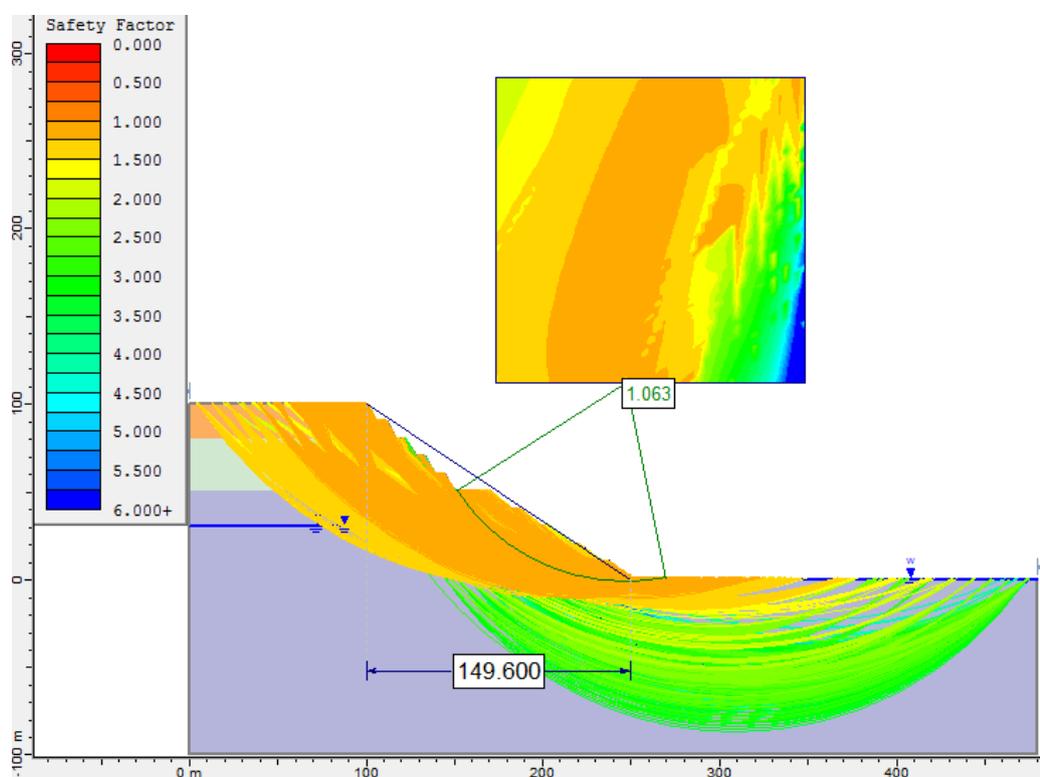


Figura 4.11 – Análise da estabilidade com nível de água de 30 metros.

Conforme necessário definiu-se a nova geometria do talude. A figura 4.12 exhibe a nova configuração ideal para este caso, e a tabela 4.6 e 4.7, os parâmetros geométricos da nova configuração adotada.

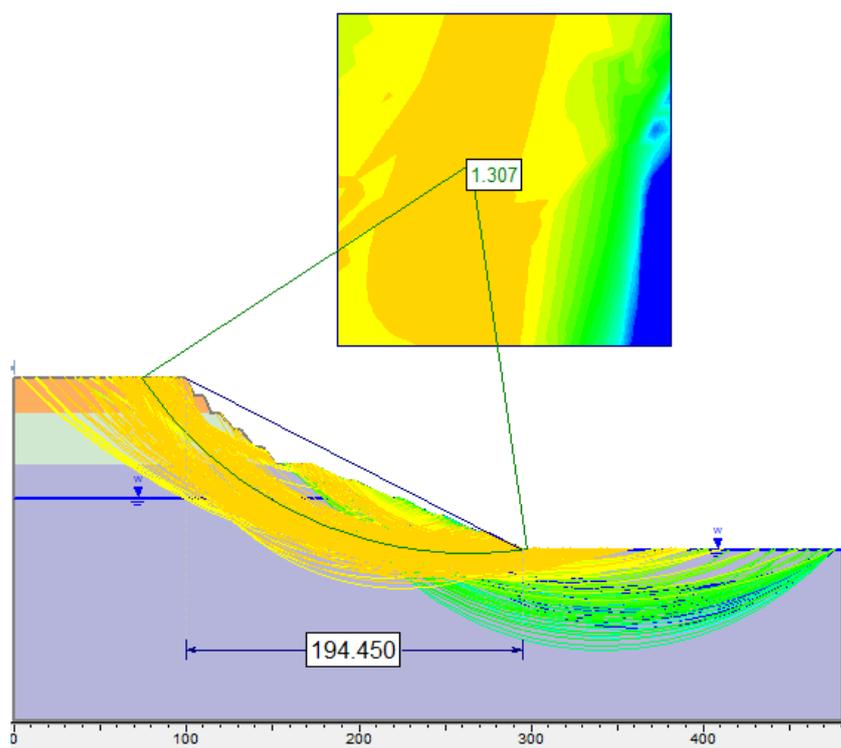


Figura 4.12 – Talude ideal com nível de água de 30 metros.

Tabela 4.6 - Parâmetros geométricos do talude com água no nível 30.

Material	Altura dos bancos (m)	Ângulo individual inicial(°)	Ângulo individual final(°)
Argila vermelha	10	59	65
Titânio seco	10	59	53
Fosfato saturado	10	40	26

Tabela 4.7 - Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, água nível 30 metros.

Parâmetros	Talude inicial	Talude final
Ângulo (°)	32	27
Comprimento (m)	149,60	194,45

Observa-se através da figura 4.13 a comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal encontrado com fator de segurança de 1.307.

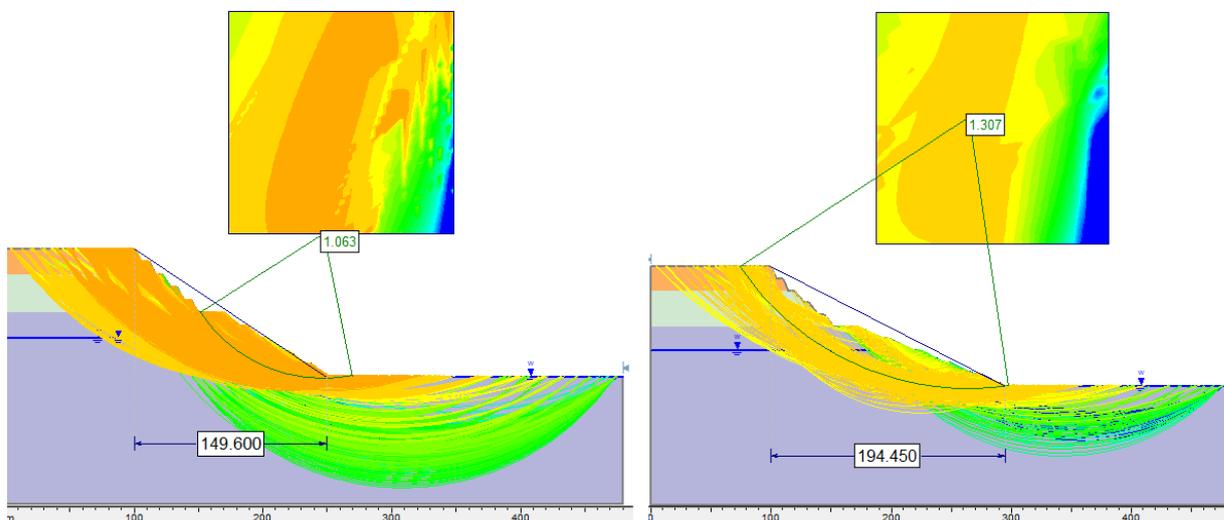


Figura 4.13 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado.

Quarta simulação: Ausência de água no talude

Por fim, para o total rebaixamento do nível de água no talude, observa-se na figura 4.14 que o maciço possui coeficiente de 1,28, sendo assim está estável, mas não possui o fator de segurança adotado, assim é necessária sua adequação.

Deve-se ressaltar, que os parâmetros utilizados para o fosfato na confecção desse talude, devido à inexistência dos valores para o fosfato seco nos estudos utilizados como referência, ainda que possuam as características do fosfato saturado, o que não invalida os resultados.

Isso se deve porque, ao utilizar os valores para o fosfato saturado tem-se um decréscimo nos coeficientes utilizados, comparando-se ao fosfato seco. Assim a segurança não estaria comprometida e sim, favorecida.

Com base nessas ideias, pode-se criar um novo talude, adequando o fator de segurança. A figura 4.15 demonstra o talude ideal na ausência completa de água, sendo que para este caso o fato de segurança é igual a 1,306, o que está adequado.

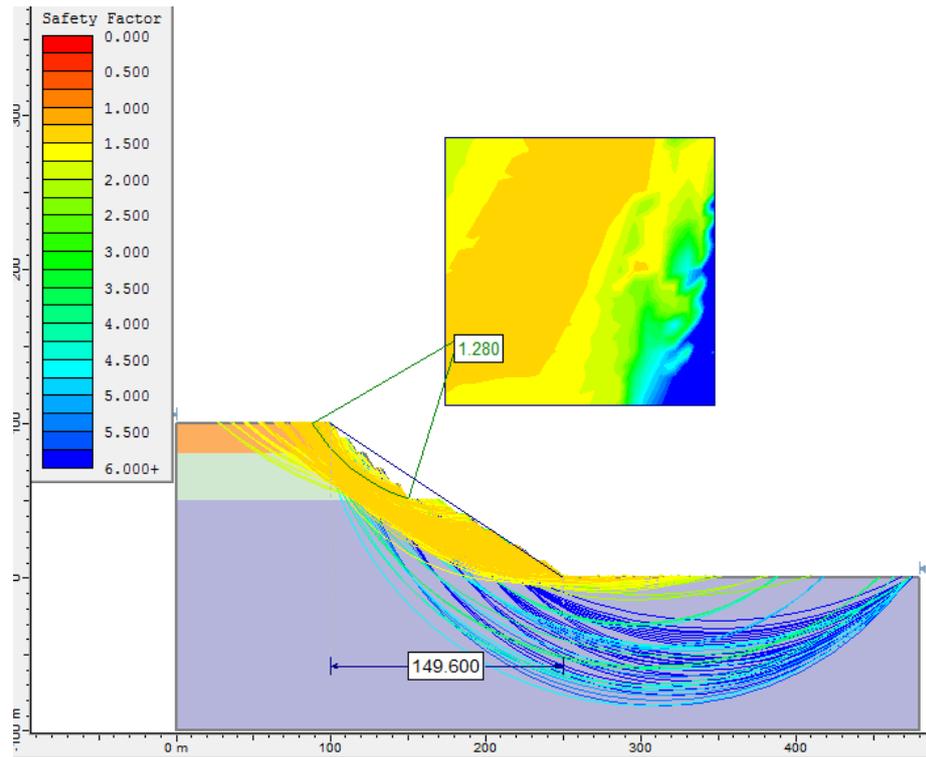


Figura 4.14 – Análise da estabilidade na ausência de água no talude.

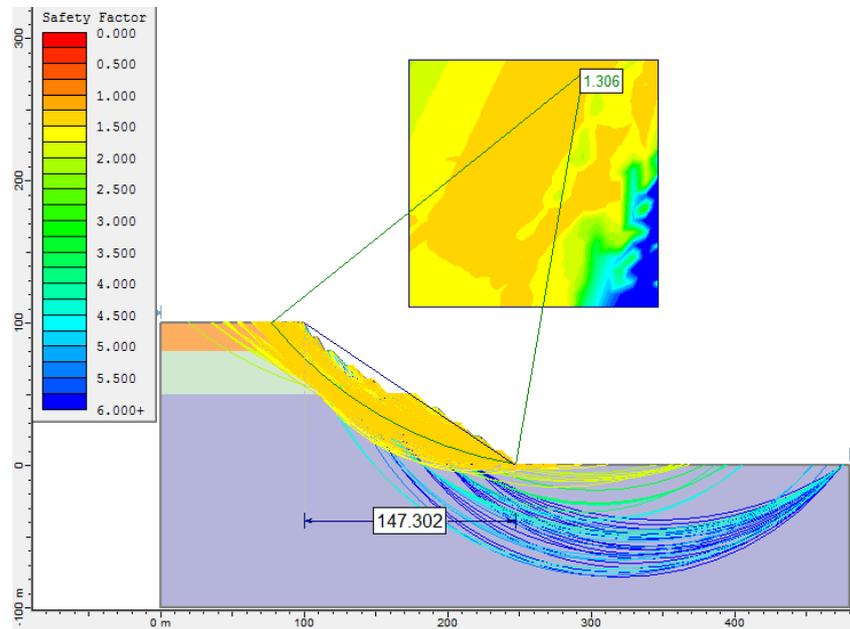


Figura 4.15 – Talude ideal na ausência de água.

Pela tabela 4.8 observa-se que o ângulo do fosfato saturado apresentou um acréscimo na sua inclinação como esperado. E embora haja um decréscimo no ângulo do titânio seco, houve um aumento no ângulo dos bancos da argila vermelha.

Deve-se ater que os ângulos individuais das bancadas de titânio tiveram uma diminuição, enquanto os ângulos para os demais materiais tiveram acréscimo, isso ocorre em taludes de grandes dimensões, onde o ângulo de atrito do material tem grande influência.

Tabela 4.8 - Parâmetros geométricos na ausência de água no talude.

Material	Altura dos bancos (m)	Ângulo inicial (°)	Ângulo final (°)
Argila vermelha	10	59	65
Titânio seco	10	59	47
Fosfato saturado	10	40	45

Verifica-se pela tabela 4.9 que houve uma diminuição no comprimento do talude e acréscimo na inclinação do talude em 0,24 graus, que favorece a retirada de minério da cava.

Tabela 4.9 - Comparação entre o talude inicial adotado e o talude ideal, na ausência de água.

Parâmetros	Talude inicial	Talude final
Ângulo (°)	33,76	34
Comprimento (m)	149,60	147,30

Através da figura 4.16, verifica-se a comparação entre o talude ideal encontrado e o talude inicial.

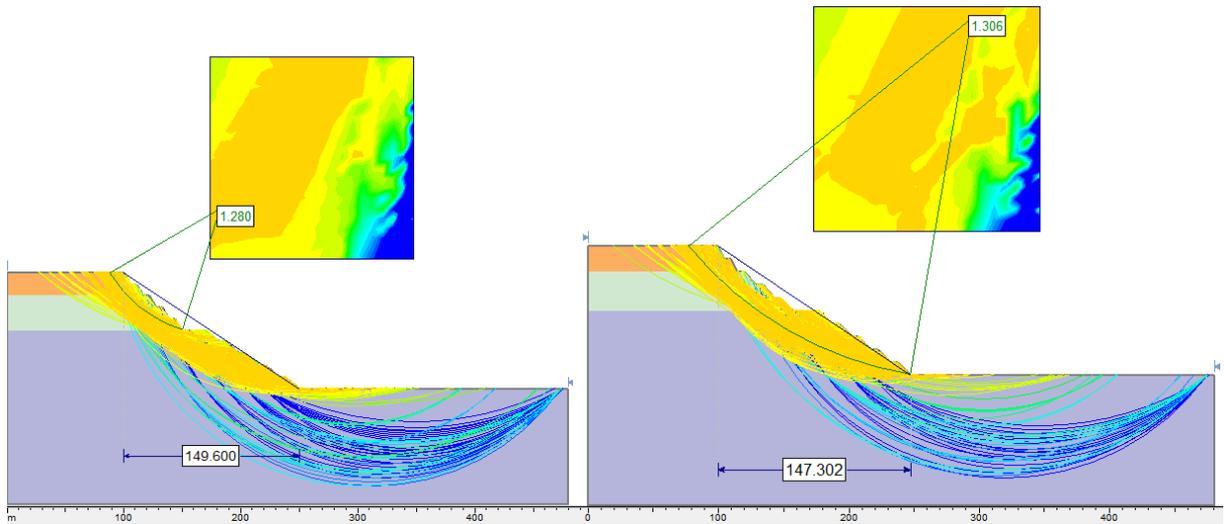


Figura 4.16 – Comparação entre o talude inicial adotado e ideal encontrado.

4.2 Cálculo da variação da área do talude

Utilizando a geometria do talude ideal com maior inclinação entre os casos estudados, encontrado na ausência de água no talude, e a geometria com a menor inclinação obtida no talude ideal com água no nível 80, foi possível realizar os cálculos de variação da área do talude. E ainda os cálculos para a retirada de estéril e minério. Os dois taludes foram comparados, como mostra a figura 4.17.

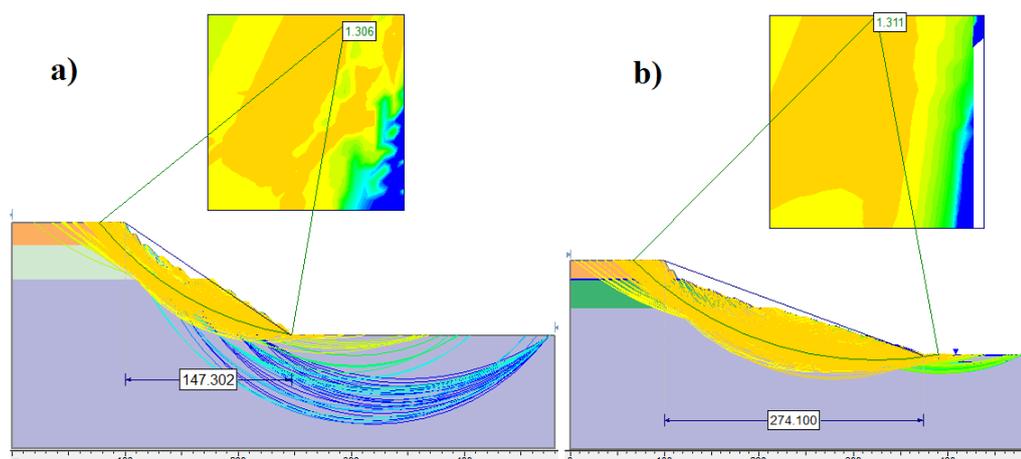


Figura 4.17 – Comparação entre os taludes ideais na ausência de água (a) e água no nível de 80 metros (b).

A tabela 4.10 ilustra o resultado dos cálculos, e verifica-se que houve mudança significativa nas áreas dos taludes comparados.

Tabela 4.10 - Comparação entre taludes ideais.

Taludes	Sem água (A)	Água nível 80 metros (B)	Varição (A-B)	Varição (%)
Área total (m ²)	6.907,76	11.455,50	4.547,74	39,70
Estéril (m ²)	1.292,68	1.838,07	545,39	29,67
Minério (m ²)	5.615,08	9.617,41	4.002,33	41,61

4.3 Calculo para uma mina

Utilizando os dados obtidos para cada talude ideais encontrados criou-se uma mina de 1 km de diâmetro com propriedades reais e realizaram-se os cálculos de volume para cada situação. A tabela 4.11 e figura 4.18 demonstram os valores de minério presentes nos taludes ideias para as quatro simulações realizadas.

Tabela 4.11 - Volumes presente nos taludes ideais encontrados.

	Nível da água	Minério (m ³)	Esteril (m ³)
Primeira simulação	Nível 80 metros	30.213.999,59	5.774.480,507
Segunda simulação	Nível 50 metros	24.602.509,57	4.258.780,827
Terceira simulação	Nível 30 metros	20.921.494,42	3.808.067,221
Quarta simulação	Ausência de água	17.640.294,9	4.061.067,425

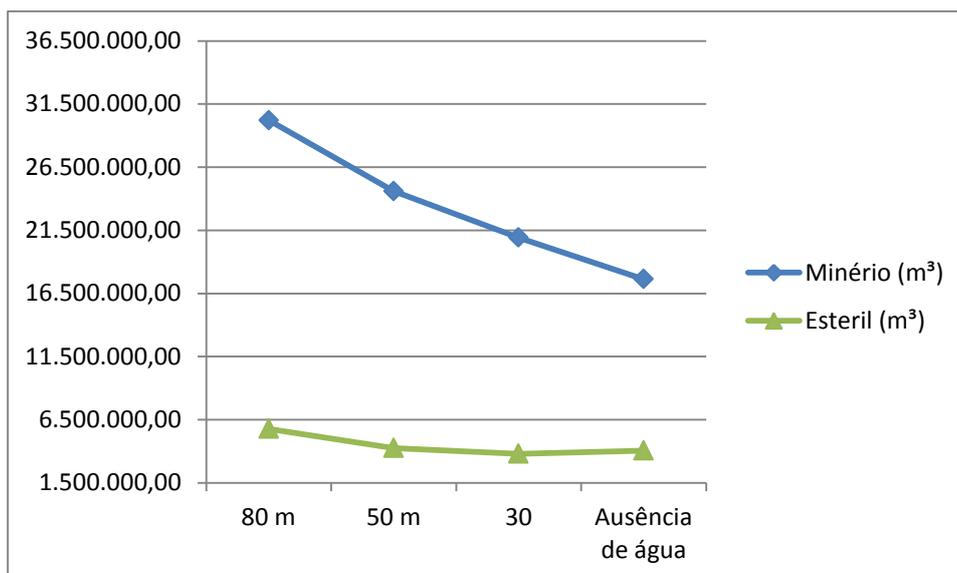


Figura 4.18 – Variação do volume de minério e estéril.

Pode-se observar que embora exista uma pequena diminuição do volume de estéril no corte, houve uma diminuição significativa do volume de minério contido no talude remanescente, o que demonstra evidência uma alta liberação de minério para uma pequena porção de estéril.

Assim, criou-se a tabela 4.12 comparando novamente a primeira e a quarta simulação, onde foi encontrado a menor e a maior inclinação, respectivamente. A partir dessa tabela é possível visualizar os valores em volume nos taludes e as variações apresentadas.

Tabela 4.12 - Comparação dos volumes dos taludes e liberação.

Taludes	Sem água (A)	Água nível 80 metros (B)	Liberação (B-A)	Variação (%)
Volume total (m³)	21.701.362,33	35.988.480,1	14.287.117,77	39,70
Estéril (m³)	4.061.067,425	5.774.480,507	1.713.413,08	29,67
Minério (m³)	17.640.294,9	30.213.999,59	12.573.704,69	41,61

5.CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar com base em dados reais o impacto gerado pela má gestão da hidrogeologia nos parâmetros geotécnicos de uma cava. Ao decorrer do estudo evidenciou-se que à medida que a hidrogeologia de rebaixamento é ineficiente, os ângulos por consequência se suavizam, gerando grandes volumes de minério retido no talude.

Sendo assim, fica evidente neste estudo a importância da hidrogeologia e da geotecnia no planejamento da cava e em sua segurança. Se uma dessas áreas falhar pode-se colocar em risco a segurança dos que operam o sistema ou o retorno econômico do empreendimento.

Verifica-se que uma vez que não se aplique ângulos de talude condizentes com o nível de água interno, a segurança fica fragilizada. No entanto, a parte econômica fica prejudicada caso se tenha o monitoramento do NA interno, mas não se tenha uma capacidade de rebaixamento adequada para atender a demanda hidrogeológica operacional do sistema.

Por este motivo conclui-se que para que se tenha uma cava efetivamente econômica e segura é de primordial importância à conciliação das áreas de geotecnia, hidrogeologia e planejamento. Caso contrário, a chance de insucesso no aprimoramento da segurança e da economia operacional é considerável.

6.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1991. NBR 11682: *Estabilidade de taludes*. Rio de Janeiro. 39p.
- Bertachini A. C. & Almeida D. C. D. 2003. O rebaixamento do nível d'agua em mineração e obras civis. *In: 13º Simpósio de hidrogeologia do sudeste, São Paulo. Revista Águas Subterrâneas, suplemento.*
- Das B. M. 2011. *Fundamentos de engenharia geotécnica*. São Paulo. Cengage. 600p.
- Fiori A. P & Carmignani L. Eds. 2009. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas - aplicações na estabilidade de talude*. Curitiba: UFPR. 584p.
- Freitas M. A. C. 2011. *Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de morgenstern-price e correia*. Dissertação de Mestrado, Departamento de engenharia civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 178p.
- Kliche C. A. 2011. Slope Stability. *In: Darling P. SME Mining Engineering Handbook*. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, p. 495-525.
- Reis R. C. 2010. *Estudo de Estabilidade de Taludes da Mina de Tapira*. Dissertação de Mestrado, Núcleo de geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto 145p.
- ROCSCIENCE (2016). "Slide." Disponível em: <https://www.rocscience.com/rocscience/products/slide>. Acesso em: 25/06/2016.
- Rogério R. P. 1977. *Cálculo da estabilidade de taludes de terra pelo método de Bishop simplificado*. São Paulo, Edgard Blucher. 153p.
- Vásquez A., Galdames, B., Le-Feaux R. 1998. *Apunte preliminar diseño y operaciones de minas a cielo abierto*. Santiago, Universidad de Chile. 184p.
- Wetherelt A. & Wielen, K. P. V. D. 2011. Introduction to Open-Pit Mining. *In: Darling P. SME Mining Engineering Handbook*. Littleton, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, p.857-876.
- Wyllie D. C. & Mah C. W. 2004. *Rock Slope Engineering*. New York, Spon Press. 431p.