

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM DE REJEITOS:

Estudo de Caso de Uma Barragem no Sul de Minas Gerais

Luís Otávio Simões Branquinho¹

Laura Carine Pereira Ribeiro²

RESUMO

O presente estudo visa avaliar e discutir a situação de estabilidade de uma barragem de rejeitos em uma empresa situada no Sul de Minas Gerais. Primeiramente foram levantados 10 estudos de 5 diferentes países sobre as recomendações dos fatores de segurança para este tipo de estrutura. Em seguida foram levantados os dados relativos às características da barragem de rejeitos, através de laudos técnicos das empresas de vistorias de anos anteriores e ainda com visitas ao campo. Em seguida calculou-se os fatores de segurança e foi realizada uma análise dos resultados obtidos. Os resultados obtidos indicam condição estável (FS de 1,21), porém em não conformidade com as recomendações dos estudos levantados. Por fim foi proposto a construção de berma no pé do talude a jusante da barragem e com esta obra, o fator de segurança obtido foi de 1,51, atendendo a todas as recomendações pesquisadas.

Palavras-chave: Estabilidade de talude. Barragem de Rejeito. Mineração.

1. INTRODUÇÃO

A atividade de mineração possui um papel fundamental para o estilo de vida do homem moderno. Em muitos empreendimentos minerários, existe a necessidade de construção e manutenção de estruturas que venham a estocar os resíduos que ainda não possuem uma forma economicamente viável de serem tratados com as tecnologias hoje disponíveis.

De acordo com o Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), o Brasil possui atualmente 909 barragens de mineração cadastradas no Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM), das quais 455 estão enquadradas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). (ANM,

¹ Engenheiro de Minas pela Unifal-MG, possui pós-graduação em Gestão Empresarial pela FGV, atualmente cursando Engenharia Civil no Unis-MG. E-mail: lobranquinho@gmail.com

² Profa. Dra. Laura Carine Pereira Ribeiro. Graduada em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Sul de Minas (UNIS), mestre e doutora em Engenharia Civil - Geotecnia pela Universidade Federal de Viçosa (UFV)

2022) Por este motivo, as barragens de rejeitos devem ser construídas e monitoradas de modo a garantirem a segurança de sua estrutura e de sua zona de influência.

Infelizmente, o rompimento destas estruturas, podendo ser citadas as tragédias ocorridas nos municípios de Mariana e Brumadinho em Minas Gerais, passou a ser tema constante nos noticiários, gerando questionamentos sobre sua existência e se realmente são estruturas seguras e o que deveria ser feito para que estas tragédias não viessem a ocorrer.

Considerando a importância de se ter uma estrutura estável desde sua construção e seu uso durante sua vida útil, este trabalho analisa uma barragem de rejeitos situada no Sul de Minas Gerais, seu monitoramento e verifica se esta obra é segura levando-se em consideração o fator de segurança mínimo recomendado por 10 diferentes publicações de órgãos regulatórios, associações e autores de 5 países. Caso não seja, serão analisadas opções para garantir a segurança da estrutura.

O trabalho desenvolvido conta inicialmente com um levantamento bibliográfico acerca dos tipos de barragens de terra, métodos de análise de estabilidade e mecanismos de ruptura e diretrizes/recomendações de Padrões Internacionais acerca do fator de segurança mínimo para barragens de rejeitos em operação. Para a avaliação de estabilidade da estrutura são utilizados os referenciais teóricos sobre barragem de rejeitos e dados coletados previamente pelo autor em 2014, (BRANQUINHO, 2014) cálculo do fator de segurança através de software e análise dos resultados. Na pesquisa inicial, foi realizada a análise de estabilidade da barragem, juntamente com um estudo paramétrico, relacionando altura do talude e fator de segurança, respeitando os mesmos materiais e proporções da barragem. A proposta deste estudo é uma atualização, através do levantamento de diretrizes e recomendações de Padrões Internacionais de 5 países diferentes na atualidade no que diz respeito ao fator de segurança mínimo para barragens em operação, e em caso da barragem objeto deste estudo não atingir os valores mínimos, propor uma recomendação e realizar nova análise mostrando o aumento do fator de segurança com esta nova alternativa.

É esperado que a barragem de rejeitos apresente um fator de segurança que proporcione segurança à estrutura e a sua zona de influência. Em caso de obtenção de resultados não considerados seguros, serão propostas medidas e intervenção de engenharia e por fim analisada sua segurança com as medidas propostas.

2. BARRAGENS DE REJEITO

As primeiras barragens de terra brasileiras foram construídas no Nordeste do país no início do século XX visando o plano de obras de combate à seca e foram projetadas levando-se em consideração apenas os conhecimentos empíricos. Já em 1938, em Curema-Paraíba, contava-se com os novos conhecimentos da Mecânica dos Solos. Somente em 1947 na construção da barragem do Vigário, atual barragem Terzaghi, localizada no estado do Rio de Janeiro, considerou-se a moderna técnica de projeto e construção de barragens de terra no Brasil. Esta obra foi um marco, pois pela primeira vez, Terzaghi empregou o filtro vertical ou chaminé como elemento de drenagem interna de barragens de terra. (MASSAD, 2003)

Atualmente centenas de barragens de terra e terra-enrocamento estão em operação no país, inclusive de enrocamento com face de concreto, como a barragem de Foz do Areia (PR), com 160m de altura, construída entre 1975-1979, sendo na época, a maior do mundo no gênero na época. (COPEL, 2022)

Barragens são estruturas de armazenamento de água ou qualquer outro material de acordo com a sua finalidade. Os tipos básicos de barragens são: (MASSAD, 2003)

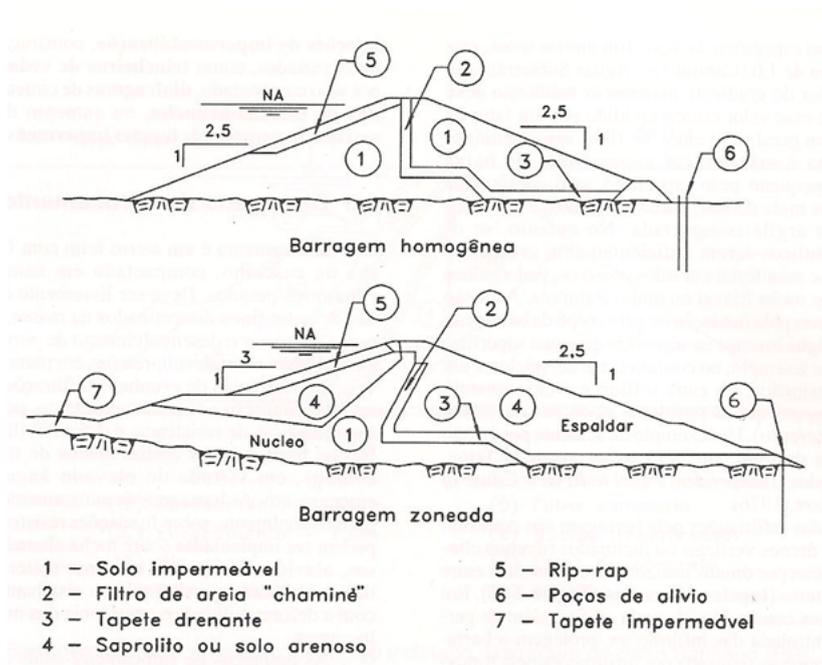
- Barragens de concreto gravidade (concreto massa);
- Barragens de concreto estrutural com contrafortes;
- Barragens de concreto em arco de dupla curvatura;
- Barragens de terra-enrocamento;
- Barragens de enrocamento com membrana de concreto;
- Barragens em aterro hidráulico;
- Barragens de terra homogênea ou zoneada;

O presente trabalho refere-se apenas a barragens de terra homogênea, conforme características do caso analisado.

Conforme citado acima, existem dois tipos de barragens de terra: Barragens homogêneas e barragens zoneadas. As barragens de terra homogêneas são as mais comuns, devido às condições topográficas (por exemplo, vales muito abertos) e da disponibilidade de material terroso no Brasil. Este tipo de barragem tolera fundações mais deformáveis, sendo possível sua construção sobre solos moles. (MASSAD, 2003) Quanto às barragens zoneadas, geralmente possuem um núcleo impermeável, existem duas zonas externas de material

granular, mais permeável e mais resistente ao deslizamento. (MASSAD, 2003) Segue abaixo um esquema geral dos tipos de barragens (Figura 1):

Figura 1: Barragens homogêneas e zoneadas.



Fonte: MASSAD (2003)

A avaliação correta de segurança de uma barragem deve levar em consideração uma análise criteriosa e exata de sua estabilidade, sendo fundamentais os parâmetros de resistência, coesão e ângulo de atrito do solo que foi utilizado para a construção desta. (DIAS, 2017)

A construção das barragens de terra com seção homogênea e altura entre 10-15m são executadas com taludes de jusante e montante com inclinações 2:1 e 3:1. Levando isto em consideração, raramente a inclinação dos taludes é baseada em parâmetros criteriosos de projeto obtidos tanto para o aterro quanto para sua fundação. (CARVALHO, PASCHOALIN, 2004)

Uma barragem possui diferentes solicitações durante as diversas etapas de sua vida útil, ou seja, durante e após sua construção e no ato de enchimento total de seu reservatório. Considerando estes aspectos, é importante verificar os fatores de segurança em cada etapa.

As situações críticas que devem ser consideradas são: fim da construção, fluxo em regime permanente com o reservatório cheio e esvaziamento rápido do reservatório. (MASSAD, 2003) Neste trabalho tem-se como situação crítica apenas o segundo item relacionado à percolação de água (fluxo permanente) em que sua pressão é favorável à

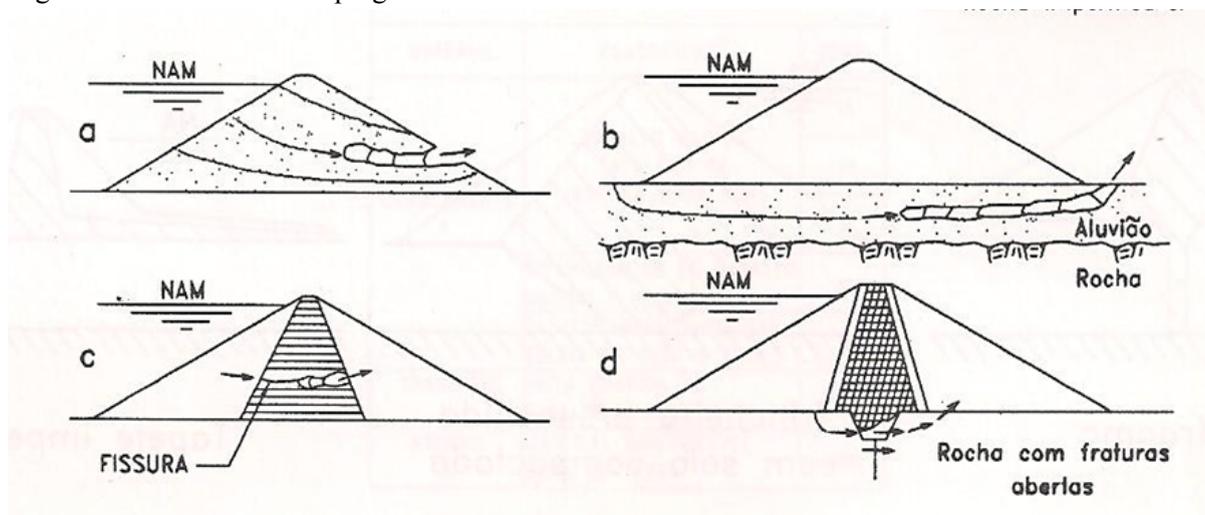
estabilidade do talude de montante e desfavorável à do talude de jusante. Os outros dois itens não são críticos neste estudo, porque a barragem já foi construída e não existem planos de esvaziamento do reservatório.

Durante a vida útil de uma barragem, diversos mecanismos de acidentes podem ocorrer devido a elaboração de projeto, execução e manutenção. São estes:

- Galgamento (*overtopping*);
- Deslizamento de taludes;
- Erosão interna (piping);
- Fissuramento.

O problema que mais preocupa um projetista é o *Piping* (“Erosão subterrânea Retrogressiva”), quando o gradiente de saída iguala-se ao peso específico do subsolo, e pode ocorrer no próprio corpo da barragem ou nas suas fundações. Este é provocado pela ausência de filtros, condições de compactação do maciço terroso, transição inadequada entre solo e material granular e presença de fundação arenosa. Seguem abaixo alguns exemplos que provocam o piping (Figura 2): (MASSAD, 2003)

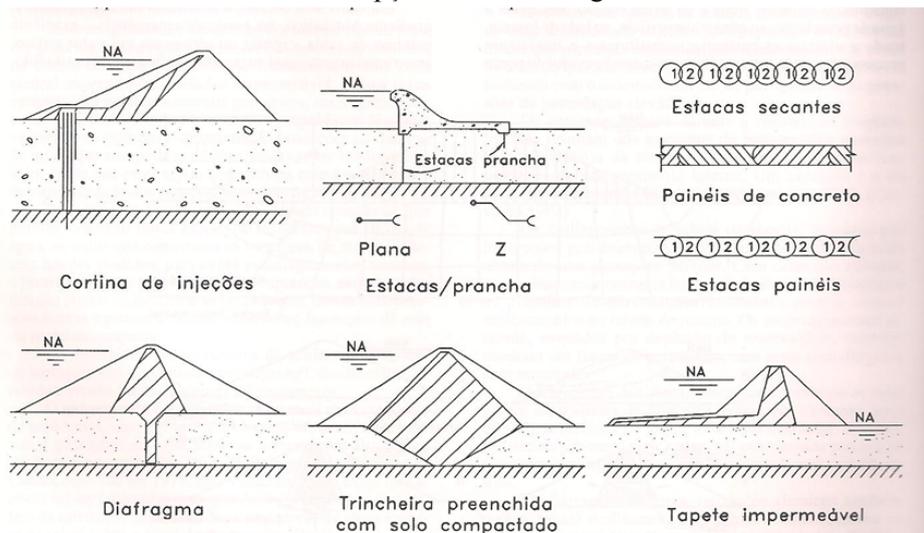
Figura 2: Ocorrências de Piping.



Fonte: MASSAD (2003).

Para a correção deste problema podem ser utilizados os seguintes recursos técnicos, que visam a interrupção do fluxo de água (Figura 3):

Figura 3: Recursos técnicos de interrupção de fluxo de água.



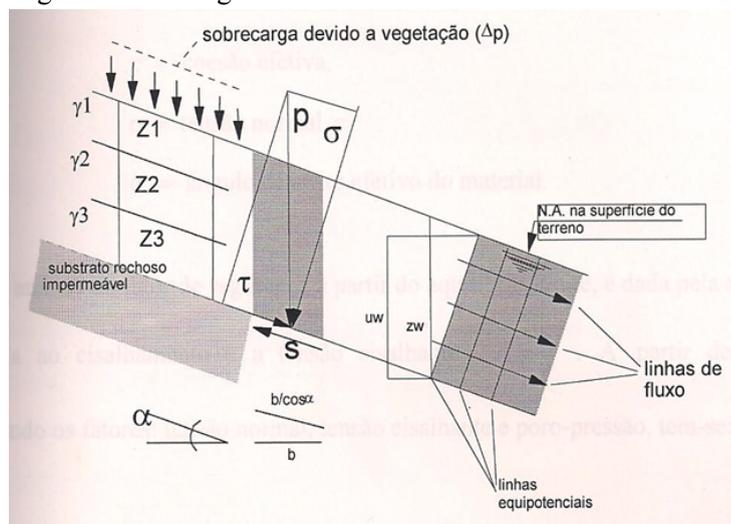
Fonte: MASSAD (2003).

2.1 Análise de Estabilidade

As superfícies de ruptura múltiplas e variáveis que podem ocorrer em um talude de solo são: Escorregamentos Translacionais e Rotacionais.

Nos Escorregamentos Translacionais, os mecanismos de ruptura estão relacionados a maciços impermeáveis, camada de intemperismo delgada, rede de fluxo paralela à superfície, maciços extremamente fraturados, fluxo vertical e diminuição dos parâmetros de resistência do solo. (FREIRE, 2005) Seguem abaixo os fatores e variáveis que influenciam os escorregamentos translacionais:

Figura 4: Escorregamento Translacional. Modificado.



Fonte: FREIRE (2005).

A estabilidade de talude é geralmente analisada a partir do fator de segurança. Este é definido como a razão entre a resistência média ao cisalhamento e a tensão média ao cisalhamento ao longo da superfície potencial de ruptura. Portanto o fator de segurança neste caso é dado por:

$$FS = \frac{\tau}{\sigma} \quad (1)$$

Substituindo as variáveis e considerando o “Modelo de Análise de Morh Coulomb” tem-se:

$$FS = \frac{c' + (\gamma Z + \Delta p - \gamma_w Z_w) \cos^2 \alpha \tan \phi}{(\gamma Z + \Delta p) \sin \alpha \cos \alpha} \quad (2)$$

Em que,

c' : Coesão efetiva do material (kPa)

Γ : Peso específico (kN/m³);

Z : Espessuras da camada de solo;

Δp : sobrecarga (vegetação ou equipamento);

γ_w : Peso Específico da água;

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

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

$\tan \phi$: tangente do ângulo de atrito do material;

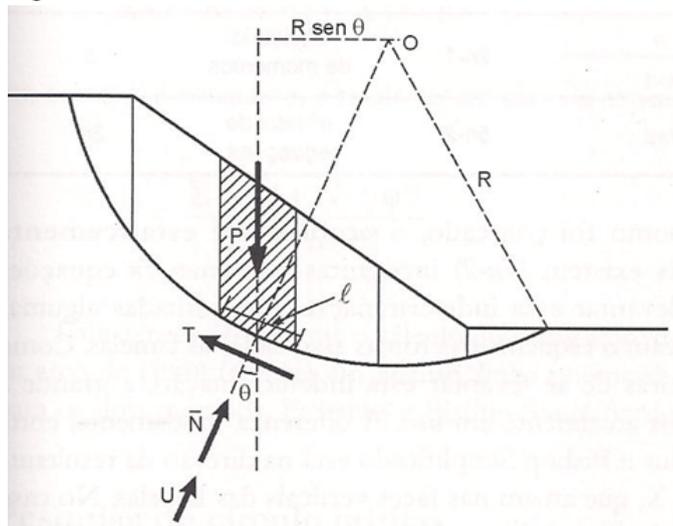
$\sin \alpha$: componente da fórmula peso;

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

A equação 2 possibilita o cálculo do fator de segurança para um possível escorregamento translacional do talude a ser analisado. (MASSAD, 2003)

O segundo mecanismo de ruptura é o de movimento rotacional. A Figura 5 ilustra as variáveis e fatores que este mecanismo leva em consideração.

Figura 5: Movimento rotacional e sua divisão de fatias.

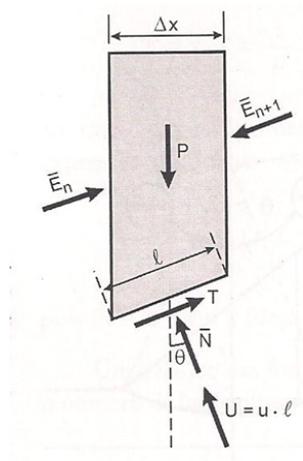


Fonte: MASSAD (2003).

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

Conforme a figura acima, este método analisa diversas superfícies de ruptura, e para aquela que apresentar o menor fator de segurança deverá realizar-se o cálculo. Seguem abaixo os fatores e variáveis que são analisados em cada fatia (Figura 6): (MASSAD, 2003)

Figura 6: Análise de uma fatia.



Fonte: MASSAD (2003).

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

$$FS = \frac{\sum c' + (P \cdot \cos\theta - \mu \cdot \Delta x \cdot \sec\theta) \cdot \tan\phi'}{\sum (P \cdot \sin\theta)} \text{ na superfície crítica investigada.} \quad (3)$$

Atualmente existem diversos métodos para determinar o fator de segurança de uma determinada superfície. Segundo Calle (2000), a seleção do modo de ruptura possível deve-se basear no conhecimento da geologia in situ e do perfil do solo intemperizado. Normalmente são utilizadas superfícies circulares para facilitar a solução dos casos. Existem diversos métodos para o cálculo do fator de segurança de uma superfície como: Fellenius (1936), Bishop (1955), Bishop simplificado, Janbu (1973), Morgenstern & Price (1965), Spencer (1967), Madej (1971) e Sarma (1973). Seguem abaixo algumas considerações sobre cada método: (Calle, 2000)

- O método de Fellenius (1936) não considera as forças entre fatias (circular).
- Bishop simplificado: apresenta a resultante das forças entre fatias na horizontal e o fator de segurança é determinado a partir da consideração de equilíbrio de momentos.

- Janbu simplificado: Resultante das forças entre fatias é horizontal. Um fator de correção empírico é usado para levar em conta os efeitos das forças tangenciais. O fator de segurança é determinado a partir do equilíbrio de forças.

- Janbu Generalizado: Neste método a localização da força normal entre fatias é definida por uma linha de empuxo arbitrária. O fator de segurança é determinado a partir do equilíbrio de forças e de momentos.

- Spencer: Resultantes das forças entre fatias têm inclinações constantes através da massa do solo. É um método muito semelhante ao de Morgenstern & Price.

- Morgenstern & Price: Direção da resultante das forças entre fatias são definidas usando uma função arbitrária $f(x)$. A parcela de $f(x)$ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e de momentos é calculada. As fatias possuem uma espessura infinitesimal.

- Sarma: Resistência interna entre fatias é mobilizada. A incógnita λ é introduzida. A distribuição das resultantes das forças tangenciais entre fatias são definidas com base em uma função arbitrária. A porcentagem da função λ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e momentos é calculada.

Whitman & Baley (1967) e Wright (1969) realizaram estudos comparativos dos métodos e chegaram as seguintes conclusões: (Calle, 2000)

- Os valores do FS calculados pelos métodos Morgenstern&Price e o Janbu generalizado são bem próximos;

- No método simplificado de Bishop, os valores de FS calculados são muitas vezes comparáveis com aqueles obtidos pelos métodos que satisfazem todas as condições de equilíbrio limite. As diferenças encontradas variam de 0 a 6 % levando-se em consideração uma ampla variedade de condição de inclinação de talude, pressão neutra e resistência ao cisalhamento;

- Geralmente, os valores de FS calculados pelo método de Fellenius são menores que aqueles obtidos pelos métodos que satisfazem todas as condições de equilíbrio e também menores que aqueles calculados pelo método simplificado Bishop.

2.2 Fator de Segurança – Diretrizes e Recomendações de Padrões Internacionais

Para melhor entendimento de como serão estudadas, baseadas e discutidas as avaliações de condições de segurança de barragens existentes, em operação ou em desativação, é necessária uma revisão crítica das principais recomendações disponibilizadas por reguladores internacionais, bem como por entidades reconhecidas.

As rupturas de Mount Polley (Colúmbia Britânica, Canadá) em 2014, Fundão (Mariana, MG) em 2016, Cadia (New South Wales, Austrália) em 2018 e Brumadinho (Brumadinho, MG) em 2019, provocaram mudanças relevantes nos procedimentos, proposições e exigências, a fim de evitar novas catástrofes.

O princípio de cumprimento de fatores mínimos de segurança, aceitáveis na avaliação de estabilidade de barragens de terra de qualquer tipo e uso, foi sendo ajustado gradualmente ao longo dos anos. Os recentes grandes acidentes, citados acima, obrigaram os órgãos reguladores e empreendimentos do ramo a questionar e revisar as diretrizes de padrões internacionais e as recomendações de fatores de segurança mínimos aceitáveis para as diferentes condições de carregamento que se aplicam a estas obras de terra. Hoje, infelizmente, ainda não existe um consenso aceitável para os valores-limite recomendados. (Schnaid et al., 2020)

Portanto, visando utilizar dados e fatores de segurança mais indicados possíveis, foram levantadas 10 publicações de órgãos regulatórios, associações e autores de diferentes partes do mundo. Para não ficar muito extenso, será especificado abaixo apenas o fator mínimo de segurança indicado para barragens de rejeitos com operações de longo prazo, drenagem constante e estacionária e reservatório no nível máximo normal, que é a situação encontrada na barragem objeto deste estudo. Seguem abaixo as publicações:

- **Austrália** - ANCOLD's (*Australian National Committee on Large Dams*). *Guidelines on tailings dams - Planning, design, construction, operation and closure - Revision 1* (ANCOLD, 2019);

Para a condição de uso de longo prazo e barragem drenada, o fator de segurança mínimo é de 1,5 e deve-se considerar a força efetiva para avaliação da resistência ao cisalhamento.

- **Canadá** - *Canadian Dam Association's application of dam safety guidelines to mining dams* (CDA, 2014) *and revision* (CDA, 2019);

Para a condição de uso de longo prazo, infiltração em estado estacionário e nível normal do reservatório, deve-se considerar um fator de segurança mínimo de 1,5 e analisado o talude à jusante da barragem.

- **Brasil** - ABNT's NBR 13028:2017 Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos (ABNT, 2017);

Para a condição de operação com fluxo normal, deve-se considerar um fator de segurança mínimo de 1,5 e analisar o talude à jusante da barragem.

- **África do Sul** - *South African Bureau of Standards' mine residue code of practice* (SABS, 1998) *and South African Government's Mining Residue Regulations* (South African Government Department of Environmental Affairs, 2015);

O documento apresenta objetivos, princípios e os requerimentos mínimos para as boas práticas ao longo das várias fases e ciclos das barragens de rejeitos. Porém a publicação não especifica um valor mínimo requerido de fator de segurança. Para pilhas de rejeitos e depósitos construídos com este material, o regulador exige que se atinja um fator de segurança mínimo de 1,5.

- **Hezra and Phillips' design of dams for mining industry** (Hezra and Phillips, 2017);

Os autores desta publicação recomendam, para uma barragem classificada como significativa consequência e operando com nível médio de incertezas nos dados, avaliação, condições de carregamento, etc., um valor mínimo de fator de segurança de 1,5.

Há também a recomendação de mudança neste valor em caso de ser uma barragem existente, fundação de solo ou rocha fraca, entre outros. Para efeito deste estudo será considerado o valor de 1,5.

- **Fell et. al's Geotechnical Engineering of Dams** (Fell et. al, 2015);

Os autores desta publicação recomendam, para uma barragem operando com nível máximo normal, um fator mínimo de segurança de 1,5.

- **EUA** - *USACE's slope stability - Engineer manual* (USACE, 2003);

Para condição de análise de longo prazo (infiltração constante, pool de armazenamento máximo, crista do vertedouro ou topo das comportas), talude a jusante, o fator de segurança mínimo é de 1,5.

- **EUA** - *USBR's design standards no. 13: Embankment dams - Chapter 4: Static stability analysis* (USBR, 2011);

Para características de pressão dos poros de percolação em estado estacionário, o fator de segurança mínimo recomendado é de 1,5.

- **EUA** - *FERC's engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects - Chapter 4 – Embankment dams* (FERC, 2006);

Para condições de uso considerando infiltração constante com armazenamento máximo do reservatório, o fator de segurança mínimo recomendado é de 1,5 e deve-se analisar os taludes a montante e a jusante.

- **Brasil** – *CBDB Comitê Brasileiro de Barragens - Guia Básico de Segurança de Barragens* (CBdB, 2001);

Para a barragem sendo operada com percolação de estado estacionário com reservatório no nível máximo normal, o fator de segurança mínimo recomendado é de 1,5, sendo analisado o talude à jusante.

Portanto, para todas as publicações citadas acima, levando-se em consideração uma abrangência de 5 países, há uma recomendação de fator de segurança mínimo de 1,5 para operação de barragem de longo prazo, infiltração constante, com armazenamento máximo normal do reservatório. Algumas publicações, como FERC's, além de recomendar a análise no talude à jusante, recomenda também analisar o talude a montante da barragem.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida por meio de um estudo de caso da avaliação de estabilidade de uma barragem de rejeitos com altura de talude a jusante de 15 metros e montante de 18 metros, de médio porte, localizada no Sul de Minas Gerais.

Para a realização deste trabalho, optou-se por dividir as atividades em 4 (quatro) etapas: Levantamento bibliográfico em relação ao fator de segurança mínimo a ser utilizado para a segurança das barragens, levantamento de dados, cálculo do fator de segurança e

análise dos resultados. As 3 últimas etapas contaram com dados obtidos em trabalho prévio realizado pelo autor no ano de 2014 e intitulado “Análise de Estabilidade de Barragens de Rejeitos em Planta Industrial de Poços de Caldas - MG.” (BRANQUINHO, 2014) que abrangem geometria da estrutura, materiais, referencial teórico, estudo paramétrico relacionando altura x fator de segurança e análise de estabilidade. Para este estudo foi levantado o fator de segurança mínimo mais atual utilizado em 5 diferentes países e como a barragem não atingiu os níveis mínimos recomendados, foi proposto uma melhoria e realizado o estudo para garantir o atendimento aos requisitos atuais.

Na primeira etapa foram levantadas um total de 10 recomendações, incluindo uma norma e indicações de fatores mínimos de segurança de barragens de rejeitos publicadas por associações, autores e órgãos regulatórios de diferentes partes do mundo, abrangendo 5 países: África do Sul, Austrália, Brasil, Canadá e Estados Unidos.

Na segunda etapa, foi realizada a coleta, tratamento e seleção dos dados necessários para o cálculo da estabilidade dos taludes da barragem de rejeitos da empresa que realiza a lavra e beneficiamento de bauxita, abrangendo peso específico, dados geométricos, coesão, ângulo de atrito e rede de fluxo da água. Os dados foram obtidos através de vistorias conforme consta e determina o DNPM, por uma empresa especializada entre os anos de 2004 a 2007.

A terceira etapa foi a execução dos cálculos utilizando os métodos: Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, Janbu e Fellenius, para a avaliação da estabilidade da barragem.

Por fim, com os resultados obtidos, foi realizada uma análise através do cálculo do fator de segurança do talude da barragem e discussão sobre a barragem, verificando se esta é considerada segura de acordo com os fatores de segurança propostos pelas diretrizes e recomendações de padrões internacionais. Como a barragem não atingiu o fator de segurança mínimo, foi proposta uma obra de melhoria, a fim de aumentar o fator de segurança e analisada sua eficiência.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Levantamento de Dados

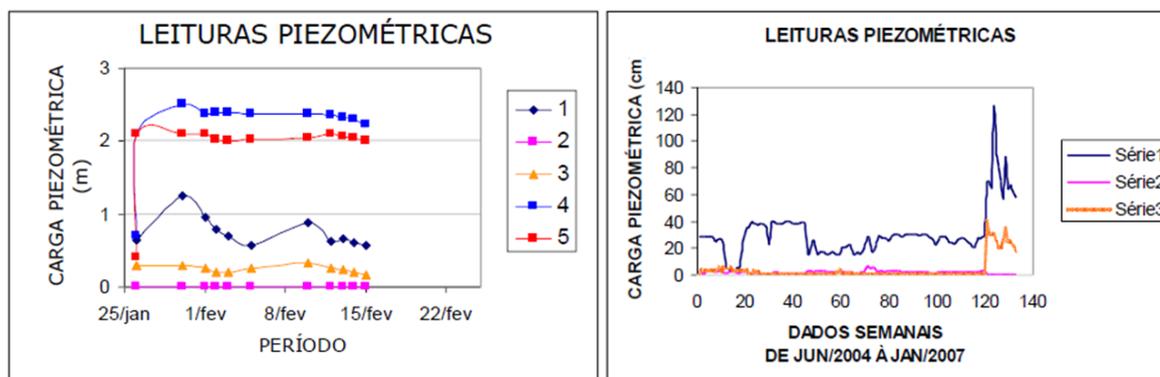
Inicialmente, para caracterização da barragem, foram selecionados os fatores determinantes na estabilidade:

- Peso específico: peso do material por unidade de volume;
- Ângulo de atrito: medida de resistência ao cisalhamento dos solos decorrente do atrito entre as partículas;
- Coesão: medida de resistência decorrente da ação de forças cimentantes presentes entre as partículas dos solos;
- Dados geométricos das barragens: forma, dimensão e geometria da barragem;
- Rede de fluxo da água: água percolando na barragem.

A execução dos ensaios e medições estão disponíveis no trabalho anterior intitulado “Análise de Estabilidade de Barragens de Rejeitos em Planta Industrial de Poços de Caldas - MG.” (BRANQUINHO, 2014).

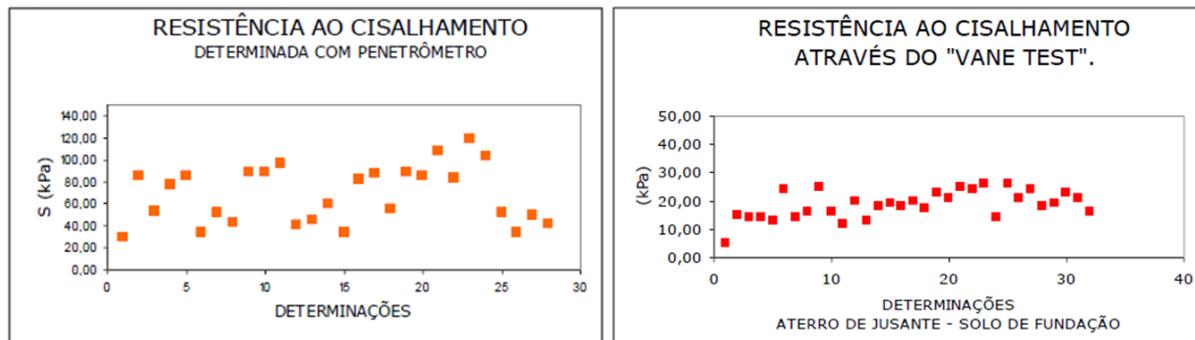
Os dados foram obtidos inicialmente através de laudos técnicos arquivados pelas empresas que prestam consultoria, com objetivo de monitorar e regularizar a situação das barragens ao longo dos anos, como exigem a ANM e a SEMAD.

Figura 7: Dados de campo.



Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007)

Figura 8: Dados de campo.

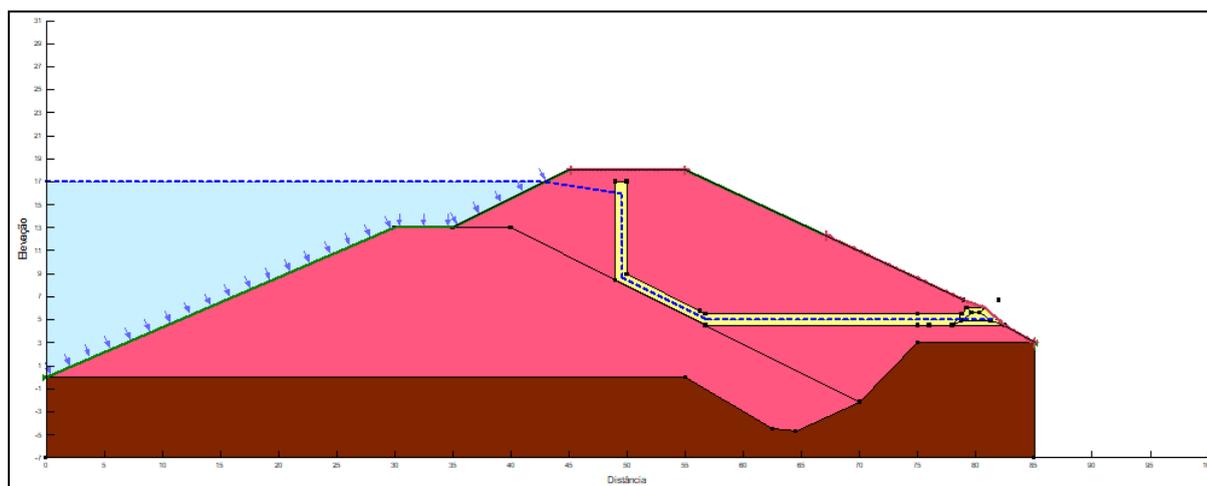


Fonte: MÉGARA PROJETOS E CONSULTORIA (2007)

Na barragem analisada, com dados obtidos através de relatórios técnicos disponibilizados pela empresa de consultoria na época, o talude a montante apresenta 18 metros de altura total, dividido em dois taludes, em que o primeiro, mais abaixo, possui 13 metros de altura e uma crista com berma de 5 metros de comprimento. O segundo talude possui 5 metros de comprimento. Os dois taludes possuem inclinação 2:1 e presença de rip-rap (revestimento com blocos de pedra). A berma possui 10 metros de comprimento.

O talude a jusante consta de 15 metros de altura total e no segundo metro apresenta enrocamento em forma de trapézio com dimensões de base maior igual a 4,5 m, base menor de 1,5 m e altura de 1,5 m. Neste enrocamento existe uma camada de 0,4 m de brita granulada revestindo este enrocamento e 0,4 m, proveniente do filtro horizontal. Segue abaixo (Figura 9) a barragem plotada no programa GeoStudio 2021.4:

Figura 9: Barragem plotada no software GeoStudio.



Fonte: Autor

Sobre os dados referentes aos materiais, estes foram obtidos através de uma vistoria ocorrida na barragem conforme consta e determina o DNPM, por uma empresa especializada entre os anos de 2004 a 2007. Segue abaixo os dados na Tabela 1:

Tabela 1: Características dos materiais da barragem.

Tipos de materiais	Argila Siltosa - A	Argila Saturada - B	Filtro - C	Enrocamento - D	Brita Granulada - E
Peso Específico (kN/m ³)	12	21	19	22	20
Ângulo de Atrito (°)	18	18	45	45	42
Coesão (kPa)	12	18	0	0	0

Fonte: Autor

O material de fundação da barragem é rocha sã e impermeável. Por isto não foram informados seus valores de peso específico, ângulo de atrito e coesão. O nível de água da barragem foi definido como 1 metro do topo do talude a montante da barragem.

Infelizmente, a versão estudante disponibilizada pelo software GeoStudio 2021.4, possui a limitação de ser possível utilizar apenas 3 materiais. Portanto, para efeito de entrada de dados da barragem, foi considerada como sendo toda de Argila Siltosa - A, pois possui uma menor coesão, trabalhando sempre a favor da segurança.

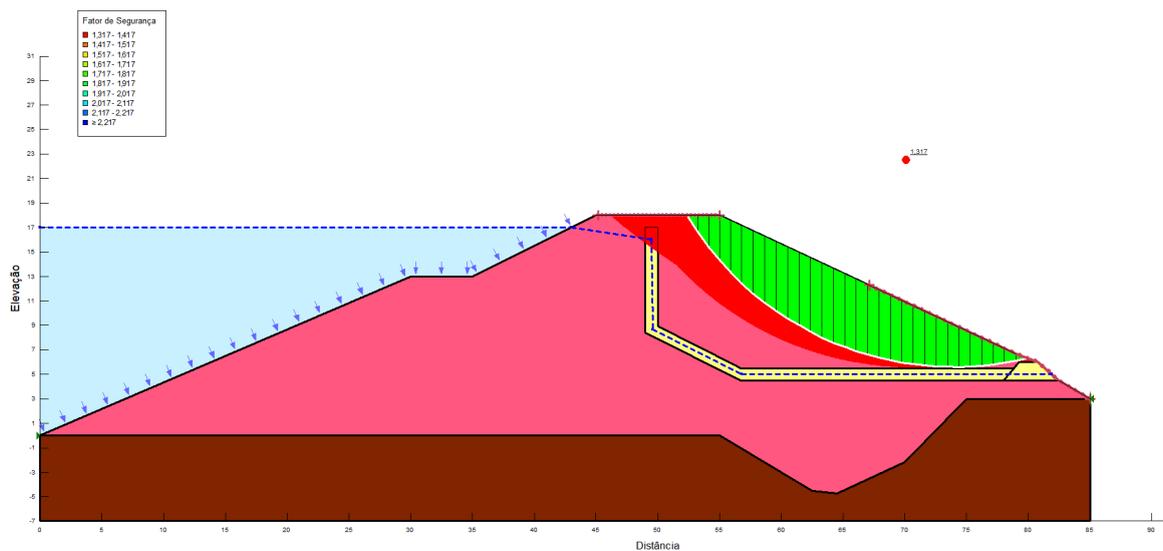
4.2 Cálculos do Fator de Segurança

Para o cálculo do fator de segurança foi utilizado o programa computacional GeoStudio 2021.4 versão estudante, e utilizado os seguintes métodos:

- Bishop (1955);
- Fellenius (1936);
- Janbu (1973);
- Morgenstern & Price (1965);
- Spencer (1967);

Os dados utilizados estão expressos no subitem 5.1 – Levantamento de Dados. Segue abaixo o cálculo do fator de segurança da barragem através do método Bishop (Figura 10):

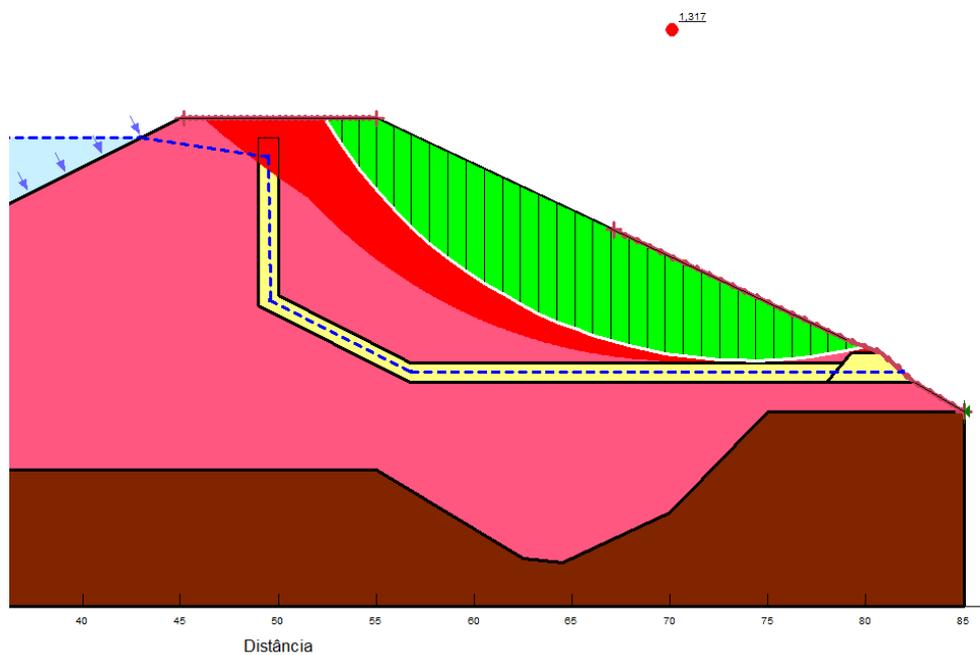
Figura 10: Cálculo do fator de segurança.



Fonte: Autor.

Segue abaixo uma ampliação com foco na ruptura circular mais provável, através do método Bishop (Figura 11):

Figura 11: Superfície com menor fator de segurança.



Fonte: Autor.

Para simplificar a demonstração dos fatores de segurança obtidos através dos outros métodos, estes foram dispostos na tabela abaixo:

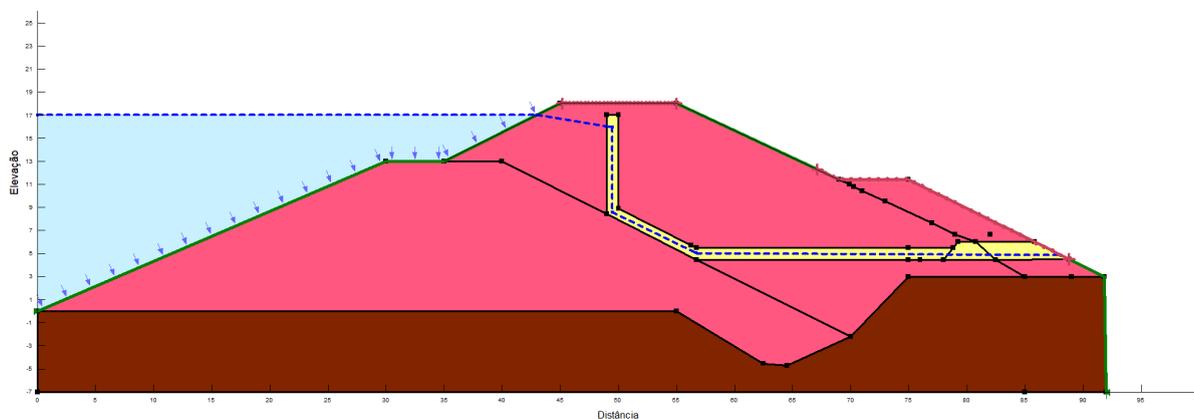
Tabela 2: Fatores de segurança obtidos.

Método de Análise	Bishop	Fellenius	Janbu	Morgenstern & Price	Spencer
Fator de Segurança	1,31	1,24	1,21	1,31	1,31

Fonte: Autor

Analisando os valores de fator de segurança, podemos constatar que em todos os métodos foi obtido valor inferior a 1,5. Conforme levantado nas 10 publicações de órgãos regulatórios, associações e autores de diferentes, o fator de segurança mínimo aceitável é de 1,5. Portanto, será necessário propor uma alternativa a fim de aumentar este fator de segurança. Uma alternativa usual, que se mostra economicamente viável, é a construção de uma berma no pé do talude a jusante, causando um peso extra na área construída e também um aumento no fator de segurança naquelas superfícies de ruptura. Segue abaixo obra proposta pelo autor:

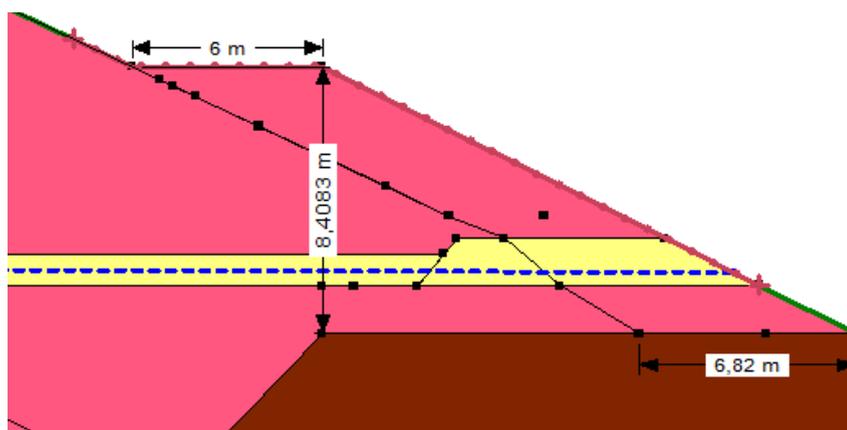
Figura 12: Berma no pé do talude a jusante proposta.



Fonte: Autor.

A berma proposta possui 8,40m de altura, com inclinação 2:1. Segue abaixo croqui:

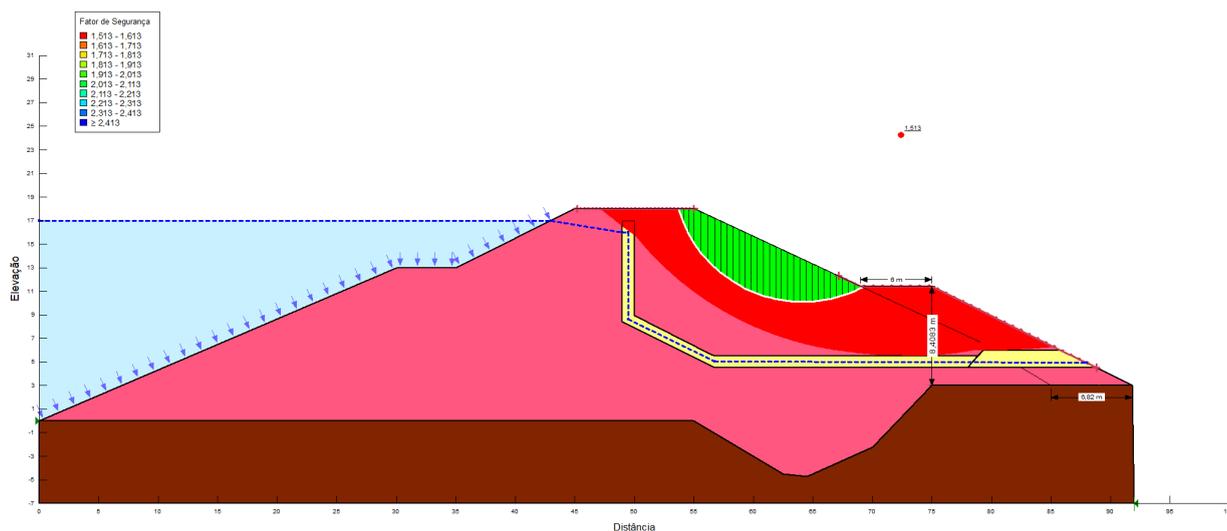
Figura 13: Croqui da berma no pé do talude a jusante proposta.



Fonte: Autor.

Com a berma proposta, foi realizado o cálculo do fator de segurança. Segue abaixo superfície crítica encontrada pelo método Janbu:

Figura 14: Análise pelo método Janbu.



Fonte: Autor.

Segue abaixo tabela com os resultados dos fatores de segurança obtidos pelos diversos métodos:

Tabela 3: Fatores de segurança obtidos após a adição da berma.

Método de Análise	Bishop	Fellenius	Janbu	Morgenstern & Price	Spencer
Fator de Segurança	1,63	1,55	1,51	1,63	1,63

Fonte: Autor.

Portanto, com a implementação da berma, em todos os métodos foram obtidos um fator de segurança maior que 1,5, atendendo assim às recomendações dos órgãos e entidades levantadas neste estudo.

5 CONCLUSÃO

As barragens de rejeitos, conforme amplamente visto nos diversos meios de comunicação, possuem alto grau poluidor e catastrófico em caso de rompimento. Por este motivo, é fundamental que a obra esteja em conformidade com normas e recomendações, bem como seja operada de forma segura e estável.

No estudo realizado anteriormente pelo autor (2014), foi encontrado um Fator de Segurança de 1,37 e simplesmente arbitrado um valor superior a 2, sem propor nenhum tipo de obra ou melhoria e consulta a normas e/ou procedimentos. A atualização do estudo, no que diz respeito ao levantamento de qual o fator de segurança mínimo, atingiu o objetivo, visto que foram levantados 10 diferentes estudos de 5 diferentes países, constatando-se que, para o tipo de obra em operação, deve-se adotar um Fator de Segurança Mínimo de 1,5.

Os estudos realizados mostram que a barragem está, no momento, estável, com fator de segurança de 1,21. Porém, conforme citado acima, o fator de segurança mínimo para este tipo de obra em operação deve ser de, no mínimo 1,5. Neste caso, a obra proposta, que diz respeito a construção de uma berma no pé do talude a jusante, se mostrou viável e elevou o fator de segurança para 1,5, atendendo a todos os estudos e recomendações levantados neste trabalho.

Diante do exposto acima e dos resultados obtidos, pode-se considerar que o presente trabalho atingiu seu objetivo satisfatoriamente e o único ponto que não foi possível elaborar conforme as condições reais, foi a entrada de dados de todos os materiais no software, que por motivo de limitação da licença versão estudante, só permite a utilização de até 03 materiais.

ABSTRACT

The present study aims to evaluate and discuss the stability situation of a tailings dam in a company located in the south of Minas Gerais state. First, 10 (ten) studies were collected from 5 (five) different countries, about recommendations of safety factors for this type of structure. Then, data related to the characteristics of the tailings dam were collected, through technical

reports from inspection companies from previous years and also with field visits. Following, the safety factors were calculated and an analysis of the results was performed. The results obtained indicate a stable condition (FS of 1.21), but not in accordance with the recommendations of the studies surveyed. Finally, the construction of a berm at the foot of the slope downstream of the dam was proposed and with this construction, the safety factor obtained was 1.51, meeting all the recommendations researched.

Keywords: Slope Stability. Tailings dam. Mining

REFERÊNCIAS

ABNT (2017). **Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos - NBR 13028:2017**. ABNT, Rio de Janeiro, Brazil, 16 p.

ANCOLD (2019). **Australian National Committee on Large Dams Guidelines on Tailings Dams - Planning, Design, Construction, Operation and Closure - Revision 1**. ANCOLD, Hobart, 70 p.

ANM (2022). **Agência Nacional de Mineração. Quantitativo Geral de Barragens - PNSB**. Disponível em: < <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica> > . Acesso em: 16/03/2022.

CALLE, J. A. C. **Análise de Ruptura de Talude em Solo não Saturado**. 156f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2000.

CARVALHO DD, FILHO PASCHOALIN JA. **Estudo da estabilidade de pequenas barragens de terra compactadas em três teores de umidade**. Exacta, 2004. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81000205>>. Acesso em: 17 ago. 2013.

CBDB (2001). **Guia Básico de Segurança de Barragens**. CBdB, São Paulo, 77 p.

CDA (2014). **Canadian Dam Association Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams**. CDA, Toronto, 41 p.

CDA (2019). **Canadian Dam Association Revision to Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams**. CDA, Toronto, 18 p.

COPEL. **Usina Governador Bento Munhoz da Rocha Netto**. Governo Estadual do Paraná. 2022. Disponível em: < <https://www.copel.com/site/copel-geracao/usinas/usina-governador-bento-munhoz-da-rocha-netto/> >. Acesso em: 01.mai.2022

DIAS, M.V. **Avaliação da Segurança de Barragens por meio de Instrumentação Geotécnica**. UFOP. Ouro Preto. 2017.

Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G. & Foster, M. (2015) **Geotechnical Engineering of Dams**, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 1338 p.

FERC (2006). **Federal Energy Regulatory Commission Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects - Chapter 4 - Embankment Dams**. FERC, [s.l.], 90 p.

FREIRE, E. P. **Análise de Estabilidade de Taludes em Solo nos Morros da Cidade de Santos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, UNB, Brasília – DF, 1995.

HEZRA, J. & PHILLIPS, J. (2017) **Design of dams for mining industry**. Proc. 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams, ICOLD, Prague.

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

SABS (1998). **South African Bureau of Standards Code of Practice - Mine Residue - SABS 0286:1998**. SABS, Pretoria, South Africa, 117 p.

SOUTH AFRICAN GOVERNMENT DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL AFFAIRS (2015). **National Environmental Management: Waste Act, 2008 (Act No. 59 of 2008) - Regulations Regarding the Planning and Management of Residue Stockpiles and Residue Deposits from a Prospecting, Mining, Exploration or Production Operation**. South African Government Gazette, [s.l.], South Africa, 16 p.

USACE (2003). **U.S. Army Corps of Engineers Engineer Manual - Engineering and Design - Slope Stability**. USACE, Washington, 205 p.

USBR (2011). **U.S. Department of Interior Bureau of Reclamation Design Standards No. 13 - Embankment Dams - Chapter 4: Static Stability Analysis**. USBR, [s.l.], 159 p.

SCHNAID ET AL.,. **Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailings dams**. Soils and Rocks 43(3): pages 369-395. 2020.