

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS DESMONTES POR EXPLOSIVOS NA
ESTABILIDADE DAS BARRAGENS A MONTANTE
STUDY OF THE INFLUENCE OF EXPLOSIVES DISMANTLING ON UPSTREAM
DAMS STABILITY**

**Alice Rodrigues Bento²; Camila Ramos Araújo³; Maria Eduarda Rodrigues
Almeida Campos⁴; Raissa de Oliveira Sobral⁵; Rita Luara Pereira de Souza⁶;**

- * Graduanda em Engenharia de Minas no Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. 2020. MG. alicebento.9280@aluno.unibh.br.
- * Graduanda em Engenharia de Minas no Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. 2020. MG. camilaaraujo.2572@aluno.unibh.br.
- * Graduanda em Engenharia de Minas no Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. 2020. MG. mariacampos.0788@aluno.unibh.br.
- * Graduanda em Engenharia de Minas no Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. 2020. MG.
- * Graduanda em Engenharia de Minas no Centro Universitário de Belo Horizonte – UniBH. 2020. MG. ritasouza.3208@aluno.unibh.br.

Recebido em: XX/XX/XXXX - Aprovado em: XX/XX/XXXX - Disponibilizado em: XX/XX/XXXX

Resumo: O presente artigo se expõe com o objetivo de estudar a estrutura geotécnica das barragens a montante durante o processo de desmonte de rochas na mina a céu aberto. Através do software Slide Rocscience analisou-se como parte da propagação da onda sísmica no terreno, gerada pela detonação dos explosivos na mina, poderia influenciar a estabilidade das barragens a montante. Apresentando seus impactos conforme os fatores de segurança, calculado através do método de equilíbrio limite, diminuíssem nas condições simuladas. Justifica-se este projeto motivado pela quantidade de barragens a montante com dano potencial alto com risco de ruptura no estado de Minas Gerais. Conclui-se que apesar das ondas geradas serem consideradas no Fator de Segurança, esta não pode ser apontada como causadora de rompimentos das barragens.

Palavras-chave: estabilidade de barragens, rejeitos, desmonte de rocha, barragem a montante.

Abstract: This article exposes itself with the objective of studying the geotechnical structure of the upstream dams during the process of dismantling rocks in the open pit mine. Using Slide Rocscience software, it was analyzed as part of the propagation of the seismic wave in the terrain, generated by the detonation of explosives in the mine, could influence the stability of the upstream dams. Presenting their impacts according to the safety factors, calculated using the limit equilibrium method, decrease in the simulated conditions. This project is justified by the number of dams upstream with high potential damage and risk of rupture in the state of Minas Gerais. It is concluded that although the generated waves are considered in the Safety Factor, this cannot be identified as causing the rupture of the dams.

Keywords: dams stability, tailings, rock dismantling, upstream dam.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de minério de ferro, dentre as regiões que são responsáveis por esta produção tem-se o Quadrilátero Ferrífero (MG). A metodologia utilizada para extrair os recursos minerais variam, e podem ser classificadas como lavra a céu aberto ou lavra subterrânea. Em Minas Gerais, a lavra a céu aberto é a mais utilizada, sendo que dentre os processos de extração do *commodity*, que se localiza próximo à superfície, encontra-se de maneira recorrente nas minas a escavação horizontal, ou seja, a lavra por bancadas.

Segundo Curi (2017), as minas têm operações principais que garantem o aproveitamento mineral. De forma genérica elas são: perfuração, detonação, escavação e carregamento, e por fim transporte. Além disso, as minas têm operações auxiliares como distribuição e fornecimento de energia, comunicação, manutenção eletrônica e etc.

No que se diz respeito a operação de detonação nas minas de ferro, tem-se a utilização do explosivo ANFO ou emulsões explosivas. Conforme Nieble (2017), a detonação dos explosivos gerará ondas sísmicas que se propagarão temporariamente pelo maciço causando deformações elásticas nele. O que ocasionará a perturbação do meio e a alteração momentânea das formas geométricas do corpo.

É possível averiguar que 34 das 87 barragens construídas por alteamento a montante que constavam cadastradas na Agência Nacional de Mineração, ANM, em 2019, são utilizadas para conter o rejeito proveniente da extração do ferro como minério principal. Ademais, estas se encontram em Minas Gerais, onde, aproximadamente, 74% estão catalogadas com o dano potencial associado como alto, e todas estão inseridas no Plano Nacional de Segurança de Barragem (PNSB). Contudo, resignante com Troncoso (1997), barragens deste tipo apresentam um baixo controle construtivo, tornando contestável a segurança.

O agravante da perturbação da estrutura está associado com a condição construtiva dos alteamentos, uma vez que os taludes são realizados sobre o rejeito previamente depositado e não consolidado. Nesta situação os rejeitos granulares tendem a resistir menos ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação.

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo de caso relaciona através da análise de dados o risco de rompimento das barragens de contenção de rejeito com a variável sísmica gerada pelos desmontes com explosivos, visto que as ondas love e rayleigh causam o desmoronamento de vários prédios em situação sísmica análoga como os terremotos.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho objetiva avaliar a estrutura de barragens a montante durante o processo de detonação de taludes de minas a céu aberto adjacentes, aplicando simulações a fim de classificar os riscos observados, através de uma cartilha informativa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Pontuar os equipamentos e *softwares* utilizados no monitoramento de ondas;

- Mencionar a legislação sobre controle ruídos e vibrações na mineração;
- Analisar a influência dos desmontes na estabilidade do talude externo da barragem;
- Criar cartilha explicativa e ilustrativa abordando os fatores que promovem instabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o objetivo de reter os resíduos produzidos nos processos mecânicos e químicos na fase de tratamento de minérios, as barragens de rejeitos são construídas. De modo que, os rejeitos produzidos que são caracterizados por não possuir valor econômico, são depositados em forma de polpa nos barramentos (RAFAEL, 2012).

Em função do tipo de minério processado e do método de beneficiamento adotado, os rejeitos, em geral, exibem características variáveis. O comportamento geotécnico dos rejeitos está ligado às características do material, à natureza do depósito e à forma como foi depositado. (CETEM, 2010, p.842).

Visando um melhor aproveitamento da energia liberada pelos explosivos na fragmentação das rochas, na etapa de desmonte de rochas, a mineração tem-se utilizado do conceito *Mine-to-Plant*. Porém, conforme Ferreira (2020), esta energia que se propaga pelo maciço rochoso gera efeitos como as vibrações, e estas quando se propagam de maneira descontrolada causam danos aos taludes da estrutura das barragens de contenção de rejeito.

Assim, analisar os coeficientes de segurança da estabilidade de um talude através de diferentes métodos de estabilidade nos garante uma maior segurança. Visto que, é importante conhecer detalhadamente as causas da movimentação da massa de solo para, dentro do contexto onde se encontra, procurar as melhores alternativas para sua reabilitação (JOLY, 2014).

3 BARRAGEM DE REJEITOS

A etapa de tratamento de minérios tem o objetivo de gerar um produto comercializável, denominado concentrado, mas o processo também gera o rejeito, que é um produto descartável. Visto que, o volume de rejeitos produzido ao final do processo é grande, se torna necessário fazer a disposição dos mesmos, e uma opção para realizar este trabalho é utilização de barragem de rejeitos (CETEM, 2010, p.831).

De acordo com Costa (2016), barragem de rejeitos é uma estrutura geotécnica construída para o depósito de carga sólida ou mistura proveniente da mineração. Esta estrutura pode ser considerada a mais importante de uma mina e precisa atender uma série de exigências por questões ambientais e de segurança, sendo necessário um bom monitoramento e a construção deve se estender por todo o processo de atividade da mina. Os métodos mais utilizados na disposição de rejeitos por barragem são: de montante, de jusante e linha de centro. Estes podem ser escolhidos de acordo com alguns fatores como a topografia, geologia local, hidrologia, custos, entre outros. Além disso, podem sofrer diversas variações de acordo com as necessidades.

3.1 MÉTODO DE MONTANTE

No método apresentado na Figura 1, o suporte da estrutura está à montante. Os rejeitos depositados são aproveitados para formar a estrutura de contenção, sendo que a fração mais grossa fica próxima ao maciço e as lamas vão em direção ao reservatório de decantação. Segundo Araújo (2006), inicialmente a execução deste tipo de barragem parte da construção de um dique de partida, este é comumente de material argiloso ou enrocamento compactado. Posteriormente, o rejeito é inserido na barragem na linha de simetria do dique, formando então a praia de deposição, que virará a fundação desta, e eventualmente fornecerá material para a estruturação do próximo alteamento. Este processo continuará até que o limite previsto no projeto da elaboração seja atingido. As etapas de construção podem ser demonstrado na figura a seguir:

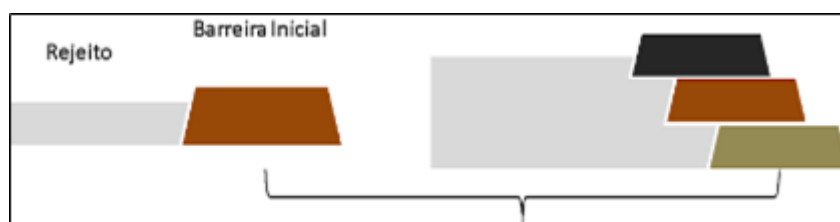


Figura 1 – Alteamento de barragens de rejeito pelo método de montante..

Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

Possui um menor custo de construção e maior velocidade de alteamento, fatores que influenciam na maior utilização dele pelas mineradoras. Porém apresenta alguns riscos pelo menor nível de segurança, devido à superfície crítica de ruptura passar por rejeitos que ainda não estão compactados, o que gera uma baixa resistência ao cisalhamento dos rejeitos granulares e susceptibilidade à liquefação. Está intrínseco nesta metodologia o risco de ruptura por liquefação da massa de rejeitos, que pode ser definida como:

“um processo de *strain softening*, caracterizado por elevada deformação e perda de resistência em solos sem coesão, saturados e com tendência à contração durante cisalhamento não drenado” (SILVA, 2016, p. 22).

Este fenômeno pode ser intensificado pela alta sismicidade natural, vibrações causadas por explosões ou movimentação de equipamentos (CETEM, 2010, p.850)

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS REJEITOS

Soares, autor do Capítulo 19 do livro do CETEM - Tratamento de Minérios, Capítulo Barragens de Rejeitos, cita que “os rejeitos são definidos como a fração do minério destituída de mineral útil ou de valor econômico, obtida por processo de beneficiamento mineral.” (SOARES, 2010, p.842).

Diversas etapas do beneficiamento mineral - lavagem, peneiramento, deslamagem, concentração gravítica e magnética, flotação, lixiviação, dentre outras - geram rejeitos, constituídos de fases líquida, sólida ou gasosa. E suas características variam de acordo com o tipo de minério processado.

Dentre os fatores responsáveis pela estabilidade e pelo comportamento geotécnico das barragens de rejeitos, as principais características são “densidade *in situ*; limites de *Atterberg*; índice de vazios inicial; consolidação ou adensamento; compressibilidade; permeabilidade e resistência ao cisalhamento.” (CETEM, 2010, p. 843). Sendo essas características definidas como:

- Densidade *in Situ*: Avaliada usualmente como densidade seca ou pelo índice de vazios, e compactação, pode ser determinada em campo pelo método do frasco de areia ou por equipamentos. Profundidade, umidade, gravidade específica, granulometria e conteúdo argiloso, interferem diretamente no resultado e nas variações dos valores e avaliações da densidade *in situ*.
- Limites de *Atterberg*: fundamental para o estudo do Limite de Liquidez e o Limite de Plasticidade dos solos. O Limite de Liquidez fornece a transição do estado plástico ao estado líquido, e o Limite de Plasticidade fornece a transição do estado semi-plástico ao estado plástico.
- Índice de Vazios Inicial (e_1): marca o limite entre a sedimentação e a consolidação do solo, no caso, do rejeito nas barragens.
- Consolidação ou Adensamento: quanto mais profunda estiver a camada, mais consolidada estará, peso e gravidade atuam sobre.
- Compressibilidade: mecanismos hidráulicos ao despejarem os rejeitos nas barragens, permitem a criação de camadas com sólidos de granulometria fina, alongados e angulosos, resultando assim em materiais que possuem alta compressibilidade.
- Permeabilidade: esse parâmetro é individual de cada barragem, pois a granulometria, a plasticidade, modo de lançamento e a profundidade do material, atuam diretamente nesse índice, permitindo valores diferentes e subjetivos. São existentes três zonas de granulometrias e permeabilidade segundo Soares:

*“(i) uma constituída por areias de alta permeabilidade, situada próxima ao ponto de descarga;
(ii) outra constituída por lamas, de permeabilidade baixa, situada distante do ponto de lançamento;
(iii) por último, aquela com permeabilidade intermediária situada entre estas duas primeiras.”(CETEM, 2010, p. 846)*

- Resistência ao Cisalhamento: o ângulo de atrito diminui conforme a tensão aplicada aumenta e os materiais constituintes dos rejeitos, com raras exceções, não são coesivos, isto é, são incapazes de conservar a estabilidade por ação de forças externas. (CETEM, 2010, p. 848)

3.5 TALUDE

Congruente com Caputo (1988), talude é um terreno inclinado que serve como base de sustentação ao solo e pode ter sido originado naturalmente, pela ação geológica ou pela ação do intemperismo (chuva, sol, vento) podendo também ser formado devido à ação antrópica. Encontra-se taludes artificiais nas minas a céu aberto, nas barragens de reservatório de água, nas laterais de estradas e ruas, na escavação de uma vala para assentamento de tubo de água e até nos fundos das casas construídas em local de aclave (terreno subindo) ou declive (terreno descendo).

4 DESMONTE DE ROCHAS

As características de um depósito decidem o método mais adequado de lavra que utilizará-se para remover o corpo mineralizado. Durante o desenvolvimento dessa mina têm-se as operações unitárias: Perfuração; Desmonte; Carregamento e Transporte. É a harmonia entre essas operações que garante que a mina nunca pare seu funcionamento.

Consoante a Curi (2017), nas mineralizações ferruginosas é comum que retire-se o minério através da lavra por bancadas. O avanço da lavra ocorre através da fragmentação das rochas da bancada na fase de desmonte. Têm-se três mecanismos:

- Desmonte hidráulico: realizado por rompedores hidráulicos, onde jatos de água com alta pressão desmontam a rochas;
- Desmonte mecânico: realizado através de tratores e máquinas, sendo empregado para rochas que possuem baixa resistência;
- Desmonte com explosivos: realizado com o uso de explosivos industriais.

4.1 SÍSMICA

Segundo Dorneles (2013), o desmonte com explosivos é o mais utilizado por minimizar os gastos e otimizar os prazos. Porém esse desmonte deve ser controlado e cuidadoso, pois há danos associados ao seu uso que devem ser minimizados ou evitados. Dentre eles as ondas sísmicas ou vibrações, que são geradas no momento que os explosivos são detonados.

As vibrações são ondas que causam deformações elásticas e se propagam radialmente a partir da fonte sísmica, nesse caso os explosivos. Estas ondas possuem parâmetros e são definidos como:

- I. Deslocamento (mm): Variação da posição da partícula em relação a sua posição de origem;
- II. Velocidade (mm/s): Relaciona a rapidez que uma onda que se propaga;
- III. Aceleração (mm/s^2): Aumento da velocidade de propagação da onda;
- IV. Frequência: Tempo decorrido entre duas duas oscilações completas.

As ondas geradas são classificadas em dois grupos (KEAREY *et. al.* p.57; 2009):

- A. Ondas de corpo: Ondas que se propagam através do volume de um sólido elástico, e dividido em dois tipos:
 - a- Ondas P: São ondas compressivas, a deformação uniaxial propagam-se na mesma direção da onda.
 - b- Ondas S: São ondas de cisalhamento, a deformação propaga-se por cisalhamento puro perpendicularmente à direção de propagação da onda.
- B. Ondas superficiais: Também subdividida em duas, as ondas superficiais propagam-se em um sólido elástico confinado. São reconhecidas por causarem o desmoronamento de prédios.
 - a- Ondas *Rayleigh*: Propagam-se na superfície livre, atribui movimento elípticos as partículas afetadas num plano perpendicular, descrito como retrógrado. São dispersivas e sofrem mudanças durante a propagação.

b- Ondas Love: São ondas de cisalhamento polarizadas, atribuem movimento a partícula paralelo a superfície e perpendicular à direção de propagação. São dispersivas e sua velocidade varia conforme a profundidade das camadas.

Se tratando do corpo, Nieble (2017), a composição das rochas influencia na maneira que as ondas se propagam no maciço rochoso. Locais com uma litologia mais homogênea tendem a propagar as vibrações com maior facilidade e não modificam a intensidade e a trajetória da onda. Mas em maciços com alto grau de fraturamento, tipos litológicos diferentes e variedade de estruturas geológicas as vibrações terão suas propriedades alteradas ao longo da propagação.

4.1.1 NORMAS REGULADORAS

Tangível ao valor máximo das vibrações no terreno tem-se as normas regulatórias, devido ao potencial de danos às estruturas associado a velocidade das ondas, e a sobreposição destes fenômenos conforme a fonte. As normas que regulam estes valores são:

- I. **NBR 9653** - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas: Estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT, esta norma instrui como deve-se mensurar os efeitos gerados pela utilização de explosivos nas minerações em áreas urbanas, instituindo valores limites e os parâmetros para os efeitos gerados. A norma estabelece que o valor da:

“velocidade de vibração de partícula (V_p) igual a 15 mm/s como limite máximo de vibração admissível nos arredores da área de operação das pedreiras. A norma também estabelece que não devem ocorrer, de forma alguma, ultralanchamentos de fragmentos e sobrepressões atmosféricas excessivas.”(BACCI et al.2003, p.133).

Ademais, baseado no que a ABNT postula, pode-se construir a seguinte tabela para avaliarmos de acordo com a litologia do terreno, tabela 1:

Tabela 1 - Limites de vibração de acordo com a litologia pela Norma ABNT/NBR-9653

Faixa de Frequência	Limites de velocidade de vibração de partícula de pico
4 a 15 (Hz)	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 (mm/s)
15 a 40 (Hz)	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 (mm/s)
Acima de 40 (Hz)	50 (mm/s)

Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

- II. **NRM 16** - Operações com Explosivos e Acessórios: Estabelecida pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, através da portaria DNPM nº 237 de 18/10/2001, institui que:

“16.4.14 O monitoramento de vibrações no solo e o ruído no ar decorrentes de detonações deve ser realizado nas obras civis próximas ao local de detonação e manter-se dentro dos seguintes limites máximos:

- a) velocidade de vibração da partícula: 15 mm/s (quinze milímetros por segundo) – componente vertical e
- b) sobrepressão sonora: 134 dB (A) (cento e trinta e quatro decibéis).” (DNPM, NRM 16, 2001).

Além disso, a norma adota que a velocidade de partícula máxima V_p é relacionada com a distância escalonada pela seguinte relação, na equação 1:

$$V_p = k (D/Q^{1/2})^{-b} \quad (1)$$

Onde:

V_p = velocidade de partícula de pico;

D = distância da detonação ao ponto de medição;

Q = carga máxima por espera (peso)

k e b = fator do local. São constantes que devem ser determinadas por medições em cada local de desmorte em particular.

Em consoante ao DNPM:

“16.4.15 Deve ser realizado estudo para o ajuste do plano de fogo de modo a atender aos limites do item 16.4.14 observando os seguintes critérios técnicos:

- a) determinação da relação empírica entre a velocidade de partícula e a distância escalonada;
- b) as distâncias graduadas são definidas pela função $(D/Q^{1/2})$; onde D é a distância radial ao ponto de detonação e Q é o peso da carga máxima por espera;” (DNPM, NRM 16, 2001).

Sendo assim, levando em consideração estas normas, o Guia de Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens, recomenda valores de Fator de Segurança e aceleração nas direções vertical ($K_{v.a}$) e horizontal($K_{h.a}$) mediante a uma situação onde não há sismicidade no corpo. Como colocado pela tabela 2.

Tabela 2 - Valores recomendados de Fator de Segurança e Coeficiente Sísmico nas direções vertical e horizontal

Coeficiente Sísmico	Valor sugerido
$K_{v.g}$	0,03g
$K_{h.g}$	0,05g
Fator de Segurança na ocorrência de sismos	1,1

Fonte – Adaptado de Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens, ANA, 2016, p.33.

4.1.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para determinar se o desmorte efetuado ocorreu dentro das normas usa-se os sismógrafos. Nieble (2017) afirma que o sismógrafo é uma ferramenta que permite registrar as vibrações das partículas do terreno nas três direções utilizando sensores. Esses equipamentos possuem transdutores e softwares analisadores, isto permite que ele registre a velocidade de vibração pico da partícula, os dados sobre aceleração, deslocamento, amplitude, frequências e a pressão sonora. Os sismógrafos de engenharia são compostos genericamente por três partes:

- A. Geofone ou Sismômetro: Possui três transdutores ortogonais entre si que registram as vibrações em três eixos, sendo a correspondente as componentes longitudinal L, transversal T e Vertical V;
- B. Microfone: Fixado por uma haste, captura os ruídos e impactos do ar e;
- C. Unidade de armazenamento de dados digitais.

5 PARÂMETROS DE TESTES

Segundo Orlando, as forças que tendem a ocasionar o movimento da massa de solo são balanceadas pelos esforços resistentes. Assim, define-se fator de segurança (FS) como sendo a razão entre estas duas forças: resistência ao cisalhamento do solo (*res*) e a tensão cisalhante mobilizada (*mob*).

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{mob}}$$

Ou seja, o fator de segurança irá estimar em quanto a resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura vencerá os esforços solicitantes.

5.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DA ESTABILIDADE DE TALUDES

O propósito da análise de estabilidade de um talude é analisar o nível de segurança em relação a ruptura, levando em conta a necessidade em adotar medidas de estabilização ou para reavaliar algumas características de projeto, tendo-se assim obras com execução mais seguras e econômicas

De acordo com Silva (2013), entre os diferentes tipos de métodos existentes para análise de estabilidade de taludes, os mais utilizados atualmente são os baseados no método do equilíbrio limite devido à experiência acumulada ao longo dos anos e sua facilidade de aplicação. Tal método considera as hipóteses de que a massa de solo se comporta como um material rígido-plástico e que a mobilização de sua resistência se dará de maneira uniforme ao longo da superfície potencial de ruptura, ou seja, sua ruptura ocorrerá apenas quando todos os elementos, ao longo da superfície potencial de ruptura, alcançarem a resistência última.

“Com a consideração de que o solo se desloca como um corpo rígido ao longo de uma superfície de ruptura assume-se, geralmente, que se trata de um problema de estado plano de deformações. São executadas análises bidimensionais que supõem a existência de uma superfície idealizada de comprimento infinito. Assume-se que todas as seções transversais possuem geometria, poro-pressão e carregamentos idênticos e como consequência não existirão tensões cisalhantes nos planos entre elas. Nestas condições, a análise bidimensional é acurada. Na prática, devido às dimensões finitas das superfícies potenciais de ruptura e os efeitos de borda (contribuição da resistência do solo nas fronteiras laterais da superfície potencial de ruptura), as análises bidimensionais são geralmente a favor da segurança.” (SILVA, 2013, p.7).

Em consoante a Pereira (2013), a análise de estabilidade por equilíbrio limite tem uma grande aceitação, que se deve basicamente a três motivos: a simplicidade do método, ao nível satisfatório de acurácia dos seus resultados (no que diz respeito à segurança do maciço) e, o mais importante talvez, à relativa facilidade e baixo custo para se estimar ou obter os parâmetros de resistência do solo com a precisão necessária para o bom funcionamento do método. O Método das Fatias divide a massa potencialmente instável em diversas fatias verticais que são analisadas individualmente como um único bloco de escorregamento, sofrendo de maneira independente o efeito das variáveis do terreno - tipo de solo, nível d'água, carregamentos externos (NASCIMENTO, 2013, p.26)

5.1.1 MÉTODOS DE *FELLENIUS*

Segundo Pereira (2013), este método foi desenvolvido pelo engenheiro sueco *Fellenius* em 1936, e é conhecido como método sueco ou das fatias. Baseia-se na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície potencial de escorregamento de secção circular onde este volume é dividido em fatias verticais.

O Método de *Fellenius*, representado pela Figura 2, admite uma superfície de ruptura circular e o fator de segurança do talude é calculado unicamente através do equilíbrio de momentos, não levando em consideração as forças tangenciais e normais às paredes das fatias. É um método muito simples, que leva a uma superestimação do fator de segurança de cerca de 15% em relação ao de *Bishop* e isso o torna um método muito conservador gerando erros apreciáveis que podem ocorrer particularmente em casos de círculos profundos e poro-pressão elevadas (JUNIOR, 2015, p.27).

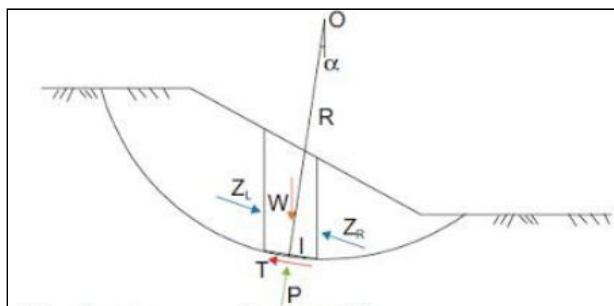


Figura 2 – Análise da superfície de ruptura admitida no método de *Fellenius*
Fonte – Junior, 2015, p. 29.

A aplicação do método pode ser dividida em etapas, sendo elas:

- Divisão da superfície potencial de ruptura do talude em fatias, assumindo que a base das fatias é linear;
- Execução do equilíbrio de forças para cada fatia, levando em conta que as tensões normais na base da fatia são geradas pelo peso do solo aplicado na fatia;
- Cálculo do equilíbrio do conjunto utilizando a equação de equilíbrio de momento.

A divisão de fatias (Figura 3) é realizada devido à complexidade para determinar as tensões atuantes na superfície como um todo, portanto, é feita distribuição das tensões em cada uma das lamelas para que assim, possa ser calculado o equilíbrio do conjunto inteiro.

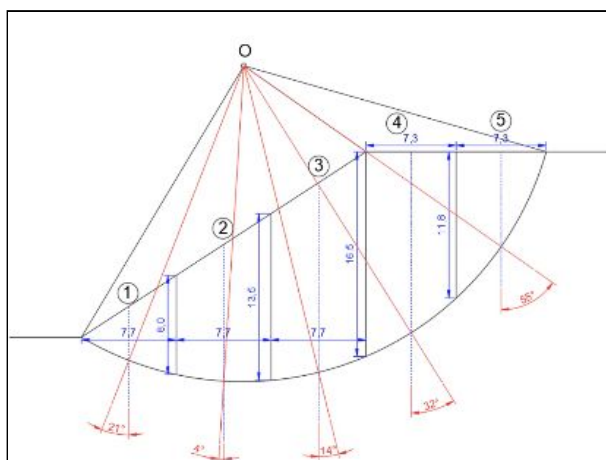


Figura 3 – Divisão da superfície potencial de ruptura do talude em fatias
Fonte – PANSERA, 2020.

Segundo este método, o fator de segurança, expresso pela equação (2), é uma relação entre a resistência ao corte real do talude e a tensão de corte crítica que tentam provocar a falha, ao longo de uma suposta superfície:

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot l + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot l) \cdot \tan \phi]}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (2)$$

Onde FS é o fator de segurança, c' é a coesão efetiva, W é o peso da fatia, α é ângulo formado pelo plano cujas tensões desejam-se conhecer e o plano maior, u é a tensão neutra, l é comprimento da base da fatia, e ϕ ângulo de atrito.

Nas superfícies de falhas circulares, onde existe um centro de giro e momentos resistentes e atuantes, o fator de segurança fica definido pela equação (3).

$$FS = \frac{\text{Resistência ao cisalhamento disponível}}{\text{Tensões atuantes}} \quad (3)$$

5.1.2 MÉTODO DE *BISHOP*

De acordo com Pereira (2013), este método foi proposto por *Bishop* (1955) 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, demonstrado pela figura 4.

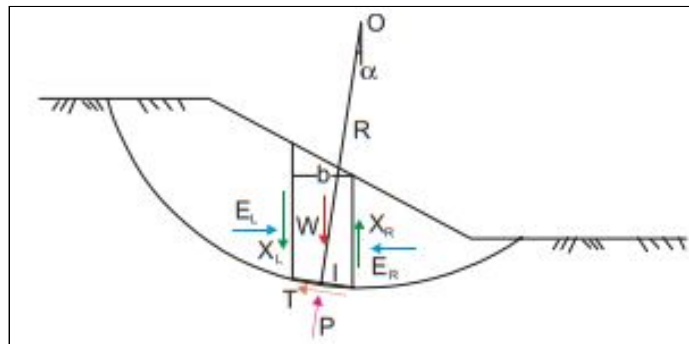


Figura 4 – Análise da superfície de ruptura admitida no método de *Bishop*.

Fonte – Junior, 2015, p. 29.

Considerando as relações entre as fatias vizinhas, o método de *Bishop* dispõe da suposição de que a resultante das forças entre as fatias é horizontal e as forças cisalhantes entre as mesmas são nulas, além disso, impõe o equilíbrio das forças verticais com demonstrado na equação (4) (JÚNIOR, 2015, p.29).

$$FS = \frac{\sum [c' \cdot b + (W - u \cdot b) \cdot \tan \phi]}{\sum W \cdot \sin \alpha} \cdot m_\alpha$$

(4)

Onde FS é o fator de segurança, c' é a coesão efetiva, W é o peso da fatia, α é ângulo formado pelo plano cujas

tensões desejam-se conhecer e o plano maior, u é a tensão neutra, b largura ou menor dimensão da área retangular carregada, ϕ ângulo de atrito, e m_s é o fator de segurança relacionada à ruptura circular.

5.1.3 MÉTODO DE MORGENSTERN & PRICE

O Método de Morgenstern & Price é considerado um dos métodos mais rigorosos para análise de estabilidade de taludes, atendendo todas as condições de equilíbrio de forças e momentos e podendo ser aplicado a qualquer superfície de ruptura. Contudo, é um método complexo e necessita do auxílio de um computador para o desenvolvimento dos cálculos (NASCIMENTO, 2013, p.29).

5.1.4 MÉTODO DE SPENCER

Segundo Silva (2013, p. 18), o método de Spencer foi, inicialmente, desenvolvido para análises cujas superfícies potenciais de ruptura possuam formato circular, sendo adaptado posteriormente para superfícies de formato não circular. É considerado, juntamente com o método de Morgenstern & Price, um método de análise rigoroso, pois satisfaz todas as condições de equilíbrio, tanto as de forças quanto as de momento.

Este método, reconhece que as forças de influência entre as fatias são paralelas entre si, sendo assim todas elas dispõem igualmente de um ângulo de inclinação que também será calculado como uma solução de equilíbrio, ao invés de ser admitido. Devido a sua complexidade, a verificação analítica do Método de Spencer se torna inviável, o que requer utilização de programas computacionais para execução dos cálculos.

5.2 SOFTWARES USADOS PARA O CÁLCULO DA ESTABILIDADE DOS TALUDES

Os programas de estabilidade de taludes são usados para o desenho e cálculo de taludes, para a análise de todo o tipo de encostas, aterros, cortes no solo, estruturas de contenção e muros de solo reforçado. Pode-se considerar a superfície de ruptura (deslizamento) circular (métodos de *Bishop*, *Fellenius*, *Janbu*, *Morgenstern-Price* ou *Spencer*) ou poligonal (métodos *Sarma*, *Janbu*, *Morgenstern-Price* ou *Spencer*).

Os principais *softwares* que existem para a análise da estabilidade de taludes, são os seguintes:

- *Slide*;
- *Geo5*;
- *Slope*; e
- *Cingcivil*

5.3 SOFTWARE SLIDE

O *software Slide* é um programa de análise da estabilidade dos taludes com o uso de métodos de equilíbrio limite 2D, para todos os tipos de terreno e encostas rochosas, barragens e paredes de contenção. O *Slide* inclui a construção de análises da infiltração de água subterrânea, análises probabilísticas, modelo multi panorama e suporte de desenho.

5.3.1 CARGA SÍSMICA

A carga sísmica é uma opção disponibilizada pelo software, que permite incluir o efeito do carregamento pseudo estático de vibrações na análise de equilíbrio limite. Sendo possível definir coeficientes sísmicos para as direções horizontal e vertical. Eles são coeficientes adimensionais que representam a aceleração máxima da vibração como uma fração da aceleração da gravidade.

A partir da definição do coeficiente sísmico, uma força sísmica será aplicada a cada fatia da seguinte forma (equação 6 e 7):

$$\text{Força Sísmica} = \text{Coeficiente Sísmico} * \text{Peso da Fatia} \quad (6) \quad \text{então,}$$

$$\text{Força Sísmica} = \text{Coeficiente sísmico} * \text{área da fatia} * \text{Peso unitário do material da fatia} \quad (7).$$

A aceleração devido à gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$ para unidades métricas) já está incorporada ao peso unitário do material (kN/m^3) e, portanto, não aparecem explicitamente na equação acima. E a força sísmica é aplicada através do centróide de cada fatia analisada.

5.3.2 COEFICIENTES SÍSMICOS HORIZONTAL E VERTICAL

O coeficiente sísmico horizontal é sempre positivo e representa uma força sísmica horizontal direcionada para fora da inclinação, ou seja, na direção da falha. Uma vez que a força sísmica horizontal no software *Slide* é sempre direcionada para fora da encosta, um coeficiente sísmico horizontal deve sempre diminuir o fator de segurança, para uma dada superfície de deslizamento, em comparação com o mesmo modelo sem carga sísmica aplicada.

Já o coeficiente sísmico vertical pode ser positivo ou negativo. Quando representa uma força sísmica vertical direcionada para baixo, é positivo. E quando representa uma força sísmica vertical direcionada para cima, é negativo. Um coeficiente sísmico vertical pode diminuir ou aumentar o fator de segurança, uma vez que a força sísmica vertical afeta a tensão normal e, portanto, a resistência ao cisalhamento, na base de cada fatia.

6 TESTES

Os métodos de análise de estabilidade simplificada calculam o fator de segurança de forma fácil e rápida, entretanto, não satisfazem completamente o equilíbrio de força e momento, existindo a possibilidade dos fatores de segurança determinados por esses métodos serem diferentes em comparação aos fatores de segurança definidos pelos métodos que satisfazem completamente a condição de equilíbrio.

Em vista disso, foi utilizado os métodos *Bishop* Simplificado, *Spencer* e *Morgenstern* (GLE), para definir o fator de segurança associado a estabilidade dos taludes da barragem à montante no software *Slide*.

Para simular uma barragem foram utilizados dois tipos de rejeitos intitulados como Jazida 1 e Jazida 2, com propriedades distintas e valores ilustrativos, além do material da fundação e filtro, demonstrados na tabela 2 .

Tabela 2 – Propriedades dos materiais constituintes da barragem

	Jazida 1	Fundação	Filtro	Jazida 2
Peso específico (kN/m^3)	21	18	17	22

Coesão (kN/m ²)	15	10	0	30
-----------------------------	----	----	---	----

Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

A estrutura, exposta pela figura 5, foi dimensionada no software e representa o dique de partida, com um talude externo de inclinação 2 para 1, com filtros vertical e horizontal com 1 metro de largura.

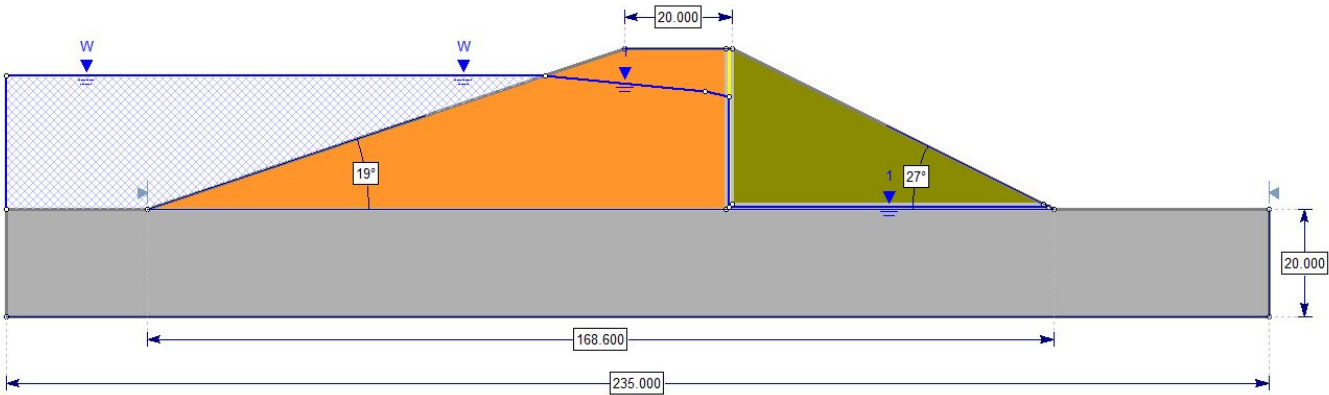


Figura 5 – Dimensões da estrutura
Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

Inicialmente o maciço foi analisado em condição estática, Kh = 0 e Kv = 0.

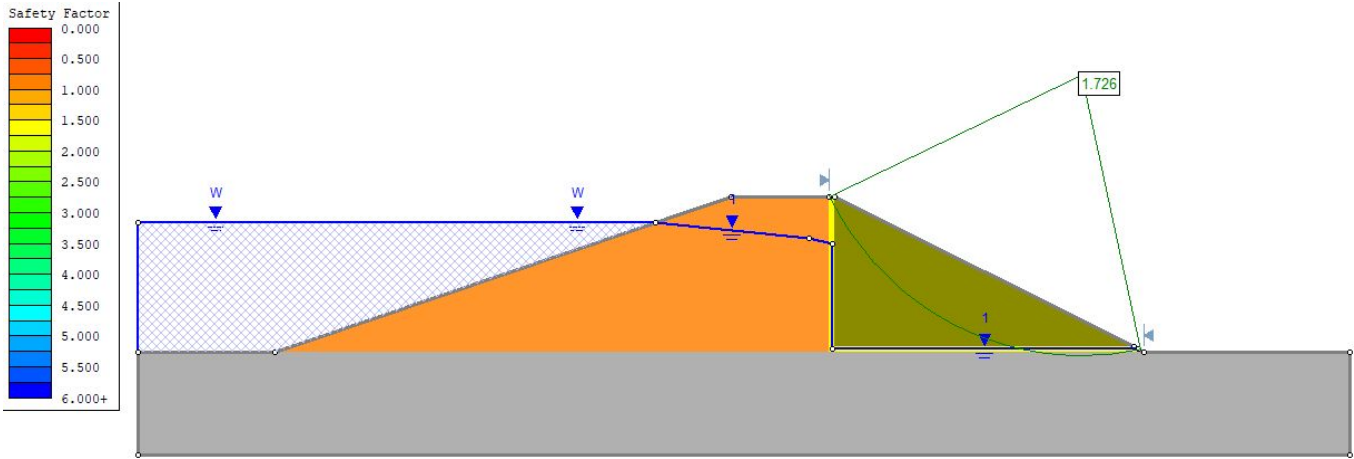


Figura 6 – Método de *Bishop Simplificado*

Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

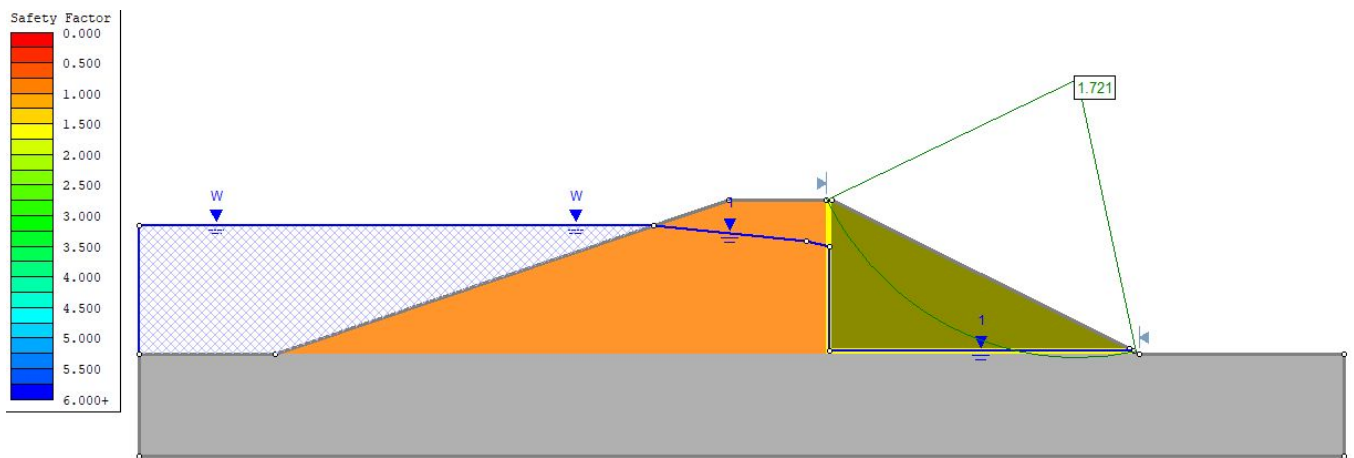


Figura 7 – Método de *Morgenstern & Price*
Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

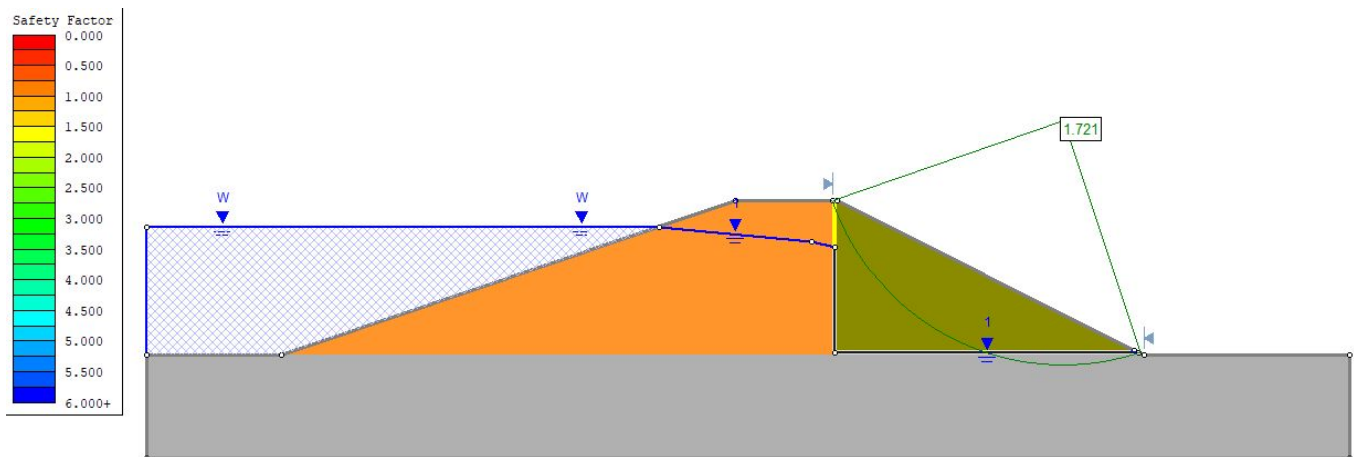


Figura 8 – Método de *Spencer*
Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

Logo após foi possível obter valores distintos com o uso de $K_h = 0,05$ e $K_v = 0,03$, como sugerido pela Tabela 2.

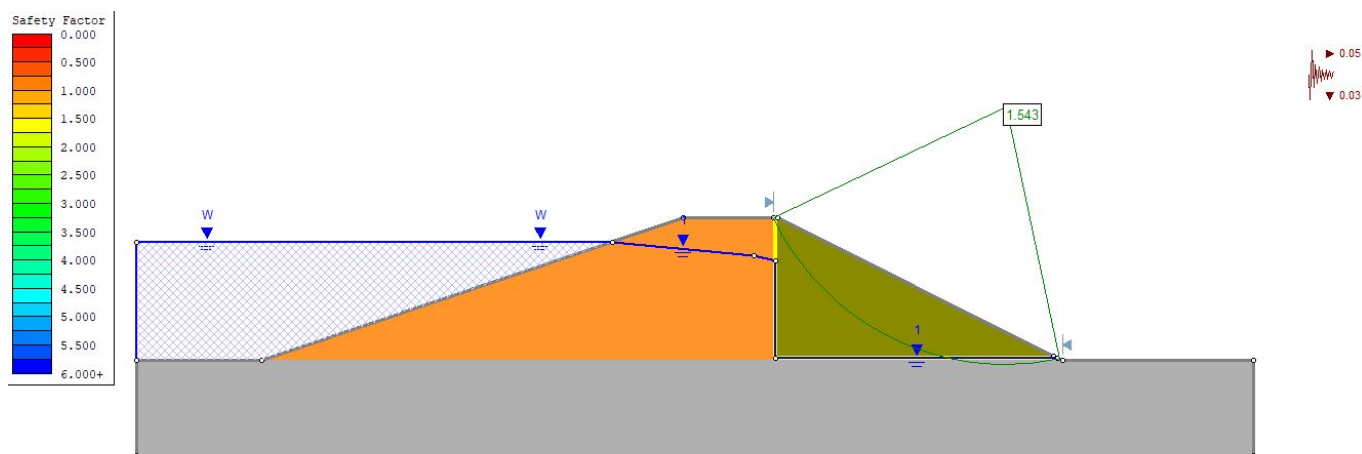


Figura 9 – Método de *Bishop Simplificado* durante evento sísmico
Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

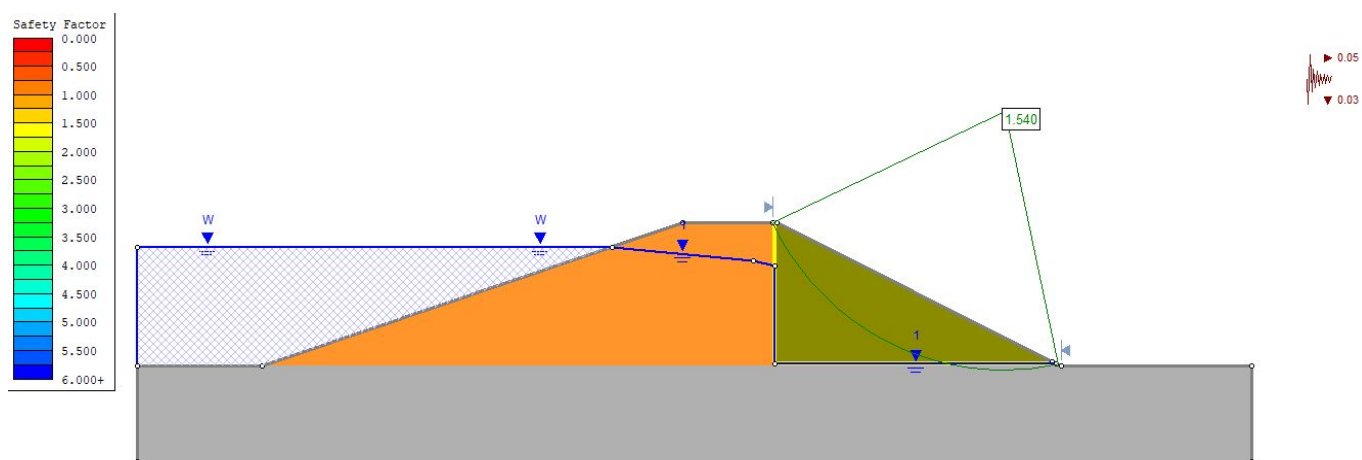


Figura 10 – Método de *Morgenstern & Price* durante evento sísmico
Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

Ademais, foi observado o efeito da sismicidade em um talude a montante com uma maior inclinação, onde inicialmente era de 27° para 31°.

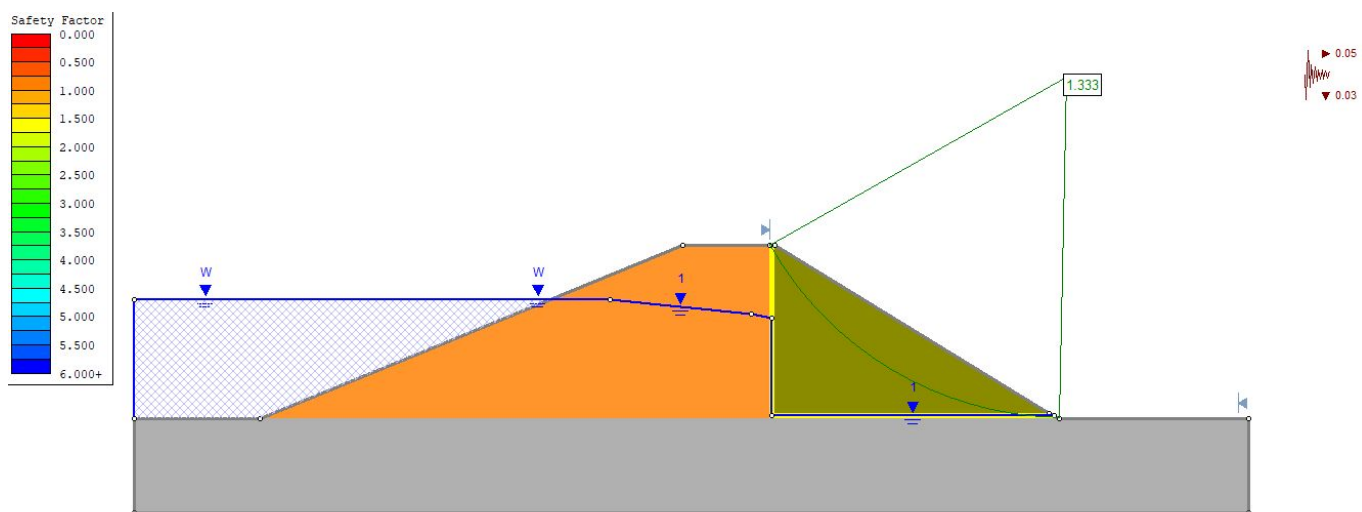


Figura 11 – Método de *Bishop Simplificado* com talude de maior inclinação
Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

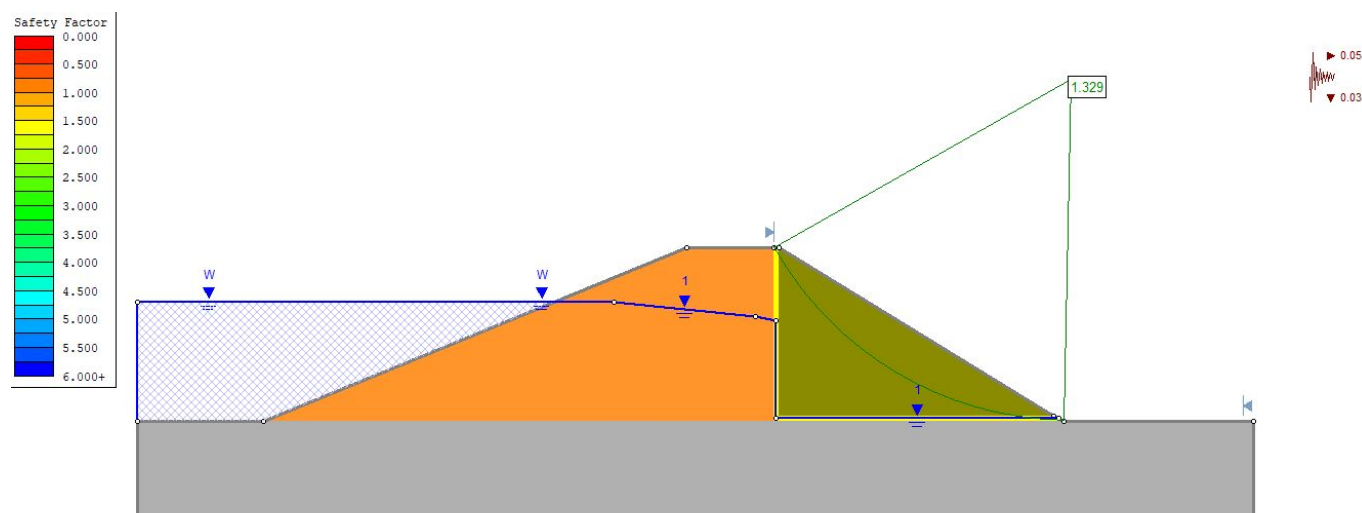


Figura 12 – Método de *Morgenstern & Price* com talude de maior inclinação
Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

É observável que os valores do fator de segurança diminuíram consideravelmente, entretanto, permanecem dentro da zona aceitável. Além da sismicidade é possível avaliar o maciço com outras variáveis, como a angulação do talude e as propriedades do material, no caso o rejeito. Sendo assim, diversos fatores podem influenciar na estabilidade da barragem, e quando são associados ao fator sísmico gerado pelas detonações, pode levar o talude à ruptura. Fato que pode ser observado na tabela abaixo:

Tabela 3 - Fatores de segurança obtidos na experimentação

Situações Problemas	Método de <i>Bishop Simplificado</i>	Método de <i>Morgenstern & Price</i>
$K_h = 0$ e $K_v = 0$	1,726	1,721
$K_h = 0,05$ e $K_v = 0,03$	1,543	1,540
27° para 31°	1,333	1,329

Fonte – Elaborado pelas autoras, 2020.

Sendo assim, é possível observar, em condição estática ($K_h = 0$ e $K_v = 0$), que os métodos de *Spencer* e *Morgenstern & Price* obtiveram valores mais conservadores que o método de *Bishop Simplificado*, com fatores de segurança dentro do normal, ficando acima de 1,5.

Utilizando $K_h = 0,05$ e $K_v = 0,03$, o método de *Morgenstern & Price* permaneceu com valores mais conservadores e o fator de segurança em ambos diminuiu consideravelmente, mas permaneceu dentro dos parâmetros desejados.

E com uma inclinação maior (27° para 31°) o fator de segurança diminuiu significativamente, entrando em uma faixa crítica de estabilidade, mas dentro dos parâmetros estabelecidos pela Agência Nacional das Águas (Tabela 2, em que sugere o valor de $FS > 1,1$).

8 CONCLUSÃO

O estudo do impacto do desmonte por explosivos nas barragens de alteamento a montante foi feito através de uma revisão bibliográfica, que permitiu o entendimento dos parâmetros necessários para realização dos testes e escolha dos métodos de análise. Então, estes fatores foram apontados juntamente com as variáveis envolvidas, possibilitando a execução de um estudo no *software* Slide Rocscience para o cálculo da estabilidade, em seguida foi feita a elaboração de uma cartilha com as informações e resultados obtidos.

A partir da análise realizada o que se pode concluir é que apesar do fator de segurança das barragens ser afetado pelas vibrações geradas pelo desmonte, tendo de certa forma uma influência na estabilidade dos taludes que compõem o barramento, estas não podem ser consideradas como a causa do rompimento de barragens a montante. Além dos coeficientes sísmicos gerados, fatores como inclinação do talude e composição do rejeito devem ser observados, pois estão diretamente relacionados com a estabilidade.

Portanto, todas as condições citadas devem ser avaliadas, buscando se fazer um desmonte controlado de modo que a estrutura da barragem não seja afetada de maneira significativa.

REFERÊNCIA

ANA, Agência Nacional de Águas. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens. Volume V. Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens.** Superintendência de Regulação (SRE). Brasília – DF ANA 2016. Disponível em: <volume-v-diretrizes-para-a-elaboracao-de-projetos-de-barragens (snisb.gov.br) >. Acesso em: 02 Dez. 2020.

ANM, Agência Nacional de Mineração. **Classificação das Barragens de Mineração Brasileiras - DATA BASE FEV/2019.** Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-caastro-nacional-de-barragens-de-mineracao/classificacao-oficial-anm>> Acesso em: 10 set. 2020.

ARAUJO, Cecilia Bhering de. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro.** 2006. 133 f.

Engenharia - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, Setembro 2006.

Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT. **12º Sinageo - Aplicação de Estratégias De Geoconservação No Geossítio Ponte de Pedra, Geopark Araripe/Ceará.** Disponível em: <<https://sinageo.org.br/2018/trabalhos/5/5-430-2157.html>> Acesso em: 30 set. 2020.

CAPUTO., H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos.** 6.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1988. 234p.

CARDOZO, F. A. C. Pimenta M. M. e Zingano, A. C. **Métodos Construtivos de Barragem de Rejeitos de Mineração- Uma Revisão.** HOLOS, Rio Grande do Sul, v. 08, Ano 32. 77-85. Dez. 2016. DOI: 10.15628/ holos.2016.5367

CETEM, Centro de Tecnologia Mineral. **Introdução ao Tratamento de Minérios.** Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 1 – pág. 3–20. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França.

CETEM, Centro de Tecnologia Mineral. **Introdução ao Tratamento de Minérios.** Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 19 – pág. 831–896. Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens.** Oficina de Textos, 2016.

CURI, Adilson. **Lavra de Minas.** São Paulo. Oficina de Textos, 2017. 90-97 p. ISBN 978-85-7975-250-6.

DORNELES, Felipe Tavares. **Controle e Prevenções de Vibrações e Ruídos Gerados por Desmonte de Rochas com Explosivos.** 2013. 95 p. Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2013.

FERREIRA, Fabiano Veloso. **Ação Dinâmica do Desmonte de Rochas por Explosivos em Barragem de Rejeito.** [manuscrito] / Fabiano Veloso Ferreira. - 2020. 73 f. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral. Área de Concentração: Lavra de Minas. Disponível em: <[https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/11890/1/DISSERTA%
c3%87%c3%83O_A%c3%a7%
c3%a3oDin%c3%a2micaDesmonte.pdf](https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/11890/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_A%c3%a7%c3%a3oDin%c3%a2micaDesmonte.pdf)> Acesso em: 02 Dez. 2020.

JOLY, Nelson Henrique. **ANÁLISE PARAMÉTRICA DA ESTABILIDADE DE UM TALUDE.** Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Campo Mourão, 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5229/1/CM_COECI_2014_2_10.pdf> Acesso em: 03 Dez. 2020.

JUNIOR, A. R. R. **Estudo de diferentes métodos de análises de estabilidade de taludes terrosos.** 2015. Monografia (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. **Geofísica de Exploração.** São Paulo. Oficina de Textos, 2009. 56-60p. ISBN: 978-85-86238-91-8.

NASCIMENTO, Luis Felipe Figueiredo. **Contribuição ao Estudo da Estabilidade de Taludes Considerando o Efeito da Sismicidade Natural no Brasil.** 2013. 151 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola politécnica, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10008222.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2020.

NIEBLE, Carlos Manoel. **Desmontes Cuidadosos com Explosivos: Aspectos de Engenharia e Ambientais.** São Paulo. Oficina de Texto, 2017. ISBN 978-85-7978-287-2

ORLANDO, Gabriel Ladeira Kingma. **DIFERENTES ABORDAGENS NA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA DE UMA ESTRUTURA EM SOLO GRAMPEADO APLICADAS A UM CASO REAL.** 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2018. p. 102. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10024098.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

PANSERA, Alexandre. **Exemplo Método de Fellenius e Bishop Simplificado - Estabilidade de Taludes.** 2020. (34m15s). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2wl8BprCsVc>>. Acesso em: 29 set. 2020.

PEREIRA, Tonismar dos Santos. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE TERRA.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. p. 77. Disponível em:

<[https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7565/PEREIRA%2C%20TONISMAR%20DOS%20SANTO S.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7565/PEREIRA%2C%20TONISMAR%20DOS%20SANTO%20S.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 2 out. 2020.

Portaria DNPM nº 237 de 18/10/2001. **Normas Reguladoras de Mineração**. Disponível em: <<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=18262>> Acesso em: 12. out. 2020.

RAFAEL, H. M. A. M. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito**. 2012. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro; Rio de Janeiro, 2012. f. 22. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20720/20720_3 .PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/20720/20720_3.PDF)>. Acesso em: 02 de dez. 2020.

SILVA, Adriano Rosário de Lima e. **Avaliação do potencial de liquefação em barragens de rejeito através de ensaios de campo**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2016. Disponível em: <

<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016986.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

SILVA, Vanessa Coutinho. **Métodos Analíticos para Avaliar a Contribuição de Estacas para o Fator de Segurança de Taludes**. 2013. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola politécnica, Rio de Janeiro, 2013. p. 73. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10006556.pdf>>. Acesso em: 2 out. 2020.

TRONCOSO, J.H., 1997 . **“Geotechnics of Tailings dams and sediments”** . *International Congress of Environmental Geotechnics*. ICEG pp.1405-142