

## **ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM ALTEADA PARA MONTANTE POR DOIS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE**

**Hemilly C. L. Fernandes**

**Rose C. R. Elias**

**Michel M. M. Fontes**

**Rafael R. Rodrigues**

*hemilly.fernandes@fonntesgeotecnica.com*

*rose.elias@fonntesgeotecnica.com*

*michel@fonntesgeotecnica.com*

*rafael.rodrigues@fonntesgeotecnica.com*

*Fonntes Geotécnica Ltda.*

*Avenida Otacílio Negrão de Lima, 2837, São Luiz. CEP: 31365-450, Belo Horizonte-MG, Brasil*

**Abstract.** The serious consequences of human life losses and environmental disasters make stability analysis of dams slopes play a key role in geotechnical engineering. Recently, we have witnessed events related to the ruptures that make the safety of dams gain more and more relevance and prominence. Already established methodologies such as Simplified Bishop are used for algebraic calculations of slope stabilities. However, they require a lot of calculation and effort when applied to very robust structures. The increasing availability of microcomputers brings important facilities in the systematic application of these slope stability methods, so that more general and comprehensive analyzes can now be performed. The commercial software Slope/W, from the GeoStudio package, and Slide, from Rocscience, are intended for slope stability analysis, simulating the parameters of drained and non-drained soil resistance of the structure along with water and piezometric lines, using the equilibrium limit, which has been widely employed for these stability analyzes due to the mathematical simplicity with which they are formulated and the accuracy obtained. Thus, reflecting on the importance of stability analysis of dams, this study aimed to evaluate the stability of a tailings dam, located in the iron quadrilateral (Minas Gerais), using both commercial software. The geotechnical parameters of the materials were determined through field tests. For the sections analyzed, the variation between the limiting equilibrium methods used and between the programs that evaluated them.

**Keywords:** Tailings dam, equilibrium limit, stability analysis.

## 1 Introdução

Nos últimos anos a população brasileira se deparou com acidentes catastróficos relacionados a barragens de rejeito de mineração, que acarretaram em perda de vidas humanas e desastres ambientais muitas vezes irreversíveis. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM) [1], grande parte dos acidentes estão relacionados a barragens construídas por meio do método de alteamento à montante, técnica muito utilizada entre as décadas de 70 e 90, devido ao baixo custo de implantação quando comparado a outras técnicas de alteamento.

As barragens construídas pelo método de alteamento a montante, além de estarem susceptíveis aos mecanismos de ruptura por piping e galgamento, possuem ainda potencial de ruptura vinculado ao fenômeno da liquefação [2].

Nas últimas décadas, a engenharia de barragens de terra tem se desenvolvido de forma considerável no que se refere a estudos relacionados à estabilidade de taludes. De maneira geral, os estudos buscam por modelos que possam incorporar uma série de hipóteses e possam prever o comportamento de uma estrutura de forma que as análises busquem estar o mais próximo das condições reais de campo.

Os métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade de um talude se resumem em métodos probabilísticos de análise quantitativa expressa em forma de probabilidade ou risco de ruptura de uma estrutura e por métodos determinísticos expressos por meio de fator de segurança (FS).

Segundo Rezende [3], dentre os métodos de análise de estabilidade de taludes, o método determinístico de equilíbrio limite se torna usual na engenharia geotécnica devido às considerações das variações dos parâmetros de resistência, atuando como complemento à avaliação por fator de segurança.

Por outro lado, as análises de dados pelo método determinístico, apesar de amplamente utilizadas no mercado, adotam valores médios que nem sempre são dados representativos devido às incertezas existentes principalmente nas condições de composição dos solos.

Tendo em vista a disponibilidade no mercado de diversos softwares e modelos que utilizam a teoria de equilíbrio limite para análise e definição de fatores de segurança, pelo método determinístico, este estudo busca realizar comparações entre os softwares SLOPE/W® e SLIDE®, sendo estes os programas computacionais mais comuns de utilização na área. Este estudo pretende avaliar e comparar os resultados das análises de estabilidade de uma seção considerada crítica de uma barragem alteada a montante localizada no quadrilátero ferrífero, no estado de Minas Gerais.

## 2 Referencial teórico

Lacerda *et al.* [4], realizaram estudos de estabilidade de barragens de terra comparando dados piezométricos de campo e pressões obtidas em modelagem numérica através do software SLOPE/W. As análises de estabilidade foram realizadas pelo método de equilíbrio limite que envolvem a definição de uma superfície de deslizamento por toda a massa do talude e a divisão desta massa em fatias verticais [5]. As análises foram realizadas pelos métodos de Bishop e Janbu, e verificou-se que, de forma geral, as pressões obtidas em modelo foram maiores que as registradas em campo, pois existe um fluxo transversal no campo, não considerado no modelo 2D, que faz com que as pressões diminuam. As análises de fluxo forneceram distribuições de carga de pressão compatíveis com os registros piezométricos considerando as condições adotadas (fluxo 2D, materiais homogêneos, fundação impermeável).

Della & Santos [6], também realizaram estudos de estabilidade de um Dique, juntamente com a avaliação de percolação de água no maciço, utilizando o software SLIDE 5.0 pelo método de Bishop simplificado. Constatou-se que a determinação do fator de segurança mínimo para a condição de rebaixamento rápido, para o caso de taludes construídos com materiais que possuem permeabilidade elevada ( $k \geq 1 \times 10^{-3}$  cm/s) não condiz com a realidade. Isso se deve ao fato de não se considerar nos parâmetros de entrada as características de permeabilidade dos materiais para análises de estabilidade.

Silva [7] realizou análises em solos de alteração de rochas metamórficas do quadrilátero ferrífero. Foram realizados ensaios triaxiais e cisalhamento direto de amostras indeformadas coletadas em campo a fim de obter os parâmetros de resistência para diferentes carregamentos. Tais parâmetros foram utilizados para análises de estabilidade empregando métodos determinísticos e probabilísticos através

dos softwares SLOPE/W e SLIDE. Observou-se proximidade entre os fatores encontrados entre os softwares para duas seções analisadas. Tal resultado pode estar associado ao fato da cunha de ruptura passar quase que exclusivamente por um único tipo de material, o quartzito. Foram realizadas análises determinísticas pelos métodos: Ordinário/Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado e Morgenstern Price. Percebeu-se durante as análises, que o Bishop Simplificado fornece valores de fator de segurança muito próximos a aqueles obtidos com o método de Morgenstern Price, que é de solução bem mais complexa e para quaisquer superfícies de ruptura. Em relação aos demais métodos analisados, os fatores de segurança obtidos pelos métodos de Fellenius e Janbu Simplificado deram resultados mais conservadores e próximos entre si para ambos os programas.

Reis [8] realizou estudo comparativo da aplicação de programas comerciais na modelação de barragens de aterro e para os softwares SLIDE e SLOPE/W utilizando o método de Bishop, quer para o pleno armazenamento, quer para a situação de esvaziamento rápido. Foram analisados os fatores de segurança críticos e respectivas superfícies de deslizamento ao longo das várias etapas do processo. Os programas SLOPE/W e SLIDE oferecem praticamente os mesmos métodos de análise, no entanto só foi aplicado o método de Bishop. Quanto à forma como são obtidas as superfícies de escorregamento, o programa SLIDE oferece mais opções; foi escolhida a opção de Grelha e Raios, pois esta constava como opção em ambos. É de referir que o programa SLIDE é mais amigo do utilizador no que toca à caracterização das propriedades mecânicas dos materiais. Quanto à análise de resultados propriamente dita, o programa SLOPE/W permite de uma forma mais simples obter os resultados desejados. No entanto ao nível de visualização de resultados o SLIDE, permite uma definição mais alargada da informação que se pretende exibir nas imagens.

### **3 Barragens de rejeito**

Passos [9] afirma que barragens de rejeito são estruturas de contenção que retêm lama e líquido e devem constituir uma estrutura estável, juntamente com sua fundação. Devem reter inteiramente o rejeito em seu reservatório e permitir o controle adequado de toda a água percolante, para com isso garantir requisitos de controle da poluição, segurança, economia e capacidade limite de armazenamento.

Essas estruturas de contenção de rejeitos são construídas ao longo do tempo visando a diluição dos custos no processo de extração mineral, através de alteamentos sucessivos. Assim, um dique de partida é construído inicialmente e a barragem passa por alteamentos ao longo de sua vida útil, podendo ser construídas com material compactado proveniente de áreas de empréstimo, ou com o próprio rejeito, através de três métodos: montante, jusante ou linha de centro.

Tanto sua construção quanto os posteriores alteamentos das barragens de rejeitos podem assumir diferentes configurações e características, onde cada método possui suas vantagens e desvantagens. Existem três diferentes configurações cujo nome refere-se à direção tomada pelos alteamentos em relação ao dique de partida.

#### **3.1 Alteamento à montante**

Este método consiste na construção de um dique de partida que servirá de ponto de partida para os próximos alteamentos. Após a construção do dique, o rejeito é lançado formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento. Entre os alteamentos é comum a execução de lastros em pedra de mão para sustentação e os aterros podem ser construídos com o próprio rejeito compactado. Este método é considerado o mais antigo, simples e econômico.

Embora este método seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras, ele apresenta baixo controle construtivo, no qual os alteamentos são realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de compactação fofa, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos [10].

Rezende [3] cita que esse método de alteamento apresenta, além do risco de ruptura por liquefação, rupturas por percolação e piping também são possíveis devido à pequena distância entre a lagoa de decantação e o talude de jusante. Tal problema pode ser minimizado implementando-se sistemas de

drenagem e filtros (por exemplo, tapetes drenantes) evitam aumentos excessivos de poropressões e controlam a percolação ao longo dos maciços.

Dentre as vantagens do método, pode-se citar o ganho de volume de material empregado nos aterros implicando no ganho de produtividade e facilidade de operação. Dentre as desvantagens, cita-se o baixo controle construtivo, superfície crítica de ruptura passando por rejeitos sedimentados e susceptibilidade à liquefação.

### **3.2 Alteamento à jusante**

Este método inicia-se também pela construção de um dique de partida, normalmente de solo ou enrocamento compactado. Depois de realizada esta etapa, os alteamentos subsequentes são realizados para jusante do dique de partida. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida [11].

De acordo com Araújo [10], as vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção, nenhuma parte ou alteamento da barragem é construída sobre o rejeito previamente depositado. Além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem, e prolongados durante seu alteamento, permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem, aumentando sua estabilidade; a barragem pode ser projetada e subsequentemente construída apresentando a resistência requerida, inclusive resistir a forças sísmicas.

### **3.3 Alteamento linha de centro**

O método de linha de centro é uma variação do método de jusante. A diferença, no entanto, está na verticalização do alteamento da crista. Neste caso, o processo executivo pode ocorrer de forma muito rápida, com a utilização do underflow, quando se faz necessária a ciclonagem do rejeito [12].

Como grande vantagem deste método em relação ao de jusante, pode-se destacar a necessidade de um menor volume de material compactado para construção do corpo da barragem. Em contrapartida esse tipo de estrutura pode apresentar ângulos muito inclinados na face de montante. Se a parte superior do talude perde eventualmente o confinamento, podem aparecer fissuras, causando problemas de erosão, e aumentos de poropressão [10]. Para dissipar de forma controlada tais acréscimos de poropressão, é importante que a barragem possua eficiente sistema de drenagem para este tipo de alteamento.

## **4 Análises de estabilidade de taludes**

As barragens de rejeito possuem taludes compostos dos materiais estéreis provenientes da extração do minério, do solo, ou dos rejeitos gerados. A definição dos parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade desses, juntamente com o comportamento da pluviometria e possível ocorrência de sismicidade ou sobrecargas no corpo da barragem, definem as principais condicionantes que refletem na segurança dessas estruturas de tal forma que estas condições devem ser representadas em estudos de estabilidade.

Há uma infinidade de autores com diferentes classificações para os movimentos de massa de terra. Estas classificações levam em consideração algumas características como, por exemplo, o material, a profundidade da ruptura, as velocidades e direção do movimento, profundidade de raio de alcance, superfície de ruptura, estado de tensões e potencial destrutivo [13].

O risco de uma possível ruptura é quantificado por um fator de segurança. Segundo Gerscovich [14], FS é o fator pelo qual os parâmetros de resistência podem ser reduzidos de tal forma a tornar o talude em estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície.

## **5 Métodos de cálculo**

Rezende [3] descreve que métodos probabilísticos são aqueles que permitem a avaliação da distribuição de probabilidade de uma variável dependente em função do conhecimento das distribuições

estatísticas das variáveis independentes que geram a dependente. A análise determinística expressa uma análise quantitativa através de um fator de segurança.

Silva [15] diz que a probabilística é uma complementação da análise determinística, onde é possível obter uma distribuição probabilística dos valores, fornecendo, por exemplo, a probabilidade de ruptura de taludes com FS menores ou maiores que 1,0.

A análise determinística de estabilidade de taludes é composta por dois grandes grupos, sendo os métodos baseados em análise de deslocamentos (tensão x deformação), representado principalmente pelo método dos elementos finitos e os métodos que se baseiam no estado de equilíbrio limite, que são métodos mais tradicionais e difundidos devido à facilidade de aplicação e a larga experiência acumulada [16].

Segundo Dyminski [17], o estudo de estabilidade por este método requer dados para compilação das informações, como perfil geotécnico (geometria do problema, incluindo estratigrafia), processo de formação do solo e determinação e modelagem das características de tensão – deformação.

O método do equilíbrio limite consiste na determinação do equilíbrio de uma massa de solo, com uma geometria qualquer, embora as mais comumente analisadas sejam a poligonal e a circular. Por este método a ruptura ocorre ao longo de uma superfície previamente definida por tentativas. Assume-se que em caso de colapso, todos os elementos ao longo dessa superfície atingirão a ruptura, simultaneamente, afirma Rezende [3]. A partir dos valores das forças atuantes, a resistência ao cisalhamento necessária para o equilíbrio é calculada, obtendo-se então a margem de segurança do talude.

O método do equilíbrio limite é o mais usual, devido à sua simplicidade e larga aceitação na engenharia. A análise do método se baseia na relação entre as forças resistentes e as forças atuantes de um dado material. Ele é considerado determinístico pois a partir de um conjunto de dados, obtém-se uma média, para então, a partir deste valor se obter um fator de segurança adequado para aquela estabilidade.

Neste método as hipóteses simplificadoras são realizadas para solucionar o problema, gerando diversidade de valores do fator de segurança para uma mesma situação, dependendo então, da simplificação utilizada.

Assim, a abordagem tradicional no equilíbrio limite consiste em analisar as condições em que ocorreriam rupturas e aplicar um FS adequado para evitar que este fenômeno ocorra. Para utilizar este método, considera-se que o material tenha um modelo constitutivo rígido perfeitamente plástico, ou seja, o material suporta qualquer estado de tensões abaixo do estado de ruptura sem deformar-se.

De acordo com Silva [15] o método de Bishop foi desenvolvido inicialmente para análise de superfícies circulares, mas a sua aplicação também é válida para superfícies não circulares. Segundo Zhu [18], o fato de as forças de corte entre fatias não aparecerem na equação do fator de segurança não quer dizer que sejam zero, mas sim que um dos termos dessa equação seja zero. Tal fato acontece se se assumir uma distribuição adequada das forças de corte verticais entre fatias que satisfaça, ao mesmo tempo, o equilíbrio de forças horizontais. Daí a sua precisão quando comparado com outros métodos. A reação normal na base é obtida através do equilíbrio de forças segundo a direção vertical.

No método de Bishop são considerados os esforços laterais sobre as fatias (Figura 1). No método despreza-se a ação da resultante dos esforços verticais sobre as faces laterais das fatias. O fator de segurança para momentos, FSM, é calculado. O processo de cálculo do FS é iterativo e para uma primeira estimativa é comum tomar-se  $FS = FS_{Fellenius}$  [19].

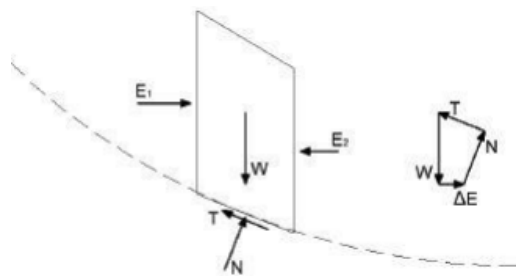


Figura 1. Método de Bishop [20]

Silva [15] afirma que o método de Morgenstern-Price considera uma superfície de ruptura qualquer

e a direção da resultante das forças interlamelares é determinada pelo uso de uma função arbitrada. No método de Morgenstern-Price a direção das forças resultantes interfatias é determinada utilizando-se uma função  $f(x)$  arbitrária. O valor de  $\lambda$  que satisfaz as equações de equilíbrio para forças e momentos é computado para cálculo do fator de segurança (Figura 2).

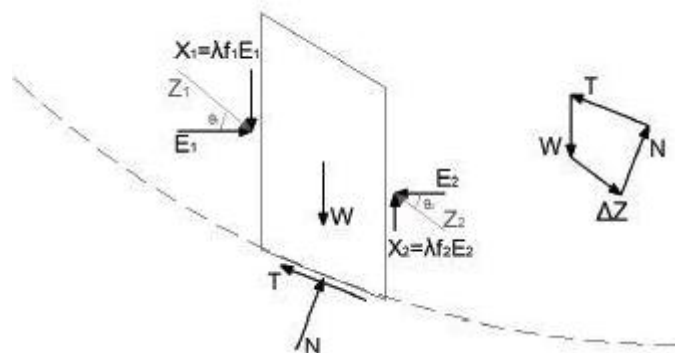


Figura 2. Método de Morgenstern-Price [20]

Spencer desenvolveu um método com duas equações de fator de segurança, uma levava em consideração o momento de equilíbrio e a outra, as forças horizontais de equilíbrio, era similar ao Método de Morgenstern-Price, que considerava funções de força entre as lamelas. Em 1973, que considera uma superfície de ruptura circular, introduziu a ruptura por uma superfície qualquer e a resultante das forças interlamelares tem inclinação constante através da massa deslizante.

Nogueira [20] cita que as forças de interação entre fatias são representadas por uma resultante  $Q$  que assume uma inclinação constante  $\theta$  com a horizontal, em cada fatia (Figura 3). Spencer entendeu válida a hipótese de a razão entre forças de corte ( $X$ ) e forças normais ( $E$ ) ser constante.

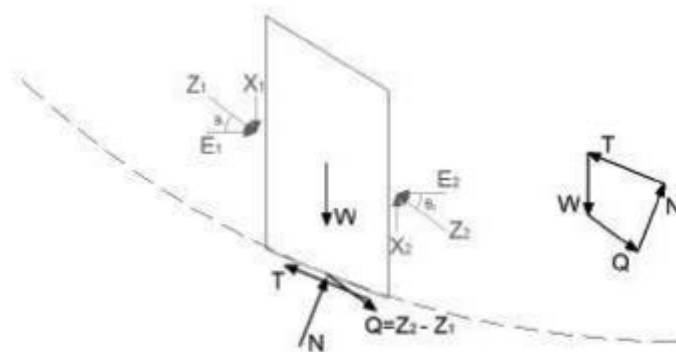


Figura 3. Método de Spencer [20]

## 6 Slide

O SLIDE ® é um programa da RocScience para a análise da estabilidade de taludes, integrando o método de elementos finitos para análise de percolação e tensão/deformação, que resolve questões como esvaziamentos rápidos, análises probabilísticas e dimensionamento de suportes. Ele se baseia na teoria do equilíbrio limite e é muito utilizado para analisar rupturas do tipo circular e também plano-circulares, que são os modos de ruptura mais comumente associados às características dos maciços de barragens.

O *software* permite modelar todos os tipos de materiais rochosos e solos. Aterros, barragens de aterro e muros de suporte são facilmente analisados. Permite ainda avaliar o fator de segurança e probabilidade de rotura das estruturas referidas, recorrendo a uma divisão em fatias de faces verticais ou inclinadas no contexto do método de equilíbrio limite.

O SLIDE analisa por meio de elementos finitos, percolação de águas subterrâneas e infiltração, levantamento rápido, sensibilidade e análise probabilística. Todos os tipos de solos, rochas, encostas, aterros, barragens de terra e muros de contenção podem ser analisados.

Segundo Nogueira [20], o programa opera em ambiente Windows, com interface simples e facilidades para construção de modelos geomecânicos, com possibilidade de importação de desenhos de programas como o AutoCad.

A análise determinística, seja para a condição drenada ou não drenada, é feita por pesquisas em superfície circular ou não circular. A pesquisa do círculo crítico é feita plotando-se diversos círculos, em quantidade definidas por uma malha formada por diversos pontos que representam os centros dos círculos. A malha de elementos finitos pode ser facilmente configurada pelo usuário [20] (Figura 4).

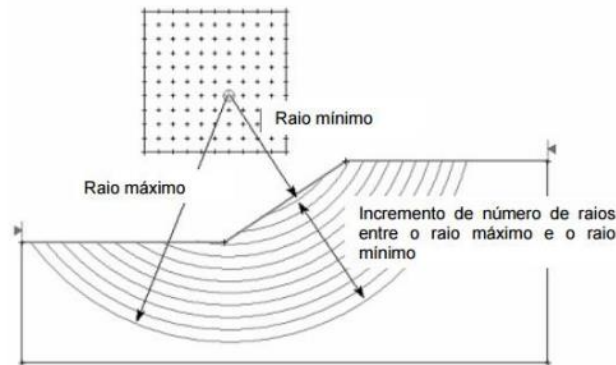


Figura 4. Raio Mínimo e máximo na pesquisa da superfície crítica [20]

## 7 Slope/w

O software SLOPE/W é um dos módulos de um pacote desenvolvido pela GeoStudio para análise de estabilidade de taludes. Demais softwares do pacote são capazes de análises de infiltração de água, tensão- deformação, dinâmica de terremotos, correntes de ar, transporte de contaminantes e análises geotérmicas.

A integração entre os módulos do pacote da GeoStudio permite combinações de múltiplas análises utilizando diferentes produtos em um único projeto, possibilitando que problemas complexos sejam desmembrados em problemas menores.

Este programa permite contemplar estratigrafias complexas, pressões de água com variação no espaço e no tempo, cargas concentradas, estruturas de suporte, ação sísmica, entre outros recursos assim como o *software* SLIDE. Além disso, sua aplicação possibilita análises de estruturas reforçadas com geossintéticos, cortinas atirantadas e outras técnicas construtivas.

Este módulo utilizado o equilíbrio limite e suas formulações, que se baseiam, principalmente, no método das lamelas. Existem vários autores que solucionam problemas utilizando este método, sendo todas muito semelhantes, diferindo principalmente em quais equações da estática são incluídas e satisfeitas, quais os esforços entre as lamelas são considerados, ou ainda, qual a relação entre as forças cortantes e normais nas lamelas [21].

De maneira similar ao SLIDE, há ainda a opção de busca automática do círculo de ruptura, útil quando não se conhece a região possível de escorregamento. Santos [22] afirma que para a busca livre pelo usuário da superfície crítica define-se a malha de possíveis centros de rotação da superfície de ruptura, as linhas que definem este raio e seus limites no qual a superfície deverá ser inserida (Figura 5).

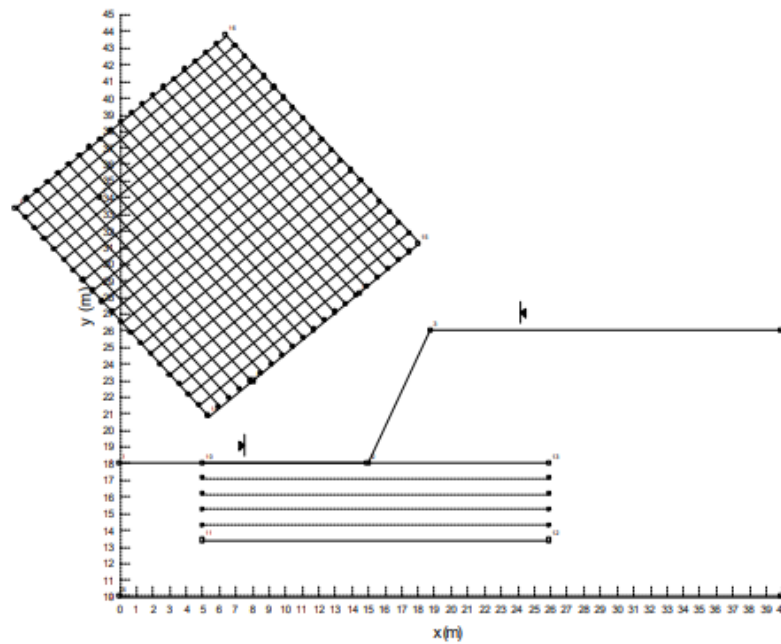


Figura 5. Definição da malha dos centros de rotação, raios e limites para a busca da superfície crítica circular [22]

## 8 Definição dos parâmetros

Para a avaliação dos limites aceitáveis de FS do cenário atual, conforme diretrizes da NBR 13.028/2017 [23], foram adotadas as condições explicitadas na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1. Critérios adotados para fatores de segurança

| Regimes de solicitação                                                                                                                                                                                           | FS mínimos admitidos |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Análise estática: condição atual com freática definida a partir das leituras de instrumentação fornecida. Análise do talude de jusante: Nível d'água atual do reservatório e parâmetros efetivos de resistência. | 1,50                 |
| Condição atual com freática definida a partir das leituras de instrumentação fornecida e coeficiente da aceleração da gravidade $a=0,05g$ . Análise do Talude jusante: Nível d'água atual do reservatório.       | 1,10                 |

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, coesão e ângulo de atrito, bem como o peso específico dos materiais utilizados para esse estudo foi tomada com base em estudos geológicos-geotécnicos e ensaios de campo e laboratório.

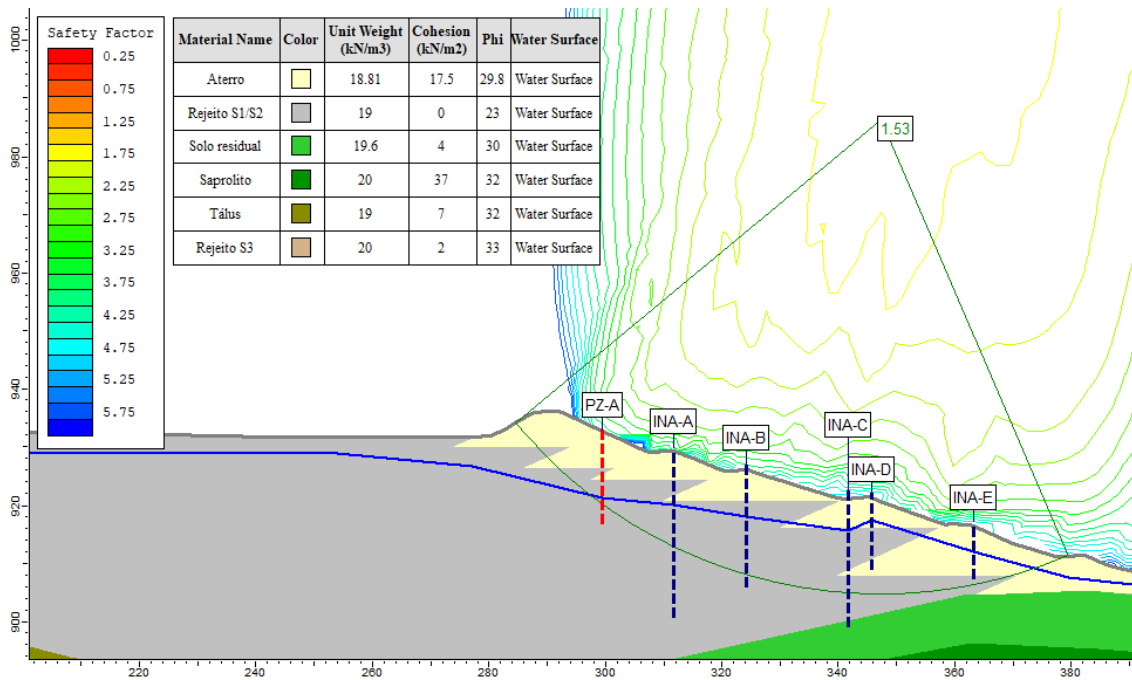
Para determinação dos parâmetros efetivos do rejeito, foram analisados os resultados dos ensaios triaxiais executados em todas as amostras ensaiadas e paralelamente foram analisados os valores de SPT representativos de cada seção e granulometria do material. Para o solo residual, foi considerado os parâmetros de resistência de ensaios triaxiais. Para o lastro e saprolito, os parâmetros de resistência efetiva foram baseados na correlação com SPT e experiência em materiais semelhantes já estudados.



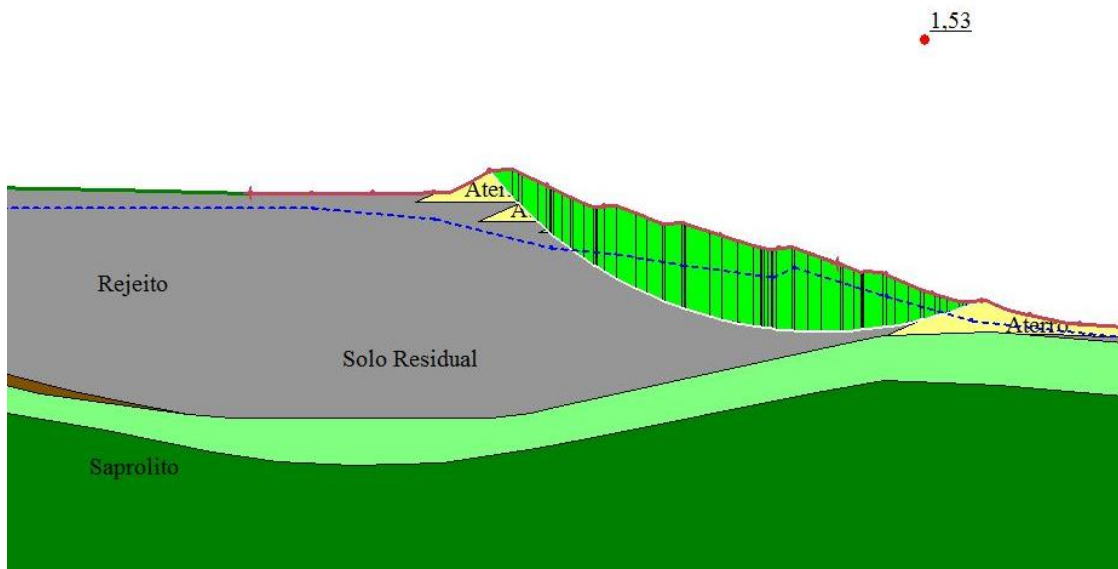
## 9 Análises e discussões

Foram realizadas análises de estabilidade estática nos softwares SLIDE e SLOPE/W pelo método de Bishop Simplificado, Morgenstern-Price e Spencer em ambos os programas, pois tais métodos conduzem a bons resultados com erros muito pequenos.

Foi considerando o critério de ruptura Mohr-Coulomb e pelo método de ruptura circular de uma barragem alteada à montante, localizada no quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. A Figura 6 até a Figura 8 apresentam os resultados das análises para o software SLIDE e SLOPE/W para a condição estática.

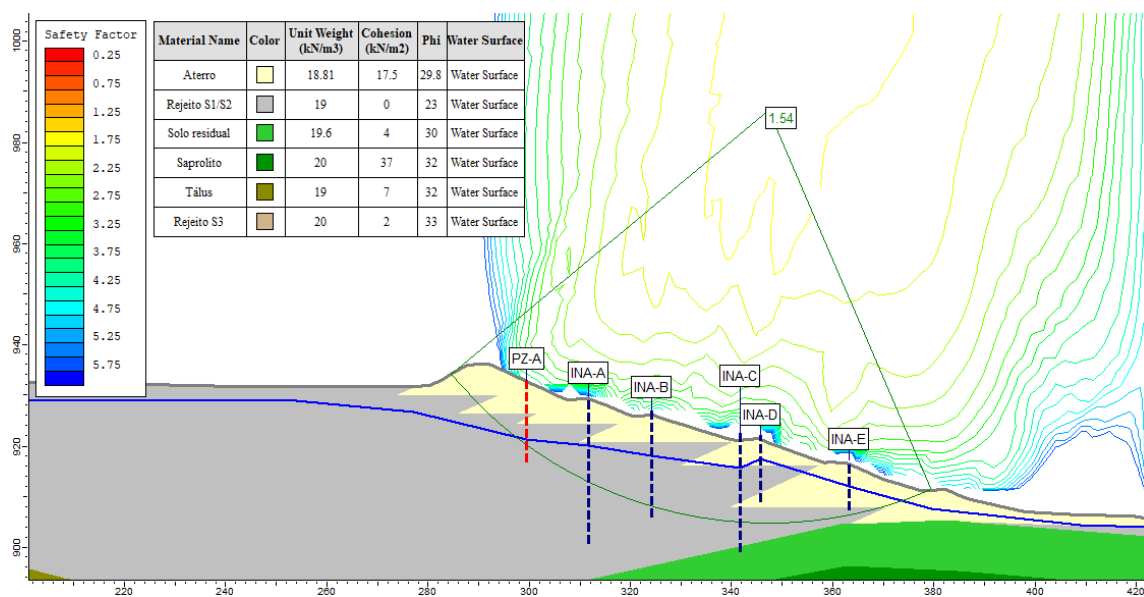


(a) SLIDE (FS=1,53)

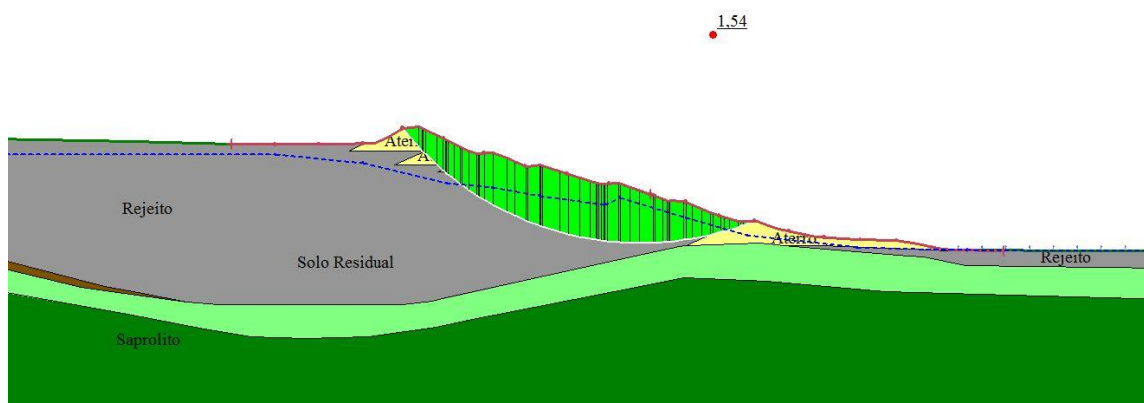


(b) SLOPE/W (FS=1,53)

Figura 6. Análises de estabilidade estática pelo método de Bishop para a seção de análise

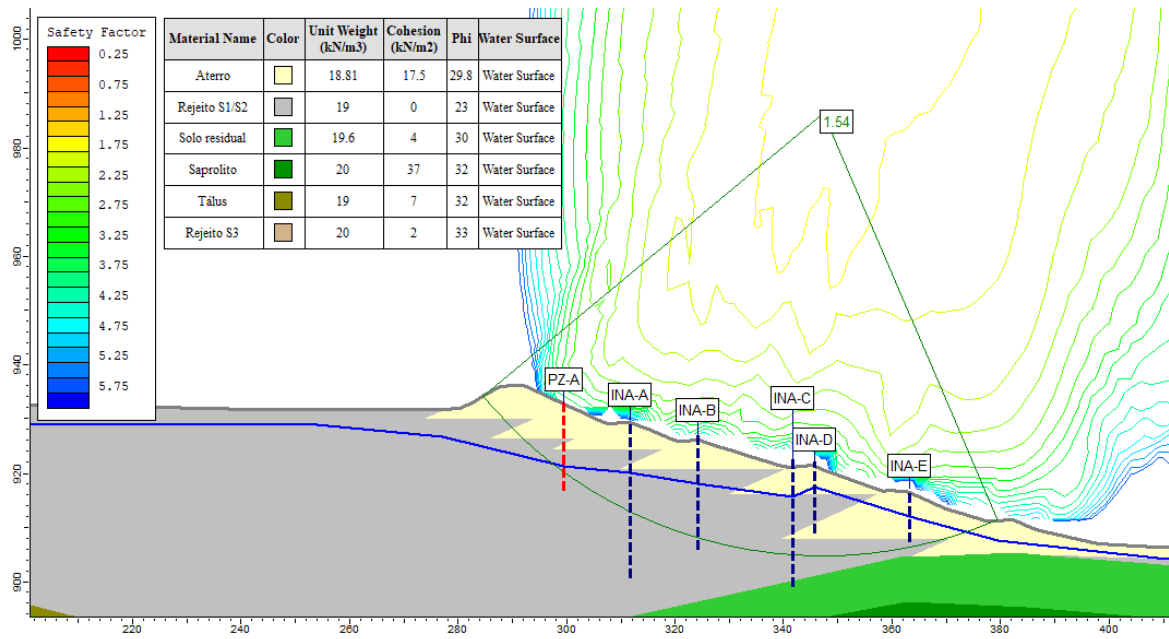


(a) SLIDE (FS=1,54)

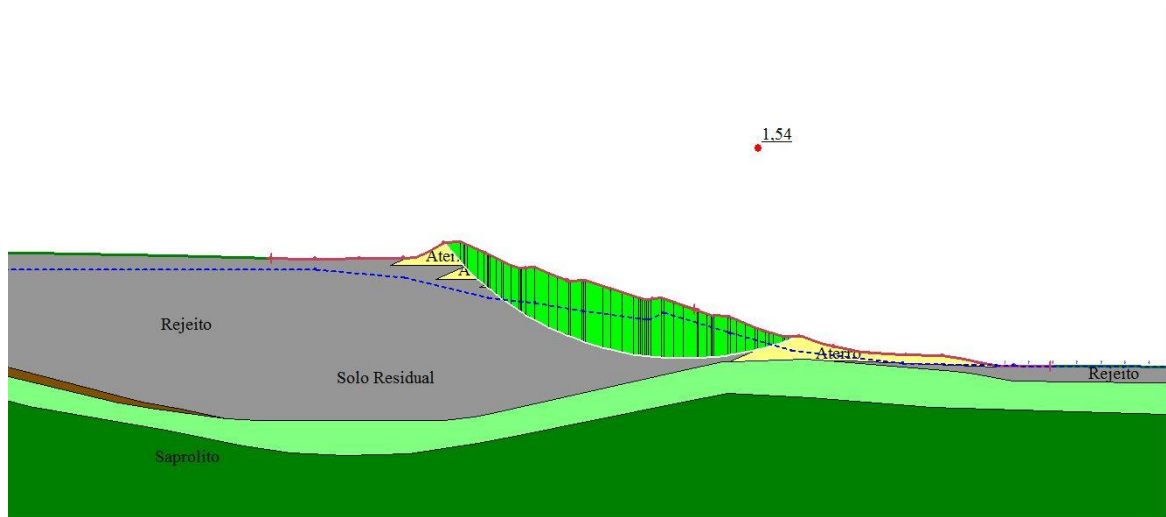


(b) SLOPE/W (FS=1,54)

Figura 7. Análises de estabilidade estática pelo método de Morgenstern-Price para a seção de análise



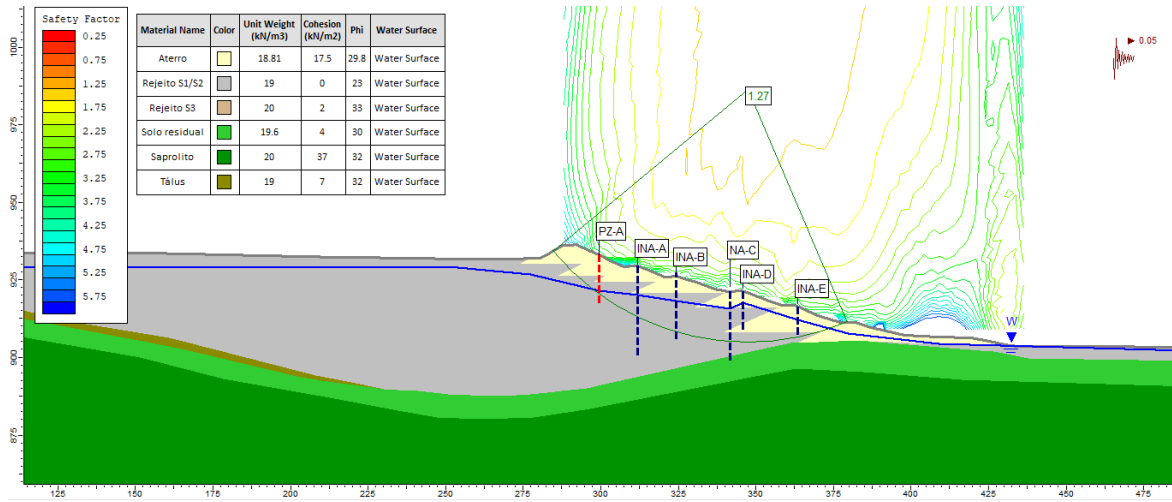
(a) SLIDE (FS=1,54)



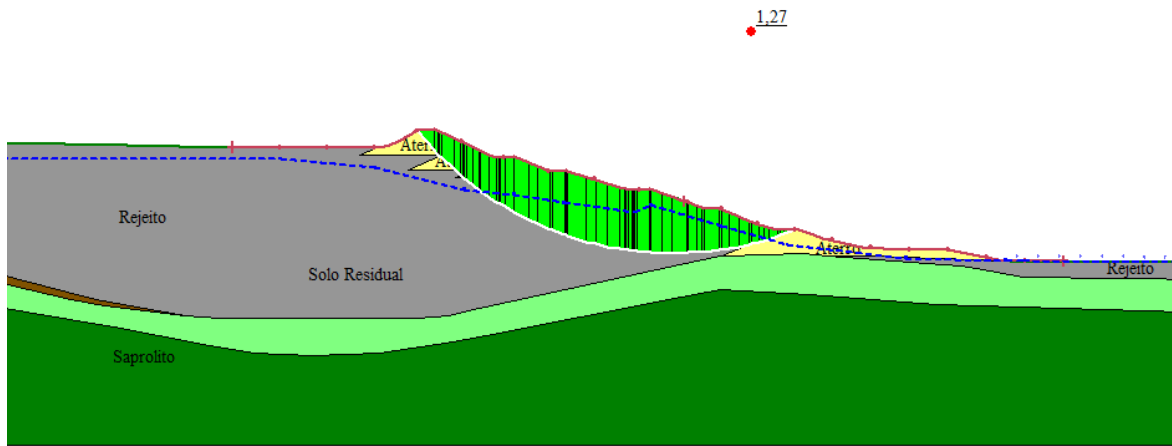
(b) SLOPE/W (FS=1,54)

Figura 8. Análises de estabilidade estática pelo método de Spencer para a seção de análise

A Figura 9 até a Figura 11 apresentam os resultados das análises para o software SLIDE e SLOPE/W para a condição pseudo estática.

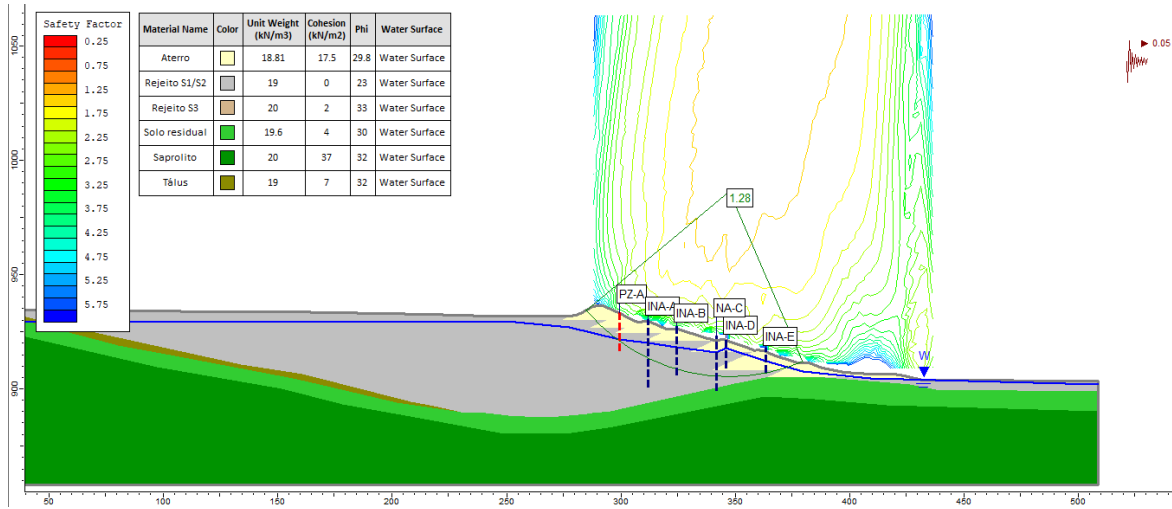


(a) SLIDE (FS=1,27)

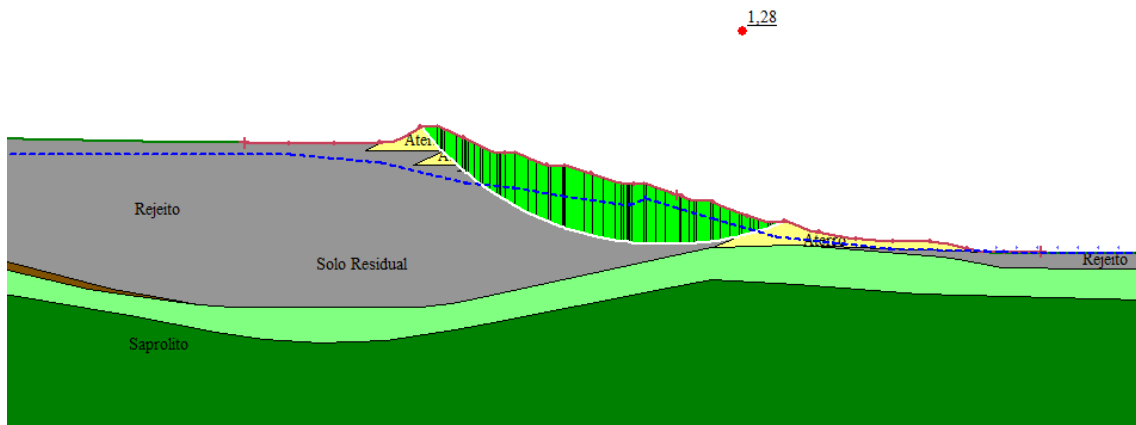


(b) SLOPE/W (FS=1,27)

Figura 9. Análises de estabilidade pseudo estática pelo método de Bishop para a seção de análise

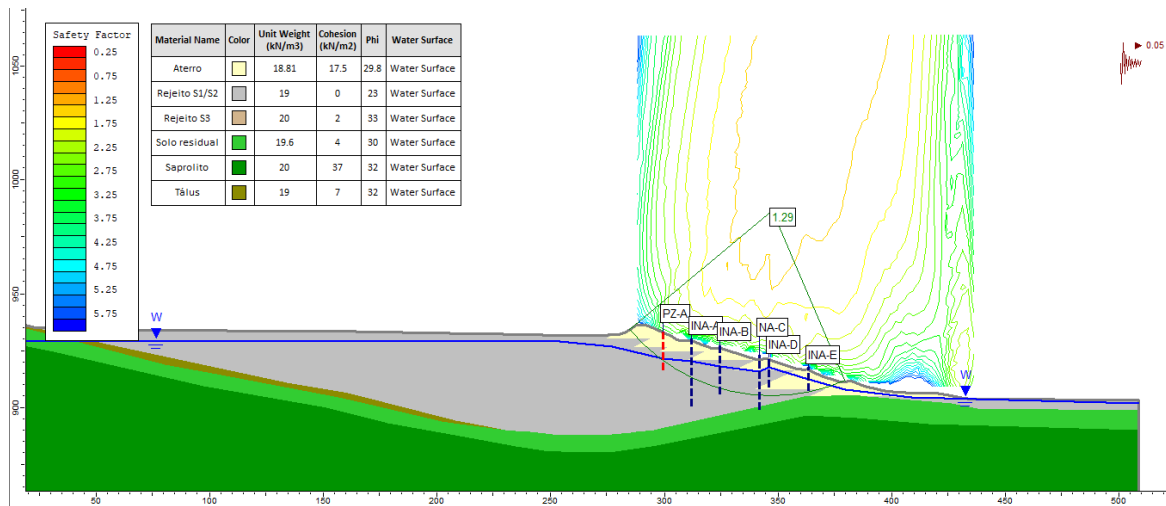


(a) SLIDE (FS=1,28)

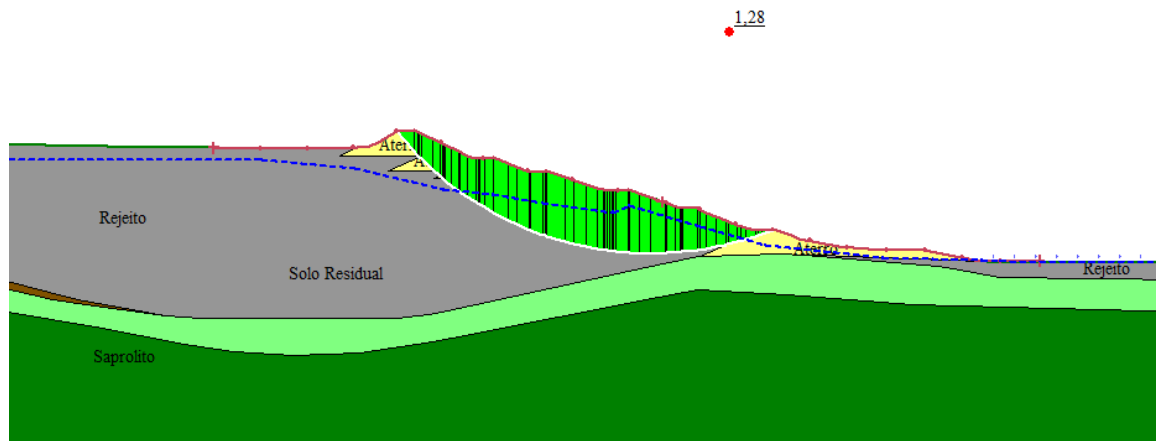


(b) SLOPE/W (FS=1,28)

Figura 10. Análises de estabilidade pseudo estática pelo método de Morgenstern-Price para a seção de análise



(a) SLIDE (FS=1,29)



(b) SLOPE/W (FS=1,28)

Figura 11. Análises de estabilidade pseudo estática pelo método de Spencer para a seção de análise

Como observado, os fatores de segurança encontrados foram os mesmos, exceto para a condição pseudo estática para o método de Spencer. Essa semelhança já era esperada, pelo fato dos dois softwares apresentarem a mesma formulação.

Quanto à forma de obtenção dos resultados, o SLIDE oferece mais opções além de apresentar uma configuração que oferece mais simplicidade ao usuário, no que se refere à importação da seção e caracterização das propriedades dos materiais. Quanto à análise de resultados propriamente dita, o programa SLOPE/W permite de uma forma mais simples de se obter os resultados desejados. No entanto ao nível de visualização de resultados o SLIDE, permite uma definição mais completa da informação que se pretende exibir nas imagens.

## 10 Conclusões

O presente trabalho realizou análises de estabilidade de uma barragem de rejeitos alteada pelo método à montante entre dois softwares que utilizam como base as mesmas metodologias de cálculo. De posse de um mesmo perfil e utilizando os mesmos parâmetros, buscou-se avaliar o desempenho dos

softwares no que tange a utilização dos recursos, interface com o usuário e simplicidade para profissionais e estudantes que utilizam ferramentas para análises de estabilidade de taludes.

Os resultados tanto para a análise estática quanto para a análise pseudo estática apresentaram resultados muito próximos ou iguais em ambos os programas. A nível estrutural, o fator de segurança encontrado está acima dos limites estabelecidos e a barragem encontra-se estável.

Durante a compilação das informações entre os dois softwares, verificou-se que o SLIDE apresenta um leque maior de opções de configurações e simplicidade na importação de seções geradas em outros softwares como o Autocad por exemplo, além da maior praticidade na caracterização dos materiais. Ele também apresenta mais recursos na visualização dos resultados. Por outro lado, o SLOPE/W apresenta os resultados de uma maneira mais simples, dependendo da finalidade que se busca com as informações.

Cabe ressaltar que os softwares foram analisados no que se refere a estabilidades de taludes para condição estática e pseudo- estática apenas, mas outros recursos devem ser estudados para uma melhor percepção do que ambos os softwares podem oferecer em nível de desempenho. É sabido que o pacote da GeoStudio possui uma gama de recursos que podem ser associados na plataforma, possibilitando análises mais complexas e resultados mais reais dos estudos, tornando o SLOPE/W uma ferramenta melhor aplicada para outras situações.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fontes Geotécnica pela disponibilização dos dados e informações necessárias à pesquisa, bem como suporte técnico quanto à análise dos resultados sob a ótica da engenharia.

## Referências

- [1] Agência Nacional de Mineração (ANM). Nota explicativa - 15/02/219: segurança de barragens focada nas barragens construídas ou alteadas pelo método a montante, além de especialidades diferentes. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/noticias/nota-explicativa-sobre-tema-de-seguranca-de-barragens-focado-nas-barragens-construidas-ou-alteadas-pelo-metodo-a-montante-alem-de-outras-especificidades-referentes>. Acesso em 30 de maio de 2019.
- [2] Aquino, G. C. H; Fontes, M. M. M; Petronilho, M. R; Rigatto, I. B. Avaliação da necessidade do estudo de liquefação em elaboração de cartas de risco geotécnico para barragens alteadas a montante. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano. Salvador. 9 p, 2018.
- [3] Rezende, D.A. Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 96 p., 2013.
- [4] Lacerda, L. A *et al.* Análises de fluxo e estabilidade em barragem de terra e comparação entre dados piezométricos de campo e pressões obtidas em modelagem numérica. Comitê brasileiro de barragens. XXVII Seminário Nacional de grandes barragens. Belém, Pará, 7 p, 2007.
- [5] GEO-SLOPE. (2002) “For finite element seepage analysis”– Version 5.14. Geo-Slope Int. User’s guide.
- [6] Della, J.P.; Santos, A. A. Análise de estabilidade de barragem zoneada – estudo de caso. UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Trabalho de conclusão de curso. 17 p. 2011.
- [7] Silva, E. M. Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 143 p. 2006.
- [8] Reis, J. C. C. L. C. Estudo comparativo da aplicação de programas comerciais na modelação de barragens de aterro. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 193 p., 2017.
- [9] Passos, N.C.de S. T. Barragem de rejeito: avaliação dos parâmetros geotécnicos de rejeitos de minério de ferro utilizando ensaios de campo- um estudo de caso, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2009.
- [10] Araújo, C. B. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro, Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006.

- [11] Duarte, A. P. Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 130 p, 2008.
- [12] Pereira, E. L. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. Tese de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, 2005.
- [13] Fernandes, G. Caracterização geológico- geotécnica e propostas de estabilização da encosta do Morro do Curral – Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas,2010.
- [14] Gerscovich, D.M.S. Notas de Aula- Estabilidade de Taludes, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil,2008.
- [15] Silva, C. C. Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 136 p., 2015.
- [16] Tonus, B. P. A. Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
- [17] Dyminski, Y. A.S. Notas de Aula- Estabilidade de Taludes, UFPR, Curitiba, PR, Brasil,1996.
- [18] Zhu, D, Y. Investigations on the accuracy of the simplified Bishop method. Landslides and Engineered Slopes, Chen et al. (eds.), pp. 1055-1057, Taylor & Francis Group, London,2008.
- [19] Bueno, B. S; Vilar, O. M. Mecânica dos solos. Gráfica EESC/USP, v.2, 219p. São Carlos,1985.
- [20] Nogueira, R.T. Simulação Numérica e Equilíbrio Limite aplicado a Retroanálise de Taludes em Mineração de Carvão. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 176 p., 2016.
- [21] Prof. M. Marangon. Utilização de recursos computacionais em geotecnia. Uso do programa SLOPE/W. Geotecnia de Fundações e Obras de Terra. Un. 4, 27 p., 2017.
- [22] Santos, C.R. Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, São Paulo, 118 p., 2004.
- [23] NBR 13028: Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação. Rio de Janeiro. 2017.