

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE BARRAGENS DE TERRA: Uma aplicação do Método de Equilíbrio Limite

Lucas Manassés Viterbino Neto¹
Géremy Carlos Freitas²

RESUMO

As barragens de terra são muito comuns e bastante utilizadas para a contenção de rejeito de mineração. Elas possuem vários componentes constitutivos, dentre eles, os taludes, que devem ser estudados de forma minuciosa afim de impedir a sua ruptura e o comprometimento da barragem, o que sempre traz prejuízos diversos. A partir destas inquietações, foram criados diversos métodos para o estudo da estabilidade de taludes, sendo um deles o método de equilíbrio limite que nos auxilia na análise do fator de segurança, que afeta diretamente o design de barragens. Este artigo buscou compreender este método e aplicá-lo no estudo do fator de segurança utilizando alguns parâmetros da barragem de Huavenica no Peru. Os resultados mostraram todas as superfícies de estudo possíveis, encontrando o seu fator de segurança no programa GeoStudio, se utilizando de cinco diferentes métodos de análise. Com isso foi possível compreender o método e sua utilidade na engenharia de barragens.

Palavras-Chave: Barragem. Equilíbrio Limite. Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

As earth dams are quite common and widely used to contain mining rejection. They have several constituent components, among them, the slopes, which must be studied in detail, in order to prevent their rupture and compromise of the dam, of which always brings different losses. From these consultations, several methods were created for the study of slope stability, one of them being the limit equilibrium method that helps in the analysis of the safety factor, which directly affects or the design of dams. This article seeks to understand this method and apply the results shown on all possible study surfaces in the study of the safety factor of the Havenena dam in Peru, finding the safety factor in the GeoStudio program, using five different methods of analysis. This made it possible to understand the method and its usefulness in dam engineering.

Keywords: Dams. Limit Equilibrium. Slope Stability.

¹ Acadêmico concluinte do Curso de Engenharia Civil do Centro de Ensino Superior do Amapá – CEAP. E-mail: lvneto@hotmail.com

² Docente Centro de Ensino Superior do Amapá – CEAP. E-mail: geremy.freitas@ceap.br

1 INTRODUÇÃO

As barragens apresentam-se como solução para diferentes áreas da engenharia civil, estas podendo ser apresentadas como barragens de enrocamento, de concreto gravidade, e barragens de terra para rejeitos de minério. Com a constante expansão das atividades que envolvem a construção de barragens de terra, e com os eventos recentes sobre elas no Brasil, estas tomam um importante destaque devido à sua importância social, econômica e, frequentemente, ambiental. Dentro do escopo do projeto de barragens um item que se destaca é o estudo da estabilidade dos taludes, a partir da obtenção do seu coeficiente de segurança associado ao talude.

De acordo com a literatura técnica, os taludes podem ser agrupados em duas categorias: naturais e artificiais. Os taludes naturais se referem àqueles que são criados por fatores geológicos (litologia, estruturação, geomorfologia) e ambientais (clima, topografia, vegetação). Já os taludes artificiais se referem aos taludes criados com ação humana para usos específicos, tais como: contenção de água, contenção de rejeito de minérios ou até a mudança do curso de um fluxo de água.

Para Chowdhury (2010, p. 82), “O principal objetivo da análise de taludes na maioria das aplicações da engenharia é contribuir para o projeto econômico e seguro de escavações, aterros, terra, barragens e depósitos de rejeitos”.

A necessidade de entender os problemas relacionados à instabilidade em taludes construídos são desafios comuns à engenharia civil devido aos fatores envolvidos na sua análise. A instabilidade pode ser ocasionada por variações no índice pluviométrico, mudança nas forças aplicadas na barragem e na mudança da altura do lençol freático, entre outros.

Para se avaliar a estabilidade dos taludes é realizado o estudo do fator de segurança, que é a relação entre a resistência de cisalhamento e a tensão cisalhante atuante. É o fator de segurança que define se um talude está estável ou instável, e, conseqüentemente, responde pelo nível de segurança da barragem.

Ao longo dos anos diferentes métodos e ferramentas para a análise do fator de segurança foram desenvolvidos. Pacheco (2015) descreve que os métodos de análise para serem aplicáveis a problemas práticos devem ser versáteis de modo a incluir situações onde as propriedades do solo e valores de poro pressão variam no interior do maciço.

Dentre os métodos desenvolvidos se destaca é o método de equilíbrio limite que consiste no estudo da barragem a partir das propriedades dos solos obtidas seguindo o método de ruptura de Mohr-Coulomb e do estudo das forças cisalhantes e normais da barragem para a definição do fator de segurança, que possui seus próprios parâmetros.

A maioria dos métodos de equilíbrio limite subdivide a região de solo delimitada pela superfície potencial de ruptura em um número qualquer de fatias verticais, também chamadas de lamelas, analisando-se as condições de equilíbrio das forças atuantes em cada fatia isoladamente.

As barragens de terra apresentam variadas condições de utilização, que dependem das condições de uso, do solo, de forças externas, do fluido que ela está represando e ainda de condições meteorológicas. Desta mesma forma, cada sistema de equilíbrio limite trata estas forças de forma diferente, sendo que em alguns casos certas forças não são utilizadas no cálculo do fator de segurança. Portanto, é necessário fazer uma comparação de cada situação individual das barragens para que seja identificado qual o fator de segurança em cada situação

crítica. Ao final pode comparar-se os resultados dos diferentes métodos.

São inúmeros, e de conhecimento geral, os exemplos da importância social, econômica e ambiental do estudo de barragens, sobretudo no Brasil, após tantos desastres seguidos. Quando se fala da segurança de barragens estas se tornam exponencialmente importantes pois são, geralmente, obras de grande porte, expondo ainda mais pessoas ao risco do seu rompimento. Segurança esta que deve ser assegurada através do estudo da forma mais eficiente possível de se estudar o talude de barragens.

Nessa linha, este artigo tem como problemática a questão de como analisar a estabilidade do talude de uma barragem de terra, aplicando o método de equilíbrio limite. Desta forma, neste artigo buscou-se como objetivo geral analisar a estabilidade do talude de uma barragem, aplicando o método de equilíbrio limite. Para se alcançar este objetivo foi necessário: (i) descrever os aspectos conceituais e teóricos de barragens e dos métodos de análise de estabilidade de taludes; (ii) Realizar análises de estabilidade com o GeoStudio, com a ferramenta SLOPE/W; (iii) Comparar os métodos de análise de estabilidade dos taludes.

1.1 METODOLOGIA

Este projeto buscou o entendimento e avaliação dos fatores intrínsecos em um talude de uma barragem por meio da análise de modelos do método de equilíbrio limite, em específico cinco, sendo estes: Bishop e Fellenius (1936), Janbu (1973), Morgenstern Price e Spencer dentro da utilização de programas que já atuam no mercado para a visualização e compreensão dos taludes das barragens.

A partir da natureza aplicada da pesquisa compreende-se a necessidade de revisar os métodos de análise de estabilidade de taludes, onde se volta para o estudo destes parâmetros para entender e auxiliar o engenheiro na criação de barragens mais seguras, eficientes e duradouras, a fim de expandir o entendimento sobre as mesmas.

Se utilizando do programa GeoStudio, com a ferramenta de análise SLOPE/W, o estudo faz a aplicação de diferentes conceitos matemáticos de análise de estabilidade para o método de equilíbrio limite.

Visto que os parâmetros de barragens de rejeitos são de difícil acesso, este artigo se utiliza dos parâmetros de Mohr-Coulomb de uma barragem de rejeito no Peru, Huancaevlica, descrita por Rafael e Romanel (2017) e se utiliza das propriedades de rejeito de lama de ferro descritos por Luiz (2016).

E por fim, utilizou-se o GeoStudio para replicar as análises para cinco diferentes tipos de método para a comparação, sendo estes: Bishop, Fellenius, Janbu, Morgnstain-Price e Spencer.

Devido a inconsistências e dificuldades de acesso à essas informações, o estudo é teórico estuda a viabilidade da utilização dos métodos de equilíbrio limite, mas não representa a realidade das barragens descritas.

Para definir a provável superfície de ruptura dentro do talude da pesquisa, utilizou-se da barragem com a ruptura no talude à jusante. Para simular uma barragem com a utilização de rejeito de minério de ferro, utilizou-se do peso específico do rejeito de ferro como $2,86 \text{ g/cm}^3$ ou $28,0469 \text{ kN/m}^3$, como descrito em Luiz (2016).

A barragem questão possui um dique de partida, com mais três diques montados à jusante. Os taludes todos possuem a inclinação de 1.5:1, e possuem os seguintes parâmetros de Mohr-Columb:

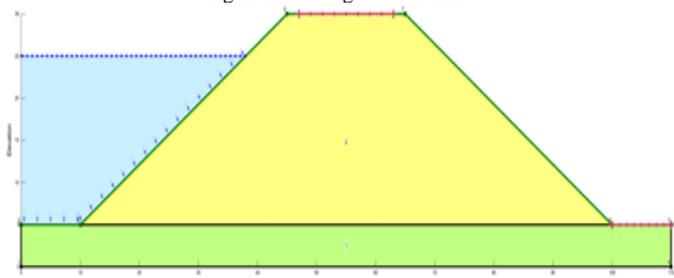
Tabela 1 – Características da Barragem.

| Material | Peso específico (KN/m ³) | Coesão C' (kPa) | Ângulo de Atrito (φ°) |
|---------------|---|-----------------|--------------------------|
| Fundação | 18,5 | 20 | 33 |
| Dique Inicial | 21 | 20 | 36 |

Fonte: Adaptado de Herbert e Romanel (2017).

A partir disso, tem-se o dique de estudo, que está demonstrado na Figura 1.

Figura 1 - Barragem de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para analisar a estabilidade do talude de uma barragem de terra, aplicando o método de equilíbrio limite, inicialmente foram descritos os conceitos, tipologias e componentes de barragens bem como a classificação de taludes. Na sequência, abordou-se aspectos conceituais e teóricos acerca do método de equilíbrio limite e a importância do fator de segurança no entendimento do design de taludes. Finalmente, os resultados mostraram todas as superfícies de estudo possíveis, encontrando o seu fator de segurança no programa GeoStudio, se utilizando de cinco diferentes métodos de análise. Com isso foi possível compreender o método e sua utilidade na engenharia de barragens.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS GERAIS DE BARRAGENS E TALUDES

2.1.1 Conceito e tipos de barragens

As barragens são caracterizadas por serem estruturas que são utilizadas para a contenção e/ou acumulação de substâncias líquidas, no caso de barragens de hidrelétricas e misturas de líquidos e sólidos, no caso de barragens de rejeito.

As barragens podem ser definidas em três classificações, sendo estas: segundo o uso, que são as barragens de armazenamento, ou de regularização de vazões, para desvio de fluxo de canais, para o controle de cheias e por fim para a contenção de rejeitos industriais. Sendo o projeto hidráulico: barragens vertedoras, ou não vertedoras. Segundo o comportamento estrutural: barragens tipo gravidade ou barragens estruturadas e, finalmente, classificadas quanto aos materiais de construção sendo estas as barragens de concreto ou de terra (UNITED STATES, 1987).

As barragens de gravidade (Figura 2) são barragens de concreto que apresentam a maior resistência e o menor custo de manutenção, sendo a sua altura limitada pela resistência de fundação. Apesar de possuírem o menor custo de manutenção, estas barragens, quando comparadas à barragens de terra ou de enrocamento, são as de maior custo (CHIOSSI, 2013).

Figura 2 – Barragem de gravidade.



Fonte: EngWhere, Acesso 2020.

Dentro das barragens de concreto (Figura 3), encontram-se ainda as barragens de arco, e estas são as menos comuns devido ao seu comprimento ser menor que sua altura exigindo assim, na encosta do vale, um material rochoso adequado e de grande resistência. Por isso, estas barragens são mais comuns na Europa, onde os vales são profundos e fechados (CHIOSSI, 2013).

Figura 3 - Barragem do Funil (Rio Paraíba do Sul, RJ).



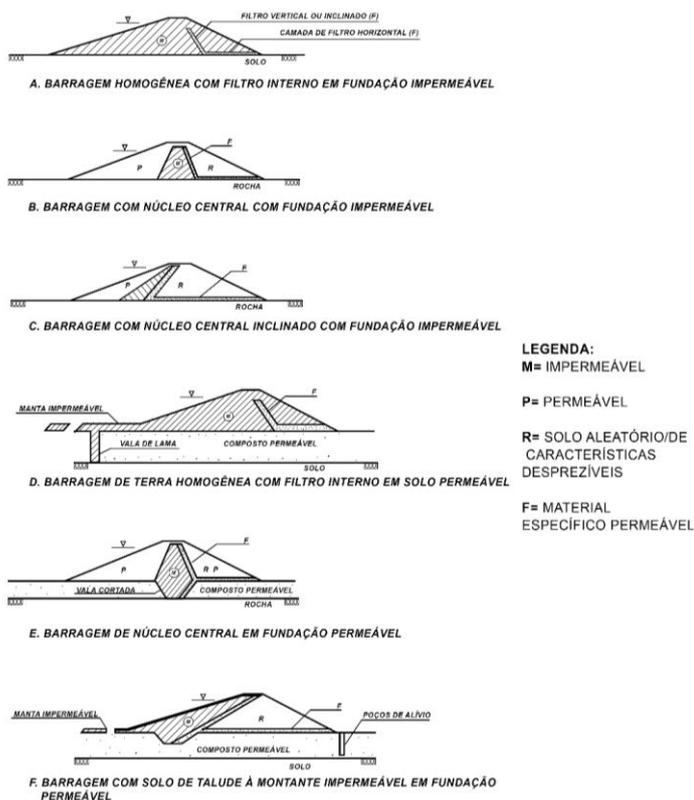
Fonte: Agencia Nacional das Aguas, acesso 2020.

Já as barragens de terra podem ser divididas em duas, sendo estas as barragens de terra homogêneas, e as barragens de terra-enrocamento (MASSAD, 2010).

Massad (2010) descreve ainda que as barragens de terra homogêneas são as de uso mais comum no Brasil pelas condições topográficas e pela disponibilidade de material terroso no Brasil. Este tipo de barragem tolera fundações mais deformáveis, podendo ser construída sobre solo mole.

Fell (2005) descreve que existem vários tipos de barragens de enrocamento, sendo que os designs entre eles irão variar de acordo com os graus de infiltração e percolação do solo, que serão controlados dentro da barragem através de filtros e drenos. Na Figura 4 estão definidos os tipos de barragens de enrocamento:

Figura 4 - Tipos de Barragens de Enrocamento



Fonte: Adaptado de Engenharia do Exército EUA, (1994).

As barragens de contenção de rejeitos são construídas com o próprio material da atividade mineral e são comumente concebidas de terra pelo seu material mais barato (MASSAD, 2010). Desta forma, para as analisar é necessária uma ampla compreensão de seus componentes.

Estes maciços de terra possuem várias formas de aplicação, porém, alguns elementos são comuns entre elas, sendo estes: talude de jusante, que fica no lado oposto ao material depositado na barragem rejeito; o talude de montante, que fica em contato com o material filtro e a fundação, que é o lado com o maior contato com o terreno natural (RSB, 2018).

As barragens de contenção de rejeitos são construídas a partir de uma estrutura inicial de contenção, denominada dique de partida, em seguida os rejeitos são depositados para serem armazenados, formando um depósito com uma zona denominada de praia e outra denominada de lagoa de decantação (ARAÚJO, 2006). Após a capacidade operacional da barragem ser atingida, é necessário que o dique de partida seja elevado gradualmente, com o fim de acumular mais resíduos. Essas elevações são chamadas de alteamentos (RSB, 2018).

Existem três técnicas principais de alteamentos, a saber: alteamento à jusante, alteamento à montante e à linha de centro. As barragens com alteamento à jusante são aquelas cujos alteamentos são construídos com lançamento do aterro sobre o talude de jusante do alteamento anterior e sobre o terreno atual (RSB, 2018).

A Figura 5 demonstra uma barragem com alteamento à jusante. Este método demonstra-se mais seguro por ele se utilizar de ferramentas construtivas comuns, como a compactação e o controle do lançamento do rejeito. Além disso, como os alteamentos são construídos em solo conhecido, fornecendo maior segurança devido ao maior conhecimento do material de fundação.

Porém, Araújo (2006) descreve que estas barragens necessitam de maiores volumes de material (maior relação areia/lama), apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material.

Figura 5 - Barragem com alteamento à jusante.



Fonte: Relatório Nacional de Barragens, (2018).

Já a Figura 6 demonstra uma barragem com alteamento à montante. Este consiste na execução da construção de um dique de partida, geralmente de material argiloso ou enrocamento compactado. O rejeito é então despejado em direção à linha de fundação do dique, formando a praia de deposição que será a fundação e que será base de construção para o próximo alteamento, continuando até que a cota final prevista em projeto seja atingida (ARAÚJO, 2006).

Figura 6 – Barragem com alteamento à montante.



Fonte: Relatório Nacional de Barragens, (2018).

Embora seja o método mais utilizado pelas construtoras, principalmente pelo seu baixo custo, Araújo (2006) descreve que o método apresenta um baixo controle construtivo, tornando-o crítico em relação à segurança. Segundo a autora:

O agravante neste caso, está ligado ao fato dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de capacidade fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos (ARAÚJO, 2006, p. 14).

Por esse motivo, e após os acidentes em barragens à montante no Brasil, a Resolução da Agência Nacional de Mineração (ANM) 04/2019 proibiu a criação de novas barragens à montante.

O último método é o método de alteamento à linha de centro, demonstrado na Figura 7, e neste método de construção de alteamentos de barragens são construídos por meio do lançamento de aterro sobre a praia de montante e sobre o talude de jusante do alteamento anterior (RSB, 2018). Em comparação com o método de jusante, uma das vantagens desse método é o menor volume de aterro necessário para a construção de novos alteamentos (TRONCOSO, 1997).

Figura 7 – Barragem com Alçamento de Linha de Centro



Fonte: Relatório Nacional de Barragens, (2018)

2.1.2 Principais componentes das barragens

As barragens de rejeito e de terra são constituídas pelos seguintes componentes estruturais: barramento, fundação e ombreiras. Os conceitos são encontrados no Relatório Nacional de Barragens (RSB, 2018) e serão abordados a seguir.

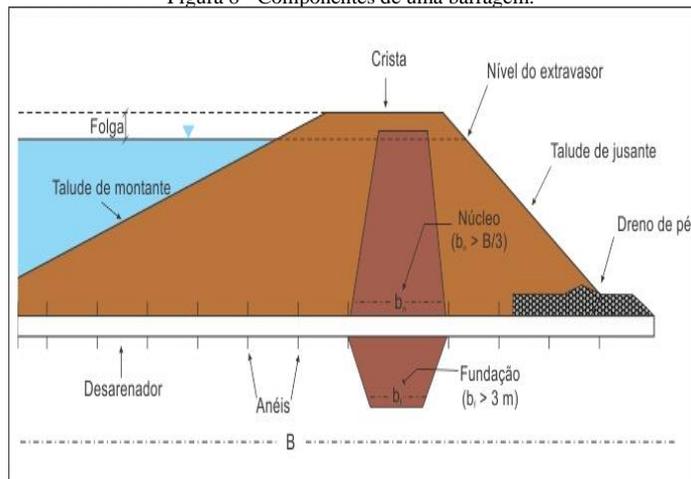
O barramento é a estrutura construída transversalmente ao curso de água e, conjuntamente com a fundação e as ombreiras, é responsável pela retenção da água. Ele pode ser executado com diferentes tipos de técnicas e materiais, como aterro (terra, enrocamento, rejeitos), concreto (convencional, ciclópico, compactado a rolo), alvenaria, entre outros (RSB, 2018, p.9).

A fundação é a seção transversal do barramento que em grande maioria possui a forma trapezoidal, sendo o lado maior o contato com o terreno natural (RSB, 2018, p.9).

Já as zonas das margens que estão em contato direto com o barramento são denominadas de ombreiras, existindo duas: À margem à esquerda é a ombreira direita e à margem à esquerda é a ombreira esquerda.

Além dos componentes estruturais, existem outros componentes de uma barragem, demonstrados na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Componentes de uma barragem.



Fonte: Atlas das águas, (2020).

2.1.3 Tipos de taludes

Segundo Abramson (2002), os taludes projetados pela engenharia se dividem em três, sendo estes: barragens, aterros e cortes em taludes.

Para Chowdhury (1978), os cortes de talude, tanto rasos quanto profundos são de grande interesse da engenharia civil, pois o alvo da engenharia deve ser construir taludes que tenham uma vida útil longa e ao mesmo tempo sejam as mais econômicas possível. Ainda segundo o autor, esta análise deve estar aliada ao estudo das condições geológicas, às propriedades do material utilizado na construção do talude, a possibilidade de erosão, aos métodos de construção e ainda à necessidade e uso do corte em específico.

A respeito da avaliação da estabilidade de aterros, Abramson (2002, p. 19) conceitua:

A avaliação da estabilidade de taludes de aterros é similar à outros tipos de problemas de estabilidade. A seleção de valores apropriados para a resistência do material utilizado tanto no preenchimento quanto na fundação, e a própria resistência à cisalhamento ao longo da interface dentro do liner e dos sistemas de cobertura são a parte mais crítica de qualquer estudo de estabilidade. As grandes dificuldades e incertezas estão associadas à avaliação da força e as propriedades da relação tensão-deformação.

Chowdhury (1978) descreve, ainda, que a análise das barragens já não possuem as mesmas dificuldades e incertezas comparadas ao corte de talude mas que devem ser levados em consideração os seguintes parâmetros, especificamente: o fim de sua construção, condições à longo prazo, o rebaixamento do nível da água (para barragens de contenção de água) e, por fim, distúrbios sísmicos.

As avaliações acima descritas demonstram que a estabilidade do talude deve prever uma plethora de fatores que envolvem todo o sistema, desde a escolha de materiais até o final de sua vida útil, e relatam a responsabilidade do engenheiro civil quanto à sua competência e habilidade de saber analisá-las em conjunto e trazer a solução mais adequada.

3 MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE

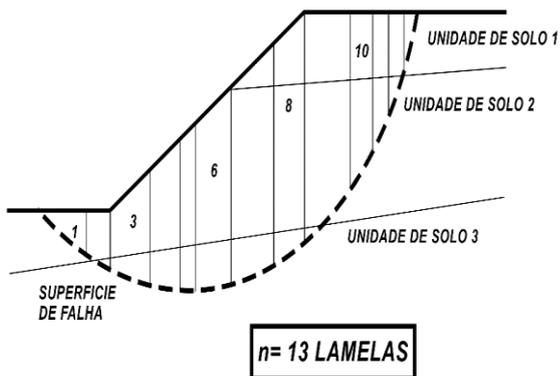
O método de equilíbrio limite por meio da análise de lamelas é um instrumento que pode ser utilizado em qualquer configuração de barragens de terra, de diferentes solos e condições de progressão, este método emprega propriedades como as de resistência de cisalhamento do talude e a pressão exercida no local e ainda as propriedades do maciço.

Chowdhury (2009) comenta que este método é o único geral para a análise de taludes irregulares e solos não homogêneos e rochas em que o coeficiente de atrito (ϕ) e a coesão do solo (c) não são necessariamente constantes, tornando este método o método ideal para a análise de barragens de rejeito, visto que estas nem sempre podem se fazer de materiais homogêneos.

Os pioneiros do método foram Fellenius (1927, 1936) e Taylor (1937, 1948), e desde então foi modificado diversas vezes a fim de expandir o seu uso e aplicação, resultando não só em uma maior extensão de uso mas também em uma maior confiabilidade e precisão. Estas análises consistem em comparar a resistência no talude e se esta suporta as tensões de cisalhamento que eventualmente tendem a provocar as falhas.

Se utilizando de lamelas para fazer dividir o talude e avaliar as forças intrínsecas delas, o método avalia as forças entre cada uma das divisões para fazer uma análise, como demonstrado na Figura 9.

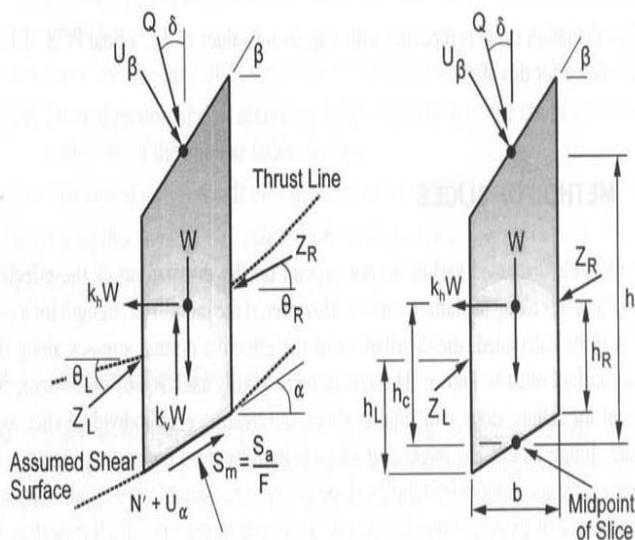
Figura 9 - Divisão de um talude.



Fonte: Adaptado de Abramson (2002).

Depois das respectivas divisões, as lamelas são analisadas separadamente para a obtenção do fator de segurança. Abramson (2002) faz a análise do sistema da seguinte forma, dividindo o sistema em 22 diferentes variáveis, conforme a Figura 10 abaixo:

Figura 10 - Forças agindo em uma lamela típica.



Fonte: Abramson (2002).

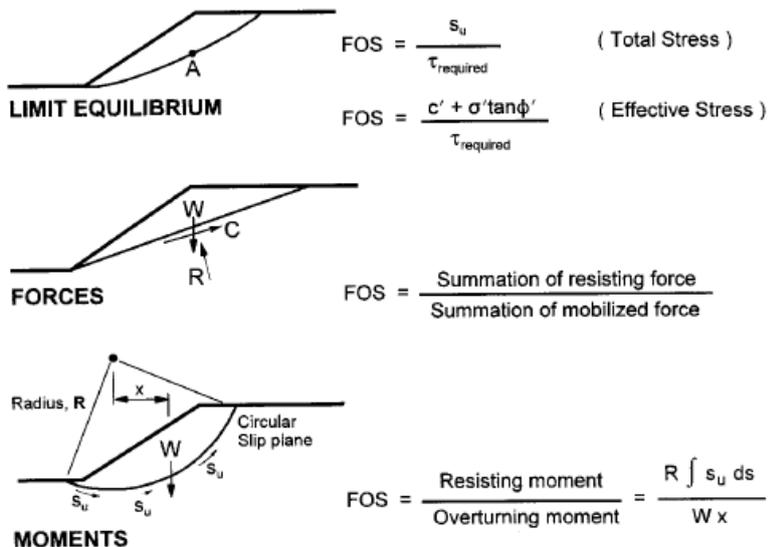
Desta forma, estes métodos têm similaridade em suas avaliações, visto que eles irão fazer a comparação entre as forças atuantes e o talude em questão (ABRAMSON, 2002).

3.1 FATOR DE SEGURANÇA – FS

O entendimento do Fator de Segurança (FS) é de extrema importância no design de taludes. Uma função bem reconhecida do fator de segurança, de forma geral, é resguardar contra a falta de confiabilidade da precisão de alguns valores, como parâmetros de força, distribuição de poropressão e estratigrafia. De forma geral, quanto menor a qualidade do local de investigação, maior o FS deve ser, principalmente, se o criador do projeto possui experiência limitada com os materiais em questão.

Em análises de limite de equilíbrio, matematicamente, os sistemas de forças que definem o fator de segurança são definidos na Figura 11.

Figura 11 - Várias definições de fator de segurança (FS).



Fonte: Abramson (2002).

Abramson (2002, p. 34) explica que:

Na maioria das análises de equilíbrio de limite, a força de cisalhamento necessária ao longo de uma superfície potencial de falha apenas para manter a estabilidade é calculada e, em seguida, comparada com a magnitude da força de cisalhamento disponível. Assim, uma proporção constante da força disponível é mobilizada em todos os pontos da superfície de falha para resistir ao possível deslizamento.

Por exemplo, no ponto A no talude superior da Figura 11 acima, o FS será dado pela relação entre a tensão de cisalhamento disponível do solo para garantir o equilíbrio do corpo deslizante e a tensão de cisalhamento solicitada. Logo, tem-se que:

$$\tau_{req} = \frac{S_u}{F} \quad \text{Para tensão total} \quad (1)$$

$$\tau_{req} = \frac{c'}{F_c} + \frac{\sigma'_n \tan \theta}{F_\theta} \quad \text{Para tensão efetiva} \quad (2)$$

Huang (2014), descreve que a resistência ao cisalhamento disponível, denominada de ‘S’ pode ser calculada a partir da tensão normal efetiva σ'_n e dos parâmetros de Mohr-Coulomb, sendo estes a coesão c' e o ângulo de atrito ϕ' , ambos parâmetros do solo, tem-se:

$$S = c' + (\sigma'_n - u) \tan \phi' \quad (3)$$

O mesmo autor conceitua o fator de segurança F como a relação entre a resistência máxima do talude S e a tensão de cisalhamento que tentem provocar a falha, ao longo do maciço.

Desta forma a equação do fator de segurança F é:

$$F = \frac{c' + \sigma'_n \tan \phi'}{\tau} = \frac{S}{\tau} \quad (4)$$

A Figura 12 a seguir faz uma comparação com os métodos de cálculo fator de segurança pelo método de equilíbrio limite, onde nota-se que cada método possui suas considerações para força cisalhante e força normal e ainda para quais as superfícies de deslizamento.

Figura 12 - Comparação dos métodos de avaliação do Fator de Segurança por método de equilíbrio limite.

| Métodos | Circular | Não circular | ΣM=0 | ΣF=0 | Suposições para N e C |
|------------------------------|----------|--------------|-------|------|---|
| Ordinário | ✓ | - | ✓ | - | Negligencia ambos N e C |
| Bishop Simplificado | ✓ | (*) | ✓ | (**) | Considera E, mas negligencia C |
| Janbu Simplificado | (*) | ✓ | - | ✓ | Considera E, mas negligencia C |
| Janbu GPS | ✓ | ✓ | (***) | ✓ | Considera tanto E quanto T, age na Tensão Limite |
| Lowe-Karafiath | - | ✓ | - | ✓ | Inclinação da resultante em $\theta = \frac{1}{2}(\alpha + \beta)$ |
| Engenharia do Exército (EUA) | - | ✓ | - | ✓ | Inclinação da resultante em $\theta = \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2)$ |
| Sarma | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Cisalhamento entre lamelas $T = ch + E \tan\phi$ |
| Spencer | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Inclinação constante, $T = \tan\theta E$ |
| Morgenst. - Price | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | Definido por $f(x)$, $T = f(x) \cdot \lambda \cdot E$ |

(*) Pode ser usado tanto para ambas falhas circulares e não circulares
 (**) Satisfaz equilíbrio de forças verticais para a força normal
 (***) Satisfaz momento de equilíbrio para lamelas finas intermediárias (Janbu 1957, Gra)
 N= Força Normal
 C= Força Cisalhante

Fonte: Adaptado de Aryal (2006).

Nas seções a seguir, serão demonstrados os cálculos de alguns dos métodos demonstrados anteriormente.

3.1.1 Cálculo do Fator de Segurança

3.1.1.1 Método de Fellenious

O método descrito a seguir, também chamado de Método Ordinário, foi criado por Fellenious (1927) e este desconsidera todas as forças entre as superfícies de corte, fazendo sua análise somente em relação à força normal e ao peso. Este método é um dos métodos mais simples de análise de taludes, entretanto, falha em satisfazer o equilíbrio de forças para a superfície de deslizamento, bem como da própria lamela (ABRAMSON et al, 2002).

Segundo Fell (2005) este método só pode ser utilizado com as seguintes restrições: somente para superfícies de deslizamento circulares; satisfaz o equilíbrio do momento, não satisfazer o equilíbrio de forças horizontais ou verticais e por fim o método tende a subestimar o fator de segurança na maioria dos casos.

Este método é descrito pela equação:

$$Fos = \frac{\sum_{i=1}^n [c'l + N'tg\phi']}{\sum_{i=1}^n [w_i \text{sen}\alpha]} \quad (4)$$

Tal que:

$$N' = (W \cos\alpha - ul) \quad (5)$$

Onde, u = poro pressão, l = comprimento da base da lamela e α = inclinação da superfície de deslizamento no meio da lamela.

3.1.1.2 Método de Bishop Simplificado

O método de Bishop Simplificado (MBS) é muito comum em superfície de deslizamento circulares e se utiliza da força normal entre as lamelas, apesar de não considerar as forças de cisalhamento entre elas (PRASAD, 2006). Sendo assim, este método é ainda mais satisfatório para determinar as forças verticais afim de determinar a força normal efetiva (N') (ABRAMSON et al 2002) que por este método é dada por:

$$N' = \frac{1}{m_\alpha} \sum \left(W - \frac{c'l \text{sen}\alpha}{F} \right) - ul \cos\alpha \quad (6)$$

Onde:

$$m_\alpha = \cos\alpha \left(1 + tg\alpha \frac{tg\phi'}{F} \right) \quad (7)$$

Como o MBS também assume uma sessão de falha circular, a mesma equação (4) é utilizada para determinar o valor do fator de segurança.

3.1.1.3 Método de Janbu Simplificado

O Método generalizado e o método simplificados foram criados por Janbu em 1954 e 1968, ambos sendo muito comum em análise de estabilidade. O primeiro método, o simplificado, se baseia em uma superfície de falha não circular e o fator de segurança é determinado pelo equilíbrio de forças horizontais (PRASAD, 2006). Assim como o Método de Bishop Simplificado (MBS) segundo este autor o método considera as forças entre lamelas (E) mas desconsidera as forças de cisalhamento (T), logo, a força normal é determinada da mesma forma que no método MBS. Apesar de a força normal ser a mesma do método anterior, pela superfície de falha não ser a mesma, o fator de segurança é dado pela equação:

$$F_f = \frac{\sum (c'l + (N - ul)tg\phi') \text{seca}}{\sum Wtg\alpha + \sum \Delta E} \quad (8)$$

Onde,

$$\sum \Delta E = E_2 - E_1 = \text{soma das forças normais entre lamelas}$$

Esta a formula genérica do método, porém, dentro de suas análises e nas condições de tensões apresentadas originalmente por Janbu (1954) a equação (8) se escreve como:

$$F_0 = \frac{\sum \left\{ \frac{b(c' + (p - u)tg\phi')}{n_\alpha} \right\}}{\sum p \cdot b \cdot tg\alpha} \quad (9)$$

$$Fos = \frac{\sum_{i=1}^n [c'l + N'tg\phi']}{\sum_{i=1}^n [w_i \text{sen}\alpha]} \left(1 + \frac{tg\phi'}{F} \right) \quad (10)$$

Onde,

$$p = \frac{W}{b} = \text{tensão vertical total e } b = \text{largura da lamela}$$

Janbu (1954) introduziu ainda um fator de correção (f_0) no fator de segurança original, que resulta em um fator de segurança maior. Este fator de segurança é descrito por:

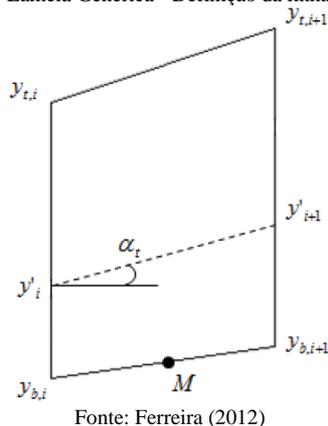
$$F_f = f_0 \cdot F_0 \quad (11)$$

Abramson (2002) descreve que o fator de correção depende da taxa entre a profundidade e a largura (d/L) da superfície de falha, podendo aumentar o fator de segurança em 5 a 12%.

3.1.1.4 Método de Janbu Generalizado

O método de Janbu generalizado se utiliza das forças entre lamelas e assume uma linha de impulso para determinar a relação entre essas forças. Logo, o primeiro passo é a definição da linha de linha de impulso ao longo do talude. Ferreira (2012) demonstra o cálculo da linha de empuxo por meio da figura 13:

Figura 23 - Lamela Générica - Definição da linha de Empuxo



Fonte: Ferreira (2012)

Definindo a linha de impulso pela equação:

$$y'_{i+1} = y_{b,i+1} + \frac{y_{t,i+1} - y_{b,i+1}}{3} \quad (12)$$

Prasad (2006) descreve ainda:

A linha de impulso segue o centróide da pressão da terra. Contudo, para soluções determinadas estaticamente, o local real é procurado por um procedimento de iteração até que o equilíbrio total seja satisfeito. Como o equilíbrio geral da força é satisfeito pelas forças intersticiais, o momento em que o equilíbrio se realiza automaticamente para o deslizamento massa (NASH 1987; GRANDE 1997 apud PRASAD, 2006, p. 48).

Sendo assim, o fator de segurança deste método pode ser analisado com ambas as forças entre lamelas. Logo, tem-se:

$$F_f = \frac{\sum [c'l + (N - ul)tg\phi'] \text{seca}}{\sum \{W - (T_2 - T_1)\}tg\alpha + \sum (E_2 - E_1)} \quad (13)$$

E a força normal total (N) se torna uma função das forças de cisalhamento entre lamelas (T) como:

$$N = \frac{1}{m_\alpha} \left\{ W - (T_2 - T_1) - \frac{1}{F} (c'l - ultg\phi') \text{sen}\alpha \right\} \quad (14)$$

Sobre este método, Prasad (2006, p. 52) conceitua:

Este é o primeiro método que satisfaz o equilíbrio de força e momento. O momento o equilíbrio da massa deslizante total é explicitamente satisfeito considerando uma fatia infinitesimal largura (dx) e levando momentos sobre o ponto médio da base da fatia (JANBU 1957, 1973). O Foi introduzida uma largura infinitesimal da fatia para evitar confusão sobre o ponto de aplicação do força normal de base.

E é esta condição de equilíbrio que dá a relação entre as forças entre lamelas (E e T) como:

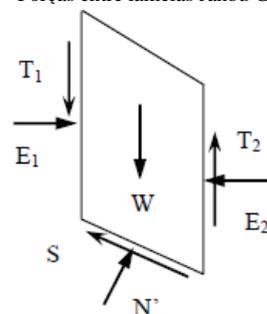
$$T = tg\alpha_t E - \frac{dE}{dx} h_t \quad (15)$$

Onde,

$tg\alpha_t$ = talude da linha de empuxo e h_t = altura do ponto médio do talude até dE.

Demonstra-se na Figura 14 a seguir um esboço das forças em questão:

Figura 34 - Forças entre lamelas Janbu Generalizado



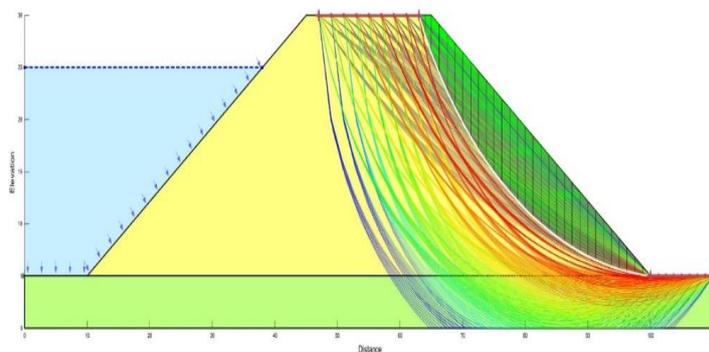
Fonte: Prasad 2006

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A superfície de ruptura crítica de cisalhamento calculada pelo programa está demonstrada nas Figuras de 15 a 21, divididas especificamente com o seu respectivo método. Estas superfícies foram divididas em 30 lamelas pelo GeoSlope e encontradas através da iteração de 405 diferentes superfícies de estudo demonstradas na Figura 14.

A Figura 15 demonstra a configuração geométrica de uma lamela, e de seu sistema de forças, demonstrando na prática o visualizado anteriormente na revisão teórica, vide Figura 9.

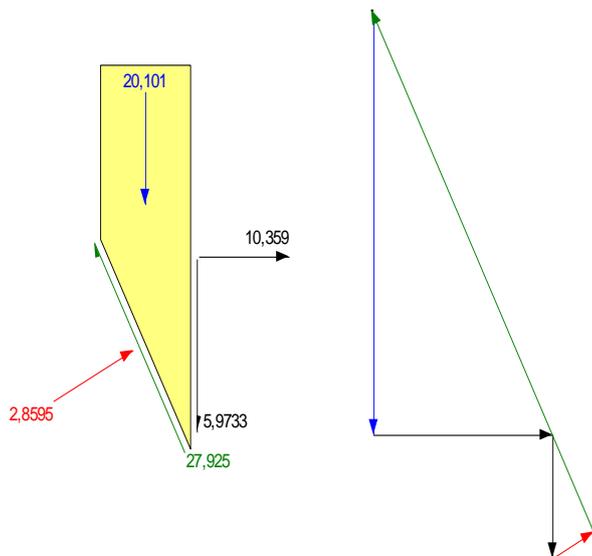
Figura 4 - Superfícies de estudo - Método de Spencer.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 - Diagrama da Fátia e Polígono de Forças.

Fátia 1 - Spencer Método

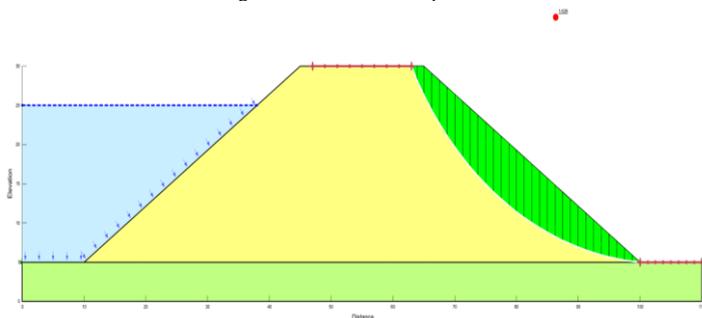


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao total, o programa calculou para somente esta lamela 35 diferentes características e forças, sendo as demonstradas no diagrama: Peso = 20,101 kN; Força normal na base = 2,8595 kN; Força cisalhante na base da lamela = 27,925 kN; Força Cisalhante à direita = -10,359 kN e Força normal à direita = 5,9733 kN.

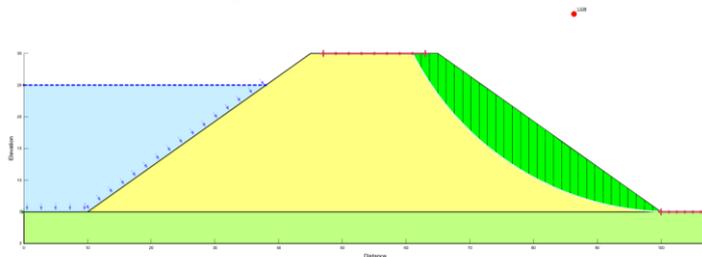
Desta forma, pode-se computar o talude afim de descobrir o seu fator de segurança, que estão demonstrados nas Figuras de 16 a 21.

Figura 6 - Análise Bishop.



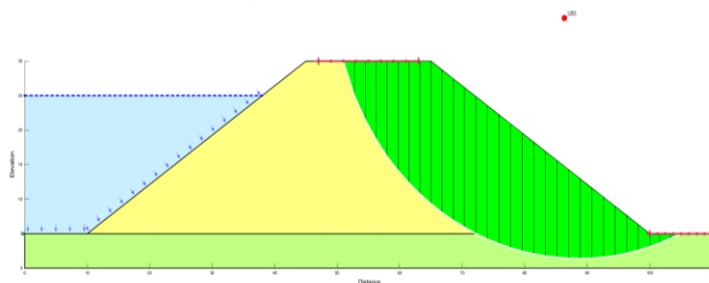
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - Análise Fellenius.



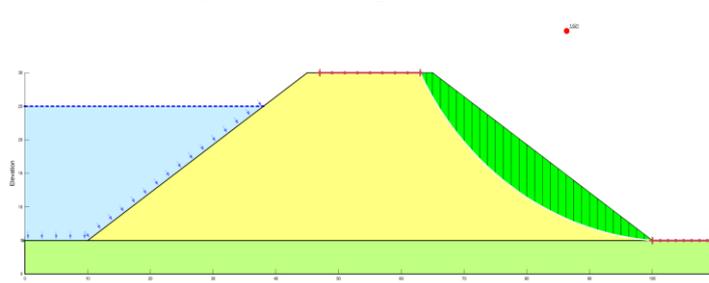
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Análise Janbu.



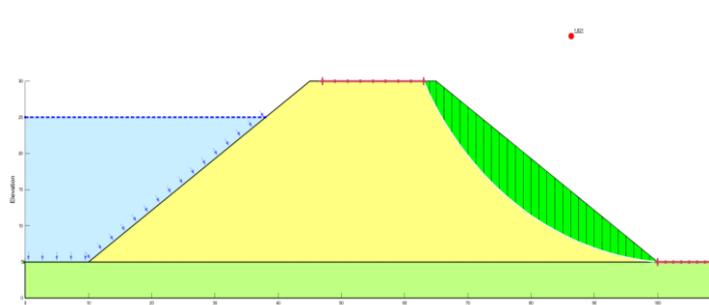
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Análise Morgnstain Price.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 - Análise Spencer.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a computação destes fatores, características e formas geométricas, o fator de segurança da barragem foi calculado pelo GeoSlope, que está descrito na tabela 2.

Tabela 1 - Resultados GeoSlope/W.

| Método | Fator de Segurança Calculado |
|------------------|------------------------------|
| Bishop | 1,626 |
| Fellenius | 1,539 |
| Janbu | 1,5361 |
| Morgnstain Price | 1,621 |
| Spencer | 1,621 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Abranson (2002) o talude é considerado instável quando o valor de $F \leq 1,0$. Os requerimentos adotados em Hong Kong fazem a análise de acordo com o perigo de risco econômico e de risco de perdas de vida, como descrito na Tabela 3 abaixo.

Tabela 2 - Fatores de Segurança Recomendados.

| Risco de perda econômica | Risco de perdas humanas | | |
|--------------------------|-------------------------|---------|------|
| | Desprezível | Mediano | Alto |
| Desprezível | 1,1 | 1,2 | 1,4 |
| Mediano | 1,4 | 1,3 | 1,4 |
| Alto | 1,4 | 1,4 | 1,5 |

Fonte: Adaptado de Geo, Hong Kong, 1984.

Nota-se então, que a barragem em análise atende até o padrão mais alto de 1,5, onde o talude tem risco de perdas humanas alto e ainda têm risco de perda econômica elevada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como propósito analisar a estabilidade do talude de uma barragem de terra, aplicando o método de equilíbrio limite. Assim, descreveram-se questões conceituais e teóricas de barragens e dos métodos de análise de estabilidade de taludes. Realizou-se ainda análises de estabilidade com o GeoStudio, com a ferramenta SLOPE/W; permitindo ao final comparar os métodos de análise de estabilidade dos taludes.

Em conclusão, a pesquisa aproximou o pesquisador dos métodos e propiciou o estudo de diferentes conceitos não somente de barragens, mas de conceitos sobre impermeabilidade, como critério de ruptura de Mohr-Coulomb e sobre conceitos geotécnicos.

Nesta pesquisa destaca-se que os conceitos abordados trazem a importância do estudo da segurança de um talude de barragens de terra, bem como a utilização de softwares na realização das análises. A partir da compreensão dos conceitos que compõem uma barragem, o estudo e escolha de métodos de como analisar e calcular as forças que estão no sistema presente poderão andar lado a lado com o profissional no momento da concepção do projeto da barragem.

Além dos conceitos genéricos abordados, foram necessárias a compreensão profunda dos métodos em questão, exigindo a pesquisa extensa sobre os métodos e sua interpretação. Desta mesma forma, além de demonstrar êxito em seus objetivos principais a pesquisa se demonstrou importante em agregar diferentes estudos no mundo todo sobre não somente o método, mas também sobre a leitura do fator de segurança, que seria a conclusão de todo o método de equilíbrio limite.

Por fim, houve a familiarização com um dos programas que é referência no meio profissional da área, o GeoStudio, fazendo com que o pesquisador se familiarize não somente com os conceitos teóricos do assunto, mas também com sua aplicação prática.

REFERÊNCIAS

ABRAMSON, Lee W. et al. **Slope stability and stabilization methods**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Relatório de Segurança de Barragens 2018**. Agência Nacional de Águas, Brasília, 2019. Disponível em: http://www.snisb.gov.br/portal/snisp/relatorio-anual-de-seguranca-debarragem/2018/rsb2018_0312.pdf. Acesso em: 10 jan. 2019.

ARAÚJO, Cecília B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

PRASAD, Krishna Aryal. **Slope stability evaluations by limit equilibrium and finite element methods**. 2006. Tese (Doutorado de Engenharia Civil). – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia, Noruega, 2006

BRASIL. **Lei nº 12.334**, de 20 de setembro de 2010. Diário Oficial da União, Brasília, DF 2010.

CHIOSSI, Nivaldo. **Geologia de engenharia**. Oficina de Textos, 2013.

CHOWDHURY, Robin. **Slope analysis| Developments in Geotechnical Engineering 22**. Elsevier, Amsterdam (1978), 1981.

CHOWDHURY, Robin; FLENTJE, Phil; BHATTACHARYA, Gautam. **Geotechnical slope analysis**. Crc Press, 2009.

FELL, Robin. **Geotechnical engineering of dams**. CRC press, 2005.

FELLENIOUS, W. **Erdstatische Berechnungen**. revised edition. W. Ernst u. Sons, Berlin, 1927.

FELLENIOUS, Wolmar. **Calculation of stability of earth dam**. In: Transactions. 2nd Congress Large Dams, Washington, DC, 1936. 1936. p. 445-462.

HUANG, Yang H. **Slope stability analysis by the limit equilibrium method: Fundamentals and methods**. 2014.

JANBU, Nilmar. Slope stability computations. **Publication of: Wiley (John) and Sons, Incorporated**, 1973.

LUIZ, Otávio. **Caracterização de Lama de Rejeito de Beneficiamento de Minério de Ferro Para Utilização em Construção Civil**. 2016

MASSAD, Façal. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Oficina de textos, 2010.

PACHECO, P. G. M. **Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre**. 2015. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro-RJ. PUC-Rio.

RAFAEL, Herbert M. Maturano; ROMANEL, Celso. Static Liquefaction **Analysis of the Limonar Tailings Dam in Peru**. In: International Congress and Exhibition " Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology". Springer, Cham, 2017. p. 41-56.

TAYLOR, Donald W. **Fundamentals of soil mechanics**. LWW, 1948.

TRONCOSO, J.H., 1997 – **Geotechnics of Tailings dams and sediments – International Congress of Environmental Geotechnics – ICEG** pp.1405-1423

UNITED STATES. BUREAU OF RECLAMATION. **Design of small dams**. US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1987.