



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Irene Gurgel Mendonça

ANÁLISE PROBABILÍSTICA APLICADA À ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM BARRAGEM DE REJEITO

Ouro Preto

2022

Análise Probabilística Aplicada à Análise de Estabilidade em Barragem de Rejeito

Irene Gurgel Mendonça

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenharia Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 03/11/2022

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M539a Mendonca, Irene Gurgel.

Análise probabilística aplicada à análise de estabilidade em barragem de rejeito. [manuscrito] / Irene Gurgel Mendonca. - 2022. 47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Barragens de terra. 2. Rejeitos (Metalurgia) - Rejeito filtrado. 3. Probabilidades - Análise probabilística. I. Loch, Felipe de Campos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Irene Gurgel Mendonça

Análise probabilística aplicada à análise de estabilidade em barragem de rejeito

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheira civil.

Aprovada em 03 de novembro de 2022

Membros da banca

[Doutor] - Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
[Eng.] - Eng. Thales Basílio da Circuncisão - STATUM Geotecnia
[Doutor] - Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/11/2022, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0422763** e o código CRC **8FEB C115**.

*Dedico este trabalho a todos os alunos que
se dispuseram a aperfeiçoar os seus conhecimentos e
contribuir com o desenvolvimento do país.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por essa conquista e por me dar forças em todo o tempo dessa trajetória.

Aos meus pais, Marene e Donizete, pelo amor incondicional, por todo apoio financeiro e psicológico durante toda a minha vida.

A todos os professores que compartilharam qualquer conhecimento comigo durante todo o curso, em especial ao Felipe Loch, meu orientador de TCC, e à Ana Letícia que, por mais que não seja da área de geotecnia, me ensinou muito sobre escrita acadêmica durante a iniciação científica, da qual me orientou.

Aos meus amigos e colegas de curso por toda contribuição, tanto em conhecimento compartilhado, quanto em companhia.

A todos os colegas de trabalho e a STATUM Geotecnia, pela oportunidade de trabalho, pela experiência e pelo conhecimento adquirido. Agradeço, em especial, ao Thales Basílio, o qual me recebeu extremamente bem na empresa, compartilhou e compartilha muito do seu aprendizado comigo.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma estiveram presente durante essa minha caminhada, tanto na vida pessoal, quanto na acadêmica/profissional. Muito obrigada!

RESUMO

Através da mineração, uma das atividades que mais causam impactos ambientais no planeta, são gerados os rejeitos. Dessa forma, é necessária uma disposição segura desses materiais, visto que os rejeitos do minério de ferro, são produzidos em elevada quantidade no beneficiamento desse minério. Esse trabalho tem como objetivo aplicar análises probabilística e determinística para analisar a estabilidade de uma barragem de água construída com rejeito filtrado de minério de ferro, mapeando os possíveis pontos de sensibilidade relacionados à segurança geotécnica dessa barragem. A metodologia utilizada consistiu na modelagem de uma barragem hipotética construída de rejeito filtrado de minério de ferro. Para a definição dos parâmetros desse rejeito foram utilizados os resultados de ensaios de laboratório consolidados por Circuncisão (2022). Foram realizadas análises determinísticas e probabilísticas utilizando o *software* Slide, sendo que as probabilidades foram calculadas por FOSM e Monte Carlo. Devido a variabilidade dos parâmetros do rejeito, susceptibilidade a liquefação e erosão, não foi confirmada a segurança da barragem. Concluiu-se que ao se comparar resultados probabilísticos e determinísticos, mesmo quando o fator determinístico atinge o que demanda a legislação, existe uma chance de ruptura ligada a variabilidade dos parâmetros. Além disso, foi observado que, nessa estrutura, o parâmetro de resistência que mais influenciou no fator de segurança foi a coesão, seguida do ângulo de atrito.

Palavras-chaves: Análise Probabilística, Barragem de Terra, Rejeito Filtrado.

ABSTRACT

In ore extraction, one of the activities that most cause environmental impacts on the planet, tailings are generated for the extraction and processing of ore. For this reason, safe disposal of these materials is crucial. This work aims to map the possible points of sensitivity related to the geotechnical safety of water dams built with iron ore tailings using probabilistic and deterministic methods for stability analysis. Our methodology models a hypothetical dam built from filtered iron ore tailings. We used the results of laboratory tests consolidated by Circuncisão (2022) for waste parameters definition. Slide software for deterministic and probabilistic study. And finally, FOSM and Monte Carlo for probabilities computation. Due to the variability of tailings parameters, susceptibility to liquefaction and erosion, the safety of the dam has not been confirmed. Our conclusions indicate that, when comparing the results, there is a chance of rupture linked to the variability of the parameters, even when the deterministic factor reaches what the legislation demands. In addition, it was observed that, in this structure, the resistance parameter that most influenced the safety factor was cohesion, followed by friction angle.

Keywords: Probabilistic Analysis, Earth Dam, Filtered Tailings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Métodos de alteamento de barragens de rejeito.	19
Figura 2 – Faixa granulométrica dos principais rejeitos das usinas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.....	20
Figura 3 – Distribuição estatística em função do FS e do σ	22
Figura 4 – Seção da barragem hipotética.	33
Figura 5 – Análise determinística e probabilística do cenário de operação normal com NA máximo.	36
Figura 6 – Histograma do fator de segurança do cenário de operação normal com NA máximo.....	36
Figura 7 – Análise determinística e probabilística do cenário de condição extrema com NA máximo.	37
Figura 8 – Histograma do fator de segurança do cenário de condição extrema com NA máximo.....	38
Figura 9 – Influência de cada parâmetro de resistência no FS.	39
Figura 10 – Influência de cada parâmetro de resistência no FS.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor de sólidos nos rejeitos em relação a sua característica.....	16
Tabela 2 – Coeficientes de Confiança para a distribuição normal.	24
Tabela 3 – Coeficientes de Confiança para a distribuição normal.	26
Tabela 4 – Relação dos ensaios realizados.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 5 – Limites de Consistência.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 6 – Ensaios executados e seus resultados.	29
Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas análises.....	30
Tabela 8 – Resultado dos ensaios de laboratório.....	31
Tabela 9 – Valores típicos do coeficiente de variação.....	31
Tabela 10 – Valores típicos do coeficiente de variação.....	32
Tabela 11 – Análise realizada por FOSM no cenário de operação normal da estrutura.....	39
Tabela 12 – Análise realizada por FOSM no cenário de operação crítica da estrutura.....	40

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivo	14
1.1.1	Objetivos Específicos.....	14
2	Revisão Bibliográfica.....	15
2.1	Resíduos do Minério de Ferro	15
2.2	Métodos de Disposição de Rejeito	16
2.3	Comportamento Geotécnico dos Rejeitos Resultantes do Minério de Ferro 19	
2.4	Rejeito Filtrado.....	21
2.5	Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes	22
2.6	Métodos Probabilísticos de Análise	23
2.6.1	Simulação de Monte Carlo	23
2.6.2	FOSM (<i>First Order, Second Moment</i>)	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Ensaio de Laboratório Realizados em Amostras de Rejeito Filtrado ...	26
3.2	Definição dos Parâmetros da Análise Probabilística	30
3.3	Definição do Modelo de Análise	32
4	Resultados	35
4.1	Análise Determinística e Probabilística (Monte Carlo)	35
4.1.1	Cenário de Operação Normal	35
4.1.2	Cenário de Operação Crítica.....	37

4.2	Análise Probabilística (FOSM).....	38
5	Conclusão	42
	Referências.....	44

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades que mais causam impactos ambientais no planeta. Nesse contexto, para a extração e beneficiamento do minério são gerados resíduos em grandes quantidades que, na maioria das vezes, não possuem valor econômico, como os estéreis e rejeitos. Dessa forma, necessita-se de uma disposição segura para esses materiais.

Normalmente, os rejeitos são dispostos em forma de polpa, ou seja, mistura de sólido e água, porém podem ser encontrados em diferentes consistências (polpa, pasta, espessados), implicando, assim, em comportamentos geotécnicos específicos (PORTES, 2013). O ângulo de atrito, por exemplo, é afetado pelo índice de vazios inicial, assim como todos os materiais granulares, e pela quantidade de minério de ferro presente, o que é uma característica única dos rejeitos de minério de ferro (HERNANDEZ, 2007).

A elevada quantidade de rejeito gerada no beneficiamento de minério resulta, proporcionalmente, em enormes estruturas para sua disposição e retenção, as chamadas barragens de rejeito e pilhas. As barragens são construídas a partir de um dique de partida e seus alteamentos são realizados: a montante, atualmente proibido no Brasil, no qual os eixos da barragem se deslocam para montante; a jusante, ou seja, os eixos da barragem se deslocam para jusante e; linha de centro, no qual o eixo da barragem é mantido na mesma posição enquanto se realiza os alteamentos (LOZANO, 2006). Já as pilhas, podem ser dispostas em codisposições e disposição compartilhada de rejeito e estéreis, sendo, no primeiro caso, misturados previamente os materiais e, no segundo, apenas depositadas no mesmo local (ALELVAN, PIRES e RIBEIRO, 2016).

Por se tratarem de estruturas geotécnicas altamente poluentes, as pilhas e barragens devem ser construídas de forma bem pensada e seguir rigorosamente as leis ambientais, normas, critérios geotécnicos, sociais, de segurança e de risco, desde

a escolha do local, até o plano de fechamento. A geoquímica e a geologia possuem um papel muito importante na definição de locais impróprios para a disposição das barragens (LOZANO, 2006).

As geometrias utilizadas para estruturas de contenção de rejeito, geralmente, são definidas em projetos de natureza geotécnica, utilizando análises determinísticas e parâmetros médios de resistência como base (PORTES, 2013). Nessas análises, obtém-se apenas um fator de segurança para uma superfície de ruptura crítica. Assim, os parâmetros de resistência são adotados uniformemente para cada tipo de solo, não considerando a existência de possíveis variáveis, relacionadas ao desempenho do material, devido à sua heterogeneidade, prejudicando, dessa maneira, a interpretação do engenheiro a respeito da estrutura, visto que um único fator de segurança não permite avaliar todas as probabilidades de ruptura (CIRCUNCISÃO, 2022).

Para se prever a variabilidade dos parâmetros dos materiais, a estatística e probabilidade podem ser aliadas do engenheiro. A junção de análises probabilísticas e determinísticas aumentam o entendimento do geotécnico sobre o projeto a ser realizado e seu poder de decisão, para que sejam tomadas de maneira consciênte e segura, antecipando eventuais alterações do projeto, reduzindo custos e garantindo a segurança da obra (VECCI, 2018).

O presente trabalho verifica a aplicação de uma análise estatística e probabilística em um projeto de uma barragem de água contruída com rejeito, demonstrando a necessidade de implantação desse tipo de abordagem em projetos de geotecnia, já que a análise é melhor discretizada, gerando uma maior compreensão das fontes de incertezas, dos pontos de atenção e das fragilidades. Além disso, há uma avaliação do comportamento da estrutura quando ocorre a variabilidade dos parâmetros dos materiais.

1.1 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é aplicar análises probabilísticas e determinísticas para avaliar a estabilidade de uma barragem de água construída com rejeito filtrado de minério de ferro, de modo a mapear os possíveis pontos de sensibilidade relacionados à segurança geotécnica dessa barragem.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Utilizar a literatura para ajustar os parâmetros de resistência e caracterização de rejeito de minério de ferro filtrado;
- Definir uma seção típica de barragem de água construída de rejeito de minério de ferro e;
- Avaliar se a análise determinística se demonstra segura dentro da legislação vigente;
- Realizar análise probabilística para prever todos os contextos possíveis de ruptura da barragem hipotética;
- Analisar a influência, nos níveis de segurança da estrutura, da variabilidade dos parâmetros de resistência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos do Minério de Ferro

Segundo Rosièri e Jr. (2000), o conjunto de formações ferríferas metamórficas do Grupo Itabira que estão localizados no Quadrilátero Ferrífero, uma das principais regiões produtoras de minério de ferro do mundo, são compostos por itabiritos, dolomitos ferruginosos e filitos hematíticos. A extração, lavra, beneficiamento e o comércio dos bens minerais desenvolveram e fizeram a riqueza da região, sendo a mineração a base da economia dos municípios ali presentes (VILAÇA, 2020).

O estudo de Vilaça (2020) verificou que entre 2010 e 2018 houve um aumento no Quadrilátero Ferrífero de 65% na geração dos resíduos do minério de ferro. Os estéreis, um dos seus resíduos, são classificados como substância natural (solo, subsolo ou rocha) na qual o teor de minério é inexistente ou muito baixo para serem aproveitados economicamente (FREIRE e MARTINS, 2009). Além disso, constitui, geralmente, o material de decapeamento da jazida, constituído por solos e rochas de naturezas diversas, com diferentes granulometrias e removido de forma a permitir o acesso ao minério (REIS, 2014).

Os rejeitos, oriundos do processo de beneficiamento, são os resíduos do minério de ferro que, por não atingirem o teor adequado para que possuam valor econômico, são descartados. Geralmente, são apresentados em forma de polpa, visto que utiliza-se água para a sua separação e, pela falta de valor comercial, são destinados a depósitos permanentes (ALELVAN, PIRES e RIBEIRO, 2016). Ao decorrer do tempo, a tecnologia torna viável o beneficiamento de minérios mais ‘pobres’, ou seja, com teores menores. Em contrapartida, produz-se mais rejeito, logo, necessita-se de mais ambientes para a disposição permanente.

De acordo com Souza (2018), técnicas das estruturas de contenção de rejeito estão relacionadas com sua granulometria e com seu teor final de sólidos, ou seja, a

relação entre a quantidade de sólidos existentes e a quantidade total de rejeitos é em massa (C_w – teor de sólidos gravimétrico) ou em volume (C_v - teor de sólidos volumétrico). Dessa forma, o teor de sólidos influencia no comportamento geomecânico do material, sendo a deformabilidade e a resistência ao cisalhamento muito relevantes no ponto de vista geotécnico, variando de acordo com a quantidade de água presente no rejeito.

Na Tabela 1 estão apresentadas as consistências do rejeito em função do seu teor de sólidos. Vale ressaltar que no presente trabalho, o rejeito estudado terá sua apresentação em forma de torta (filtrado).

Tabela 1 – Teor de sólidos nos rejeitos em relação a sua característica.

CARACTERÍSTICA DO MATERIAL	TEOR DE SÓLIDOS
Polpa	$C_w < 50\%$
Espessado	$50\% < C_w < 70\%$
Pasta	$70\% < C_w < 85\%$
Torta	$C_w > 85\%$

Fonte: Ulrich (2019)

Para o cálculo do C_w utiliza-se a Equação 1.

$$C_w = \frac{M_S}{M_T} \quad \text{Equação 1}$$

Na qual:

M_S – massa de sólidos da amostra;

M_T – massa total da amostra.

2.2 Métodos de Disposição de Rejeito

A disposição mais comum de rejeitos é a céu aberto, podendo ser feita em estruturas de contenção, em vales ou bacias, ou em pilhas controladas (LOZANO,

2006), as quais são executadas como empilhamento drenado, pilhas de rejeito filtrado ou pilhas de co-disposição de estéril e rejeito, conceituadas a seguir:

- *Pilha de Co-disposição*: Disposição da mistura entre o rejeito e o estéril, a qual se obtém um material com alta resistência ao cisalhamento e com baixa resistência a compressão. Método implantado na década de 90 em minas de pequeno porte para solucionar problemas, nas minas de carvão, de drenagem ácida, visto que há diminuição de permeabilidade, e, assim, ocorre a diminuição da oxidação do estéril e percolação da lixiviação (SOUZA, 2020);
- *Pilha de Rejeito Filtrado*: Disposição de rejeitos que, em estado de polpa, passaram em um meio filtrante com o intuito de separar os líquidos dos sólidos, para que haja uma redução no teor de umidade do material (ALVES, 2020);
- *Empilhamento Drenado*: Neste método, a água é liberada através de um sistema de drenagem interna, de grande capacidade de vazão, ligada aos rejeitos do reservatório, não retendo água livre pelos seus poros (IBRAM, 2016).

As Barragens de Rejeito constituem outro método de disposição e foram criadas com o intuito de armazenar os efluentes sólidos, produzidos em altas quantidades e vindos da mineração (HERNANDEZ, 2007). No Brasil, na atualidade, é estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a qual é regida pela Lei Federal 12.334 (BRASIL, 2010). Entretanto, essa lei foi alterada para a Lei Federal 14.066 (BRASIL, 2020), a qual possui as diretrizes legais a respeito da segurança de barragens que devem ser seguidas por empreendedores que possuem estruturas que enquadram na lei, inclusive os de mineração.

Os métodos existentes para alteamento das barragens são três:

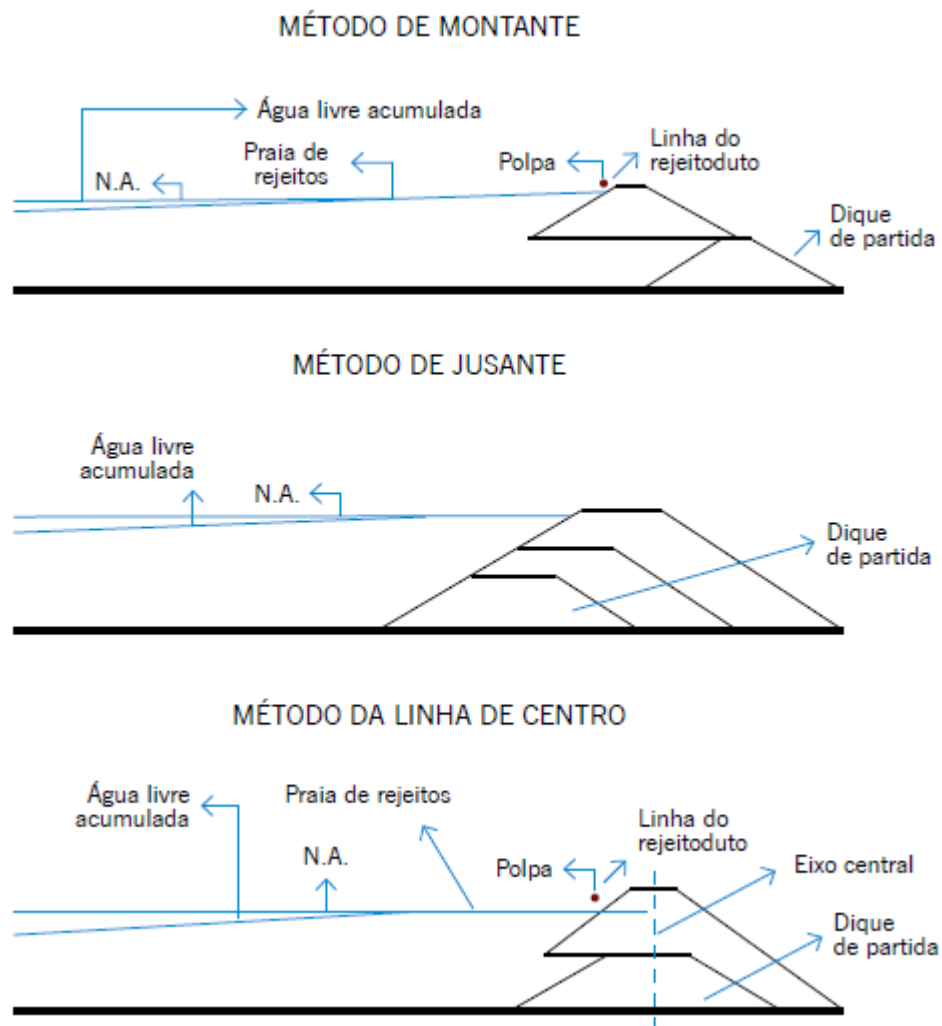
- *Método de montante*: é construído um dique de partida e em seus alteamentos o eixo da barragem se desloca em direção a montante. Para formar uma praia, a polpa é descarregada ao longo do perímetro da crista e, como o rejeito tem uma ampla distribuição granulométrica, as partículas mais pesadas sedimentam em uma velocidade maior e ficam perto do dique, já as menores e mais leves ficam em suspensão (LOZANO, 2006). É

o método mais barato e menos seguro de alteamento de barragens. De acordo com a Lei 14.066 (BRASIL, 2020), a partir de outubro de 2020 ficou proibida o alteamento ou construção de barragens de mineração pelo método a montante;

- *Método de jusante*: a execução dos alteamentos ocorre a jusante do dique de partida. É o método mais caro para a execução de alteamento em barragens de terra, visto que são necessárias maiores áreas para a implantação e maiores volumes de áreas de empréstimo (IBRAM, 2016). Entretanto, como não há nenhum alteamento sobre o rejeito, há uma maior segurança geotécnica nas estruturas, reduzindo as desvantagens em sua utilização.
- *Método linha de frente*: de acordo com o IBRAM (2016), as barragens alteadas por esse método, retratam uma disposição intermediária entre os dois métodos, apresentando algumas vantagens e diminuindo algumas desvantagens.

A Figura 1 ilustra os três tipos de alteamento existentes.

Figura 1 - Métodos de alteamento de barragens de rejeito.



Fonte: IBRAN (2016)

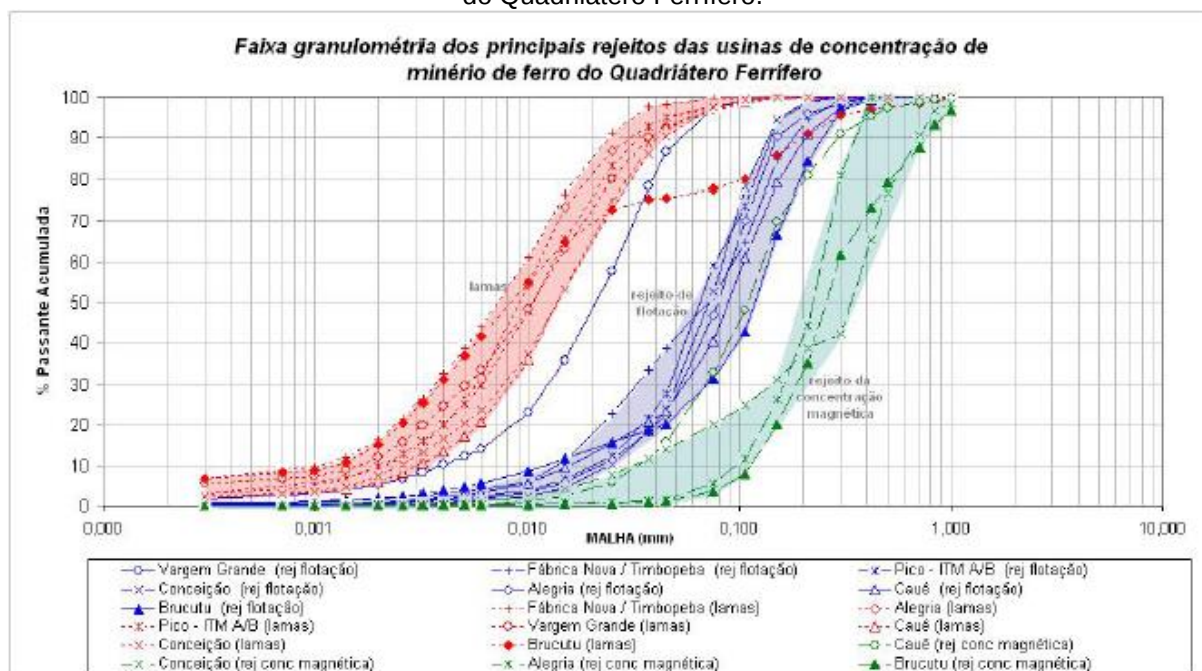
2.3 Comportamento Geotécnico dos Rejeitos Resultantes do Minério de Ferro

De acordo com Hernandez (2007), a maneira como o rejeito do minério de ferro é depositado nos aterros e os estudos de suas propriedades são fundamentais para se obter um domínio sobre as etapas dos alteamentos construídos com esse material, permitindo estruturas mais seguras e econômicas.

Conforme descrito no item 2.1, os rejeitos são dispostos nas barragens em forma de polpa, ou seja, descartados hidraulicamente. Cabe ressaltar que a saturação dos rejeitos pode induzir problemas de liquefação, erosão interna e estabilidade (SOUZA, 2018).

Guimarães (2011) avaliou a caracterização geotécnica dos rejeitos provenientes do minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, comprovando sua alta variabilidade em relação a granulometria desse material, o que causa também variabilidade em seus parâmetros geotécnicos. A Figura 2 ilustra a faixa granulométrica em que os rejeitos de minério de ferro oriundos do Quadrilátero Ferrífero se enquadram.

Figura 2 – Faixa granulométrica dos principais rejeitos das usinas de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Guimarães (2011)

Assim, pode-se dizer que é fato que as características do rejeito não estão ligadas apenas ao material beneficiado, mas também ao método adotado para tal beneficiamento, o qual deve atender as necessidades do mercado (PORTES, 2013). Ainda segundo Portes (2013), não é possível afirmar que o rejeito terá comportamento

de areia devido à sua granulometria, visto que os parâmetros geotécnicos também serão alterados, como por exemplo, pelo teor de ferro.

Logo, não é apenas a granulometria que se difere entre um rejeito ou outro, há também outros parâmetros. No estudo realizado por Espósito (1995), foram realizados ensaios de cisalhamento direto (CD) e triaxiais (CU) variando a porosidade de amostras oriundas de duas pilhas, concluindo que a resistência ao cisalhamento direto e triaxial (CD e CU), por exemplo, variam em função dos índices de vazios.

2.4 Rejeito Filtrado

A filtragem do rejeito, através da aplicação de uma força nas partículas a partir de um meio poroso, acontece por meio de: gravidade, vácuo (pressão negativa aplicada abaixo do filtro), pressão (pressão positiva na polpa, forçando o caminho de encontro ao meio filtrante) e/ou centrifugação (GUIMARÃES, 2011).

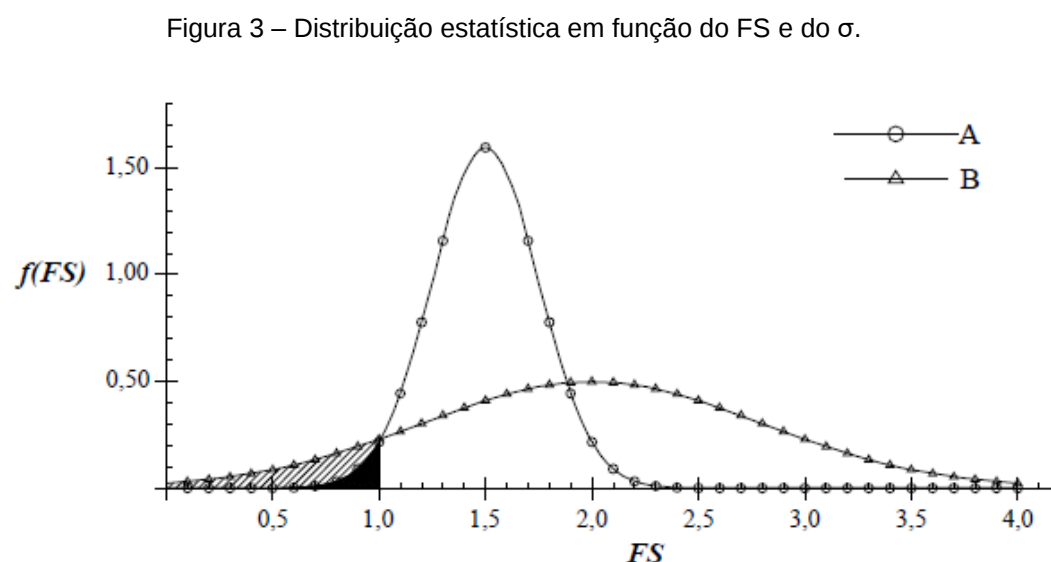
Guimarães, Valadão e Peres (2011) realizaram um estudo sobre o comparativo de tecnologias de filtragem de rejeito de minério de ferro, as quais foram a vácuo, sob pressão, capilar e hiperbárica. Os ensaios foram realizados em testes de bancada de laboratório. O principal critério utilizado para qual tipo de teste deveria ser realizado em cada amostra foi a granulometria. Dessa forma, os resultados mostraram para rejeitos de flotação, as metodologias mais usuais foram o filtro de disco convencional e o filtro horizontal de correia. Já a filtragem em lama de rejeito só foi possível na filtragem sob pressão, entretanto resultando em baixa taxa unitária de filtragem e alta umidade da torta.

Segundo Alves (2020), cada rejeito possui diferentes níveis de eficiência e de custos requeridos para alcançar o nível de umidade necessário para a disposição final, quase todo rejeito é filtrável e deve-se elevar o conhecimento sobre o material utilizado, mesmo que os riscos sejam menores para a sua disposição.

2.5 Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes

Existem várias fontes de incertezas na determinação dos parâmetros geotécnicos dos solos para a caracterização de uma determinada região. Algumas dessas incertezas, são: erros de medição, que podem ocorrer por problemas nos equipamentos para a realização de ensaios e/ou leitura incorreta pelo operador; incerteza estatística que pode ocorrer por pouca quantidade de ensaios; incerteza de transformação, relacionada aos modelos de transformação usados na interpretação dos ensaios (CAMPELLO, 2020). Além disso, o próprio solo, por se tratar de um material natural apresenta uma variabilidade própria. Portanto, há necessidade de métodos estatísticos de análise para que haja uma maior confiabilidade nos resultados.

Vecci (2018) realizou um estudo no qual confirmou a importância da prática de análise probabilística em estudos geotécnicos com o intuito de não excluir análise determinística, na qual é calculado apenas um fator de segurança (F.S.), mas complementá-las. A Figura 3 ilustra a probabilidade, representada pela área hachurada, do Fator de Segurança ser menor que 1.



Fonte: Maia (2003)

Foi possível observar que o projeto A possui FS determinístico igual a 1,5 e o projeto B igual a 2,0. Entretanto, após a realização do cálculo das probabilidades de ruptura de ambos os projetos, Maia (2003) constatou que o projeto B possui uma área sob sua distribuição muito maior que a observada na distribuição do projeto A, sendo assim do ponto de vista probabilístico, apresenta a menor chance de ocorrência de eventos indesejáveis (ruptura). Isso acontece devido ao maior desvio padrão presente no projeto B, que apesar de possuir um média maior, trouxe uma maior incerteza sobre os parâmetros.

2.6 Métodos Probabilísticos de Análise

A análise probabilística depende da determinação dos métodos escolhidos para a análise. Os dois métodos probabilísticos, apresentados a seguir, que foram utilizados nesse trabalho são: simulação de Monte Carlo e o FOSM (*First Order, Second Moment*). A partir dessas abordagens foi possível obter a distribuição estatística do Fator de Segurança (FS) ao escorregamento do talude de uma barragem de rejeitos, extraindo, assim, o índice de confiabilidade e a probabilidade de falha.

2.6.1 Simulação de Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo refere-se a uma técnica de amostragem estatística na qual é alcançada a quantidade de valor aleatório necessária para se descrever $F(X)$ de forma a representar a realidade, sendo mais precisa a cada número de valores gerados e de análises, que tendem ao infinito, realizadas (VECCI, 2018).

Honório (2022) exemplificou sobre como o aumento do número de simulações Monte Carlo influenciam no aumento do nível de confiança da análise utilizando a equação apresentada por Harr (1987) *apud* Honório (2022).

$$N_S = \left(\frac{h_{a/2}}{4\varepsilon^2} \right)^n$$

Equação 2

Onde:

$h_{a/2}$ = função de confiabilidade $(1 - \alpha)$, valor tabelado

ε = precisão em porcentagem (%);

n = número de variáveis aleatórias em estudo.

Tabela 2 – Coeficientes de Confiança para a distribuição normal.

NÍVEL DE CONFIANÇA (%) (1 - α)	$h_{a/2}$
85	1,44
90	1,64
95	1,96
95,45	2,00
98	2,33
99	2,58
99,5	2,81
99,73	3,00
99,9	3,29
99,99	3,89
99,994	4,00

Fonte: Harr (1987) apud Honório (2022).

Dessa forma, a autora (HONÓRIO, 2022) alcançou um número muito mais elevado de simulações Monte Carlo em um nível de 95% de confiança do que de 90% de confiança, o que pode levar a um elevado tempo computacional e até inviável, em casos mais complexos. Assim, para se definir o número de simulações a serem realizadas, deve-se observar a forma de distribuição da probabilidade com o aumento do número de simulações, admitindo a estabilização dos resultados como esse número.

2.6.2 FOSM (*First Order, Second Moment*)

De acordo com Circuncisão (2022), é a abordagem probabilística na qual não é necessário conhecimento prévio/uso de funções distributivas dos parâmetros variáveis, utiliza-se apenas a média e o desvio padrão desses parâmetros, as quais são estimadas a partir da aplicação da série de Taylor, ao redor dos valores médios das variáveis independentes envolvidas.

Nesse caso, o Fator de Segurança (FS) é considerado a função dos parâmetros variáveis, sendo possível determinar a variância do FS em função de cada parâmetro e a influência que cada um deles tem sobre o FS.

O fator de segurança é considerado como função dos parâmetros variáveis ($x_1, x_2, \dots, x_n$), sendo possível avaliar a variância do FS ($V(FS)$) em função de cada um dos parâmetros. Sendo o FS o parâmetro linear, a ∂FS a variação entre o FS obtido com uma variação ∂x_i e o fator de segurança determinístico. Com a Equação 3 é possível calcular essa variância.

$$V(FS) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial FS}{\partial x_i} \right)^2 \cdot V(x_i) \quad \text{Equação 3}$$

Então, utilizando esse cálculo é possível se conhecer o grau de importância que cada parâmetro exerce sobre o fator de segurança.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, apresentou-se os materiais e métodos do estudo. Primeiramente, foram tratados os dados dos ensaios de laboratório realizados em amostras de rejeito filtrado, foi definida a distribuição estatística dos parâmetros e o modelo de análise.

3.1 Ensaios de Laboratório Realizados em Amostras de Rejeito Filtrado

Para o tratamento dos ensaios de laboratório de rejeito filtrado, utilizou-se os dados do trabalho de Circuncisão (2022). Foram realizados em 2021 ensaios em duas amostras deformadas de rejeito do beneficiamento de minério de ferro filtrado do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Nas amostras denominadas A e B foram realizados ensaios de caracterização geral e, apenas na amostra B, ensaios triaxiais do tipo drenado (CID) e do tipo não drenado (CIU). A Tabela 3 apresenta os ensaios e a quantidade realizada nas amostras e, além disso, as normas utilizadas em cada ensaio.

Tabela 3 – Ensaios realizados nas amostras.

ENSAIOS	QUANTIDADE	NORMAS
Granulometria por Peneiramento e Sedimentação	06	NBR 7181 (ABNT, 2016)
Massa Específica Real dos Grãos	06	NBR 6458 (ABNT, 2016)
Compactação Proctor Normal	06	NBR 7182 (ABNT, 2016)
Limites de Consistência	06	NBR 64589 e 7180 (ABNT, 2016)
Índices de Vazios	06	NBR 12004 e 12051 (ABNT, 1990)
Triaxial CIU e CID	06	D4767 e D7181 (ASTM, 2011)

Fonte: Circuncisão (2022)

As duas amostras na análise granulométrica revelaram material de matriz siltosa, sendo o teor de finos acima de 80%, uma Massa Específica Real dos Grãos média foi

3,483kg/m³. Já o ensaio de Compactação Proctor Normal revelou uma Massa Específica Seca Máxima média de 1,86g/cm³ e Teor de Umidade Ótimo médio de 14,2%. A Tabela 4 apresenta o resultado dos ensaios de granulometria das amostras, a Tabela 5 apresenta o resultado dos ensaios de compactação Proctor Normal e a Tabela 6, os resultados dos limites de consistência.

Tabela 4 – Resultado da granulometria das amostras.

AMOSTRA	ENSAIO	ρ_s (kg/m ³)	GRANULOMETRIA			
			PEDREG. (%)	AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)
A	01	3582,0	0,0	16,9	74,2	9,0
	02	3552,0	0,0	16,8	76,8	6,4
	03	3567,0	0,0	15,5	75,6	8,9
	04	3412,0	0,0	18,5	79,2	2,3
B	05	3389,0	0,0	18,8	78,9	2,2
	06	3398,0	0,0	18,6	79,1	2,2

Nota: ρ_s = massa específica real dos grãos.

Fonte: Circuncisão (2022)

Tabela 5 – Resultado dos ensaios de compactação Proctor Normal.

AMOSTRA	ENSAIO	COMPACTAÇÃO PROCTOR NORMAL	
		$\rho_{d,máx}$ (kg/m ³)	w_{ot} (%)
A	01	1890,0	14,1
	02	1880,0	14,5
	03	1890,0	15,1
	04	1820,0	13,8
B	05	1830,0	13,6
	06	1820,0	13,9

Nota: $\rho_{d,máx}$ = massa específica seca máxima, w_{ot} = teor de umidade ótimo.

Fonte: Circuncisão (2022)

Tabela 6 – Resultado dos Limites de Atteberg.

AMOSTRA	ENSAIO	LL (%)	LP(%)	IP(%)
A	01	20,00	13,40	6,60
	02	17,40	13,60	3,80
	03	17,70	14,50	3,20
	04	18,00	12,90	5,10
	05	18,50	14,50	4,00
	06	15,00	10,10	4,90
B	07	14,90	9,70	5,20
	08	14,60	9,10	5,50
	09	15,00	9,20	5,80
	10	15,80	10,30	5,50

Nota: LL = limite de liquidez, LP = limite de plasticidade, IP = índice de plasticidade.

Fonte: Circuncisão (2022)

Sobre os triaxiais, foram realizados 06 ensaios na amostra B, com 05 copos de prova, saturados, cada, sob tensões confinantes de 50, 100, 200, 400 e 800kPa. No estudo de Circuncisão (2022), a ruptura foi considerada no ponto de Máxima Tensão Desviadora ($\sigma_{d,max}$) e o ponto de Máxima Obliquidade e as envoltórias foram obtidas através da linha kf. Assim, nos ensaios foi variado o tipo de ensaio (CIU ou CID), o índice de vazios e os teores de umidade, os quais foram definidos a partir dos valores de umidade ótima encontrados nos ensaios de compactação.

A Tabela 7 apresenta a relação dos ensaios executados e os resultados obtidos nos ensaios triaxiais.

Tabela 7 – Ensaaios executados e seus resultados.

ENSAIO	TIPO	TEOR DE UMIDADE	ÍNDICE DE VAZIOS	MASSA ESPECÍFICA SECA (kg/m ³)	MASSA ESPECÍFICA ÚMIDA (kg/m ³)	MÁXIMA OBLIQUIDADE		MÁXIMA TENSÃO DESVIADORA	
						c (kN/m ²)	φ(°)	c' (kN/m ²)	φ'(°)
01	CIU	Ótima (13,81%)	0,80	1888,0	2148,0	0,38	35,3	0,91	35,22
02	CIU	Ótima + 2% (15,82%)	0,80	1887,0	2186,0	6,29	36,1	12,04	35,51
03	CIU	Ótima - 2% (11,81%)	0,80	1887,0	2111,0	0,61	37,63	0,75	37,50
04	CIU	Ótima (13,80%)	0,90	1789,0	2036,0	0,00	34,55	0,00	34,54
05	CID	Ótima (13,81%)	0,80	1888,0	2148,0	4,58	35,27	4,58	35,27
06	CID	Ótima - 2% (11,81%)	0,80	1887,0	2111,0	8,95	34,84	8,95	34,84

Fonte: Circuncisão (2022)

3.2 Definição dos Parâmetros da Análise Probabilística

Para a definição estatística dos parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizou-se o modelo de distribuição normal, já que sua consolidação depende apenas da média e desvio padrão. É possível obter esses parâmetros através da literatura disponível e, além disso, através dos resultados dos ensaios de laboratório, assim como no estudo realizado por Circuncisão (2022).

Na definição dos parâmetros de peso específico e resistência deve-se definir a distribuição estatística para que os cálculos sejam realizados e a análise concluída com uma maior confiabilidade.

Os ensaios triaxiais são os mais confiáveis para descrever as situações de campo, em condições de campo drenada para os triaxiais CID e não drenadas para CIU. Dessa maneira, através dos dados da Tabela 7, em termos de tensão efetiva, os parâmetros considerados para essa pesquisa foram mais conservadores e estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros utilizados nas análises.

ENSAIO	TIPO	TEOR DE UMIDADE	ÍNDICE DE VAZIOS	PARÂMETROS UTILIZADOS	
				c (kN/m ²)	$\phi(^{\circ})$
01	CIU	Ótima (13,81%)	0,80	0,00	35,00
02	CIU	Ótima + 2% (15,82%)	0,80	6,00	36,00
03	CIU	Ótima - 2% (11,81%)	0,80	0,00	37,00
04	CIU	Ótima (13,80%)	0,90	0,00	34,00
05	CID	Ótima (13,81%)	0,80	4,00	35,00
06	CID	Ótima - 2% (11,81%)	0,80	8,00	34,00

Fonte: Circuncisão (2022)

Dessa forma, o autor calculou os pesos específicos para cada um dos valores de teor de umidade obtidos nos ensaios de caracterização, considerando, para a umidade ótima, 100% do grau de compactação e, para a umidade ótima mais ou

menos 2%, 90% do grau de compactação, sendo esse o valor admitido para o controle de compactação da estrutura em questão.

De acordo com Circuncisão (2022), a média da massa específica é de 1980,0 kg/m³ e o desvio padrão foi de 100kg/m³. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos encontrados através dos ensaios de laboratório.

Tabela 9 – Resultado dos ensaios de laboratório.

TIPO DE ENSAIO	COESÃO			ÂNGULO DE ATRITO			PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)		
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CV (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CV (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COV (%)
CIU	0,00	0,00	200,00	35,50	1,30	4,00			
CID	6,00	2,80	47,00	34,54	0,70	2,00	19,80	1,00	5,00
Conjunto	3,00	3,50	117,00	35,20	1,20	3,00			

Fonte: Circuncisão (2022)

Como a quantidade de ensaios não é suficiente para a definição correta do coeficiente de variação dos parâmetros, utilizou-se a Tabela 10 para a definição da distribuição estatísticas usadas nas análises.

Tabela 10 – Valores típicos do coeficiente de variação.

PARÂMETRO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
Peso Específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo Efetivo de Resistência	10 (04 a 20)
Coesão não-drenada	30 (20 a 50)

Fonte: Assis *et al* (2012) *apud* Silva (2015)

Assim, ao comparar os resultados obtidos pelo tratamento dos ensaios com os coeficientes típicos de variação de cada parâmetro, apenas os ensaios triaxiais CID possuem o valor conforme o esperado. Dessa forma, os valores estatísticos utilizados para as análises são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores típicos do coeficiente de variação.

TIPO DE ENSAIO	COESÃO			ÂNGULO DE ATRITO			PESO ESPECÍFICO (kN/m³)		
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CV (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	CV (%)	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COV (%)
CIU	0,00	0,00		35,50	2,49				
CID	6,00	2,80	47,00	34,54	2,42	7,00	19,80	1,00	5,00
Conjunto	3,00	3,50		35,20	2,46				

Fonte: Circuncisão (2022)

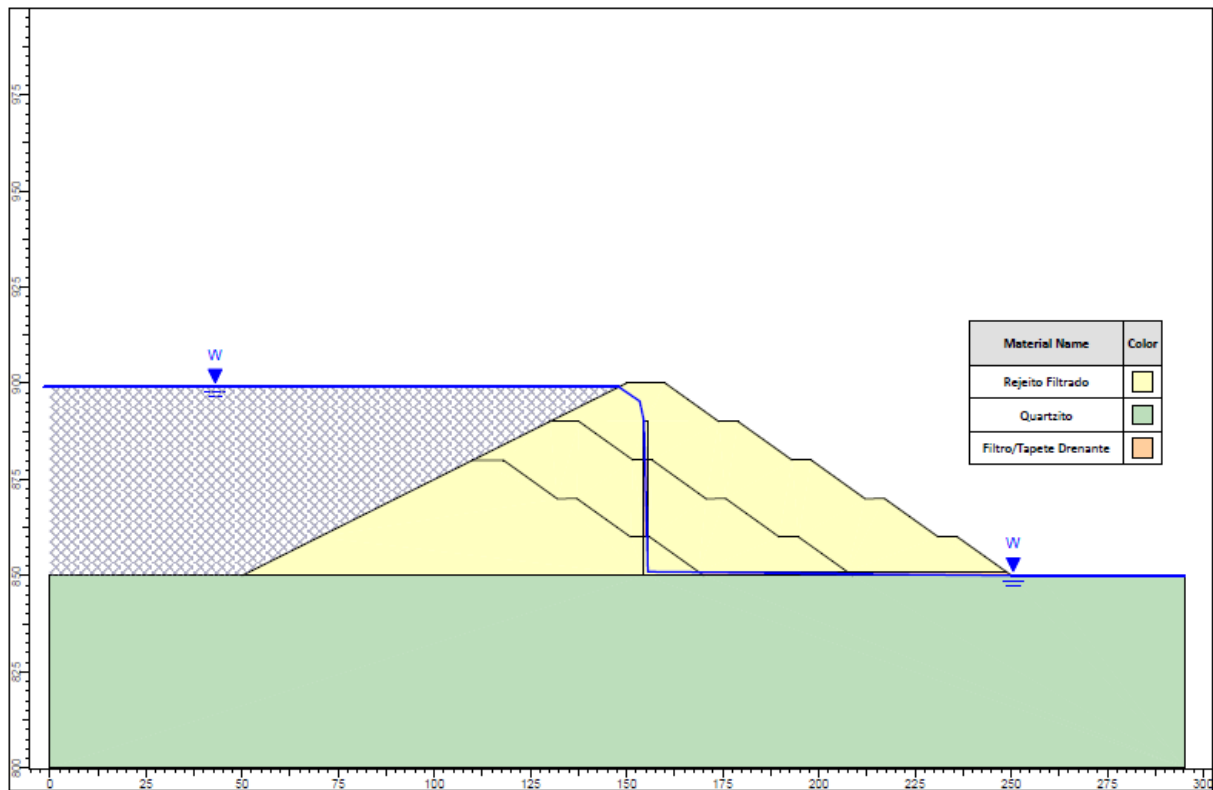
Sendo assim, os limites máximo e mínimo foram definidos como a média encontrada mais ou menos três desvios padrão.

3.3 Definição do Modelo de Análise

Na definição do modelo de análise foi utilizado o *software Slide*, da *Rocscience*, no qual utilizou-se um modelo de barragem de água hipotética com dois alteamentos a jusante, os quais não apresentariam variabilidade de parâmetros e de construção entre eles. A estrutura possui taludes de jusante com inclinação 1H;1,4V, bermas com 5,0m de largura, 50m de altura total, taludes de montante com inclinação 1H;2V e filtro vertical e tapete drenante com 1,0m de espessura.

A crista da barragem está na elevação 900,0m, o nível d'água na elevação 899,0m e as bermas nas elevações 890,0, 880,0, 870,0 e 860,0m. O dique de partida possuía a crista na elevação 880,0m e o 1º alteamento na elevação 890,0m. A Figura 4 ilustra a seção da barragem hipotética avaliada.

Figura 4 – Seção da barragem hipotética.



Fonte: da autora.

Dessa forma supõe-se que a fundação da estrutura é composta por quartzito, com peso específico igual a 20kN/m^3 , coesão de 45kPa e ângulo de atrito 39° como o que foi definido por Silva (2006) ao avaliar o solo de alguns locais do Quadrilátero Ferrífero. Além disso, os parâmetros do filtro e tapete drenante são peso específico 20kN/m^3 , 0kPa de coesão e ângulo de atrito 30° , assim como o apresentado por Honório (2022).

Os cenários presentes na norma NBR 13028 (ABNT, 2017) que serão analisados, são: cenário em condições operacionais normais com NA máximo, com FS mínimo de 1,5; e em condição extrema, com FS mínimo de 1,3. Sendo assim, os cenários avaliados foram: em condições operacionais normais e nível do reservatório (NA) do reservatório no máximo, visto que trata-se de uma situação mais crítica; e o cenário em condição extrema e NA máximo.

Para os cenários de operação normal e condição extrema, no qual há mal funcionamento da drenagem interna, ambos com NA máximo, utiliza-se o ensaio triaxial CID (consolidado e drenado), visto que nesses casos há dissipação de excesso de poropressão. Por essa razão, os triaxiais CIU (consolidado, não drenado) não foram utilizados, já que seriam necessários em situações em que há excesso de poropressão, o que não engloba nenhum dos casos.

Para a definição do NA máximo foi considerada a RESOLUÇÃO ANM Nº 95, DE 07 DE FEVEREIRO DE 2022, na qual exige, para que a estrutura não esteja em nível de emergência, 1,0 metro de borda livre a critério de projeto.

O método utilizado para as análises foi Morgenstern-Price, buscando rupturas circulares, visto que esse método é bastante conservador e atende ao equilíbrio de forças e momentos.

4 RESULTADOS

Nesse capítulo foram apresentados os resultados encontrados nesse estudo.

4.1 Análise Determinística e Probabilística (Monte Carlo)

As análises determinísticas e probabilísticas dos dois cenários avaliados foram descritas a seguir. Vale ressaltar que foram realizadas análises para 10000 amostras na simulação Monte Carlo.

4.1.1 Cenário de Operação Normal

A Figura 5 ilustra o resultado determinístico e probabilístico (Monte Carlo) obtido para o cenário de operação normal com NA máximo permitido por norma.

Dessa forma, o fator de segurança (FS) obtido foi de 1,5 para a análise determinística, atendendo a norma vigente.

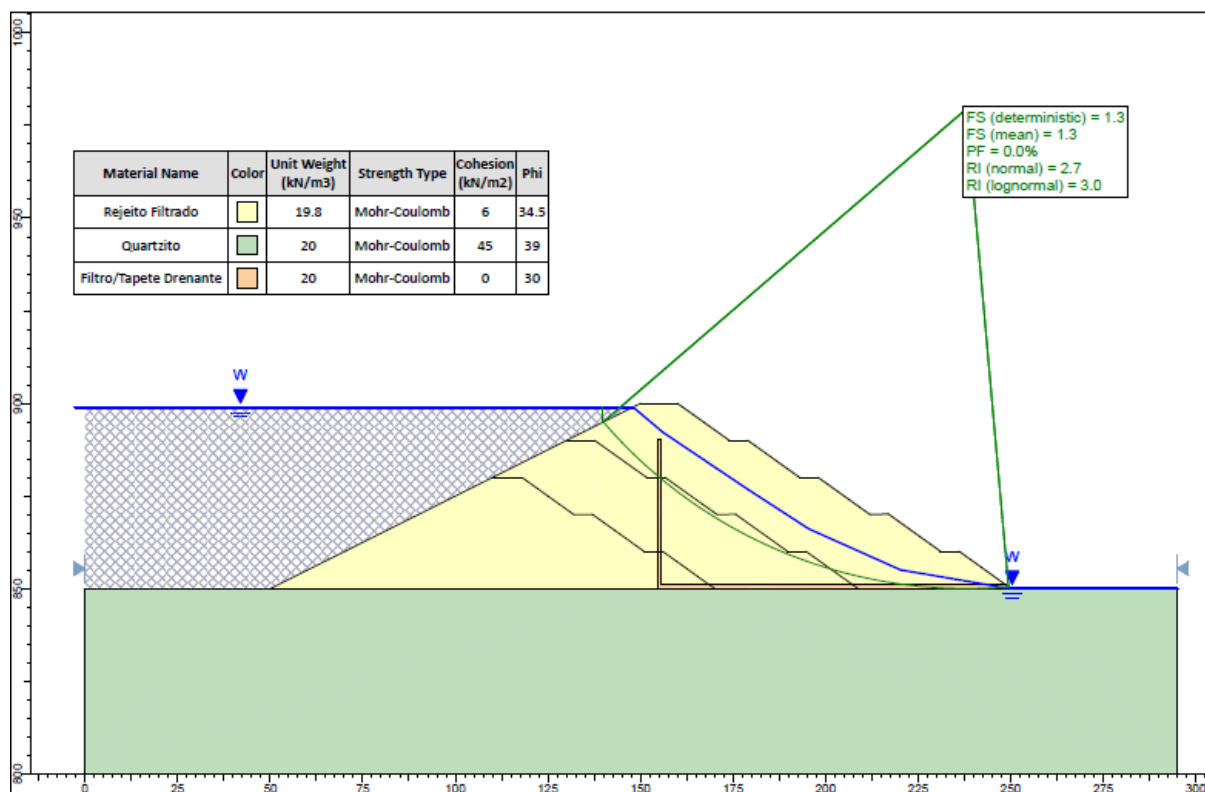
A Figura 6 apresenta o histograma de distribuição estatística dos fatores de segurança considerando o cenário de operação normal.

Foi possível observar que o FS médio foi de 1,5, mínimo de 1,1 e máximo de 1,9. Além disso, o desvio padrão foi de 0,14, com índice de confiabilidade de 3,5 e probabilidade de falha nula nesse cenário, ou seja, nenhum valor foi menor que 1,0, visto que o *software* considera esse FS como probabilidade de ruptura.

4.1.2 Cenário de Operação Crítica

No cenário de operação crítica, ou seja, condição extrema de operação considerou-se o mal funcionamento do filtro e do tapete drenante da barragem causado pela colmatação das estruturas de drenagem interna. A Figura 7 ilustra o cenário crítico determinístico e probabilístico.

Figura 7 – Análise determinística e probabilística do cenário de condição extrema com NA máximo.

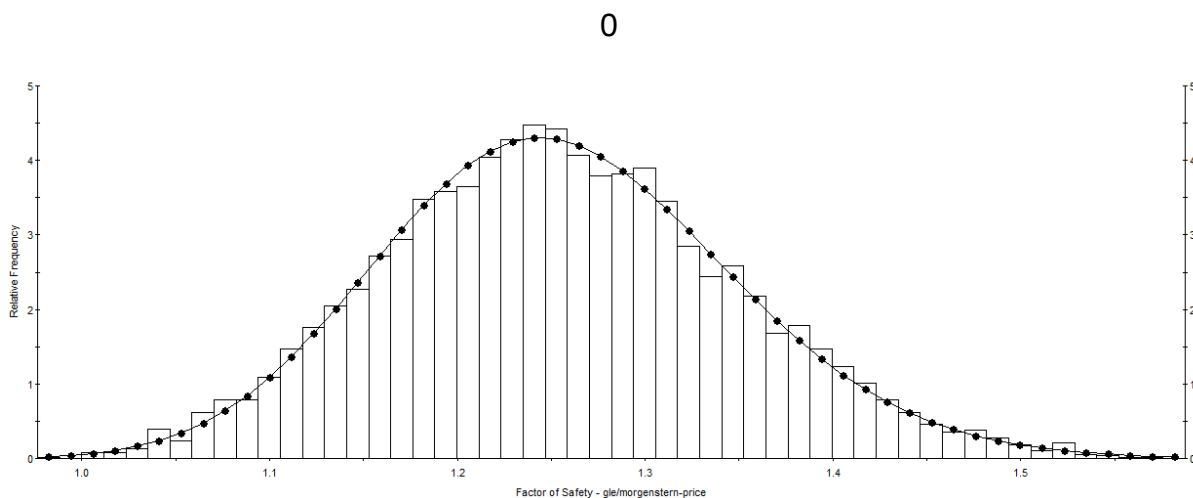


Fonte: da autora.

Assim, nota-se que, nesse caso, o fator de segurança (FS) foi 1,3, o qual atende a norma vigente.

Na Figura 8 é apresentado o histograma de distribuição estatística dos fatores de segurança considerando o cenário de operação crítico.

Figura 8 – Histograma do fator de segurança do cenário de condição extrema com NA máximo.



Então, foi possível verificar que o FS médio foi de 1,3, mínimo de 0,9 e máximo de 1,6. Além disso, o desvio padrão foi de 0,09, com índice de confiabilidade de 3,02 e probabilidade de ruptura 0,02% nesse cenário. Dito isso, por se tratar de uma barragem, essa probabilidade não é aceitável, como descrito por Baecher (1982) *apud* Honório (2022), o qual considera aceitável o valor de 10^{-4} para estruturas como a estudada nesse trabalho.

4.2 Análise Probabilística (FOSM)

A análise probabilística FOSM (First Order Second Moment) permite que, para cada um dos cenários, seja avaliada a influência de cada parâmetro no fator de segurança. Dessa forma, assim como utilizado por Maia *et al* (2010), considerou-se para essa análise uma variação de 10% para mais ou menos de cada um dos parâmetros separadamente. Os valores foram calculados numa planilha de *excel*.

O resultado para a análise FOSM para o cenário de operação normal foi apresentado na Tabela 12 e na Fonte: da autora.

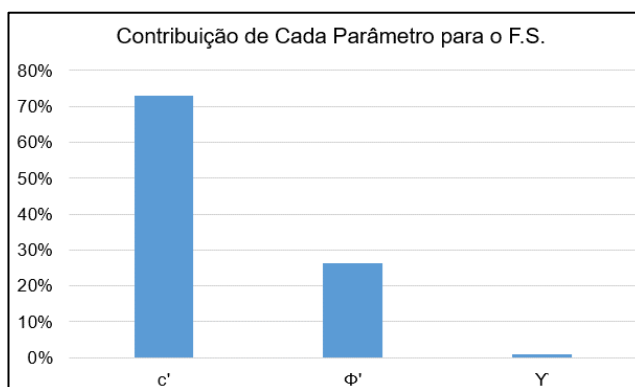
Figura 9, ressaltando que o fator de segurança determinístico para esse cenário foi 1,5.

Tabela 12 – Análise realizada por FOSM no cenário de operação normal da estrutura.

PARÂMETRO	x	dx	$V(x)$	$f(x + \Delta x)$	$df(x)$	$df(x)/dx$	$(df(x)/dx)^2 \cdot V(x)$	$V(F.S.) \%$
c'	6	0,6	7,84	1,45	-0,05	-0,08	0,05	72,8%
Φ'	34,5	3,45	5,86	1,30	-0,2	-0,06	0,02	26,3%
γ	19,8	-1,98	1,00	1,45	-0,05	0,03	0,00	0,9%

Fonte: da autora.

Figura 9 – Influência de cada parâmetro de resistência no FS.



Fonte: da autora.

Dessa maneira, foi possível concluir que o parâmetro que mais influencia no FS quando se trata do cenário de operação normal é a coesão, seguida do ângulo de atrito e, por último, o peso específico.

Já o resultado do cenário crítico de operação para a análise FOSM foi apresentado na

Tabela 13 e

PARÂMETRO	x	dx	$V(x)$	$f(x + \Delta x)$	$df(x)$	$df(x)/dx$	$(df(x)/dx)^2 \cdot V(x)$	$V(F.S.) \%$
c'	6	0,6	7,84	1,25	-0,05	-0,08	0,05	77,0%
Φ'	34,5	3,45	5,86	1,13	-0,17	-0,05	0,01	20,1%
γ	19,8	1,98	1,00	1,21	-0,09	-0,05	0,00	2,9%

Fonte: da autora.

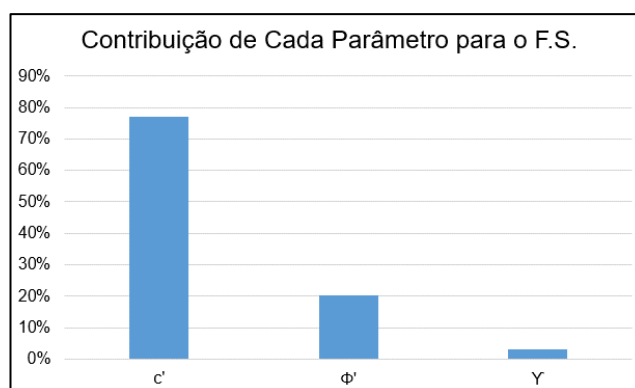
Figura 10, ressaltando que o fator de segurança determinístico para esse cenário foi 1,3.

Tabela 13 – Análise realizada por FOSM no cenário de operação crítica da estrutura.

PARÂMETRO	x	dx	$V(x)$	$f(x + \Delta x)$	$df(x)$	$df(x)/dx$	$(df(x)/dx)^2 \cdot V(x)$	$V(F.S.) \%$
c'	6	0,6	7,84	1,25	-0,05	-0,08	0,05	77,0%
Φ'	34,5	3,45	5,86	1,13	-0,17	-0,05	0,01	20,1%
γ	19,8	1,98	1,00	1,21	-0,09	-0,05	0,00	2,9%

Fonte: da autora.

Figura 10 – Influência de cada parâmetro de resistência no FS.



Fonte: da autora.

Dessa maneira, foi possível concluir que o parâmetro que mais influencia no FS quando se trata do cenário de operação crítico é a coesão, seguida do ângulo de atrito e, por último, o peso específico.

Cabe ressaltar que, em ambos os cenários avaliados, o parâmetro que mais contribui na variação do FS é a coesão do material em questão.

5 CONCLUSÃO

As revisões bibliográficas avaliadas demonstraram a variabilidade dos parâmetros geotécnicos dos rejeitos provenientes do minério de ferro e, mais especificamente do rejeito filtrado, o qual foi o material escolhido para as análises realizadas no presente trabalho. Os ensaios avaliados por Circuncisão (2022), utilizados nesse estudo, comprovaram a variabilidade desses parâmetros e que as características das amostras correspondiam a literatura. Além disso, cabe ressaltar que quanto mais ensaios e investigações forem realizados, mais se conhece sobre o material utilizado.

A barragem a jusante hipotética construída com o rejeito filtrado de minério de ferro, proveniente do Quadrilátero Ferrífero (MG), demonstrou-se segura em relação as análises determinísticas, visto que atingiram os fatores de segurança mínimos recomendados pela NBR 13028 (ABNT, 2017). Entretanto, devido ao rejeito ser um material tão variável, outros fatores devem ser considerados, visto que em caso de saturação podem ocorrer problemas de liquefação, erosão interna e de estabilidade

Na análise probabilística realizada pelo método de Monte Carlo notou-se que, apesar de nula a probabilidade de falha no cenário de operação normal, foi obtido um FS mínimo de 1,1, o qual não atende o preconizado em norma. Assim, devido a variabilidade dos parâmetros de resistência do rejeito filtrado, é de suma importância a realização dessa probabilidade, para que todos os contextos sejam previstos nos projetos.

Já para o cenário crítico a probabilidade de falha foi de 0,02% e o FS mínimo foi 0,9, logo, por mais que se trate de uma baixa probabilidade, é notável que a probabilidade de ruptura existe. Então, ao se comparar resultados probabilísticos e determinísticos, observa-se que mesmo quando o fator determinístico atinge o que demanda a legislação, existe uma chance de ruptura ligada a variabilidade dos parâmetros, o que não deve e não pode ser ignorado. De acordo com a literatura,

essa probabilidade de falha não é um valor admissível para uma barragem, então, a estrutura avaliada não pode ser considerada como segura.

A análise de probabilidade FOSM foi realizada para avaliar a interferência que a variabilidade de cada parâmetro de resistência tem no fator de segurança da estrutura. Dessa forma, para a barragem analisada foi possível observar que, em ambos os cenários, o fator que mais influencia na segurança da barragem é a coesão. Em seguida, com uma influência menor, é o ângulo de atrito. Por fim, o peso específico, que dentro dessa avaliação de probabilidade FOSM é o que menos influencia no FS quando variado.

Ao se realizar análises probabilísticas, permite-se a quantificação do risco relacionado a estrutura e, dessa forma, apesar de já ocorrerem em projetos, não estão presentes nas legislações vigentes os valores balizadores que devem ser admitidos, como do desvio padrão e da probabilidade de ruptura. Então, as análises probabilísticas devem ser consideradas pelos órgãos ambientais, ao se tratarem de estruturas geotécnicas.

Cabe ressaltar que o presente trabalho teve cunho científico, não podendo ser aplicado na prática para projetos de engenharia.

Por fim, devido aos inúmeros parâmetros que englobam o rejeito e por se tratar de um material que possui seu próprio comportamento, não igualando a nenhum outro material, não devem ser consideradas barragens construídas unicamente com rejeito filtrado, tendo como outra opção a disposição em pilhas.

REFERÊNCIAS

AGENCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução N° 95, 07 de fevereiro de 2022. Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

ALELVAN, Giovana M.; PIRES, Ana C. G.; RIBEIRO, Luis F. M. **Análise das Possibilidades de Depósitos de Estéreis e Rejeitos de Mineração: as Vantagens da Codisposição e da Disposição Compartilhada**. 10° Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre, RS, 19 a 21 Outubro 2016. 13.

ALVES, Pedro I. A. **Empilhamento de Rejeito Filtrado: a Expansão de uma Alternativa para Substituição de Barragens**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, p. 116. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13.028: Mineração – Requisitos para a elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água**. Rio de Janeiro. ABNT, 2017.

GREGORY B. BAECHER, RÜDIGER RACKWITZ. **Factors of safety and pile load tests**. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1982.

BRASIL. **Lei N° 14.066, 30 de setembro de 2020. Altera a Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei n° 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei n° 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei n° 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração) .**

CAMPELLO, Izabela C. **Abordagem Probabilística Aplicada ao Estudo da Variabilidade Geotécnica do Solo**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, p. 166. 2020.

CIRCUNCISÃO, Thales B. D. **Abordagem Probabilística Aplicada a Análise de Estabilidade de Pilha de Rejeito de Mineração**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 70. 2022.

CORR, D J. et al. **Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy**. Cement & Concrete Composites, v. 26, p. 1007–1012, 2004.

DIXON-HARDY, Darron W.; ENGELS, Jon M. **Methods for the disposal and storage of mine tailings**. Land Contamination & Reclamation, v. 15, n. 3, p. 19, Julho 2007.

ESPÓSITO, T. J. **Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeitos – Análise de Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 159. 1995.

FREIRE, William; MARTINS, Daniela L. **Dicionário de Direito Ambiental e Vocabulário Técnico de Meio Ambiente - 2ª Edição**. Belo Horizonte, MG. 2009.

GUIMARÃES, Nilton C. **Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando a sua Disposição em Pilhas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 130. 2011.

GUIMARÃES, Nilton C.; VALADÃO, George E. S.; PERES, Antônio E. C. **Comparativo de Tecnologias de Filtragem Aplicadas a Rejeitos de Minério de Ferro**. Redução de Minério de Ferro e Tecnologia Mineral, Vila Velha - ES, p. 9, setembro 2011.

GUIMARÃES, Nilton C.; VALADÃO, George E. S.; PERES, Antônio E. C. **Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando à sua Disposição em Pilhas**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, MG, v. 65 (4), p. 543-548, out. dez. 2012.

HERNANDEZ, Hector M. O. **Ensaio de Simulação de Disposição Hidráulica (ESDH) para a Caracterização de Rejeitos Utilizados em Barragens de Aterro Hidráulico**. Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 211. 2007.

HONÓRIO, Clarissa M. S. **Avaliação de Segurança de uma Barragem de Terra: Abordagem Determinística e Probabilística**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, p. 75. 2022.

IBRAM. **Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração**. Instituto Brasileiro de Mineração. Brasília, DF, p. 128. 2016.

LOZANO, Fernando A. E. **Seleções de Locais para Barragens de Rejeito Usando o Método de Análise Hierárquica**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 142. 2006.

MAIA, JOSÉ A. C. **Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 229. 2003.

PAULO CÉSAR DE ALMEIDA MAIA, Alberto S. F. J. S. R. O. S. **Aplicação de Retroanálise Probabilística para Avaliação da Estabilidade de Taludes**. Vértices, Campos de Goytacases, RJ, v. 12, p. 43-52, jan./abr. 2010.

PORTES, Andréia M. C. **Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 180. 2013.

REIS, Efraim M. D. **Aspectos Ambientais Aplicáveis a uma Pilha de Disposição de Estéril de Minério de Ferro**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, p. 33. 2014.

ROSIÈRI, Carlos A.; JR., Farid C. **Itabiritos e Minérios de Ferro de Alto Teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma Visão Geral e Discussão**. Geonomos, Belo Horizonte, MG, v. 8, n. 2, p. 27-43, dezembro 2000.

SILVA, CLÍSCIA C. D. **Análise de Estabilidade de um Talude da Cava de Alegria Utilizando Abordagem Probabilística**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, p. 136. 2015.

SILVA, Eric M. **Análise de Estabilidade de Taludes em Solos de Alteração de Rochas Metamórficas do Quadrilátero Ferrífero**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 143. 2006.

SOUZA, Thiago C. D. **Método de Avaliação de Liquefação em Barragens de Rejeito: Uma Abordagem Probabilística**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, p. 293. 2018.

SOUZA, Weber A. D. R. **Análise Numérica do Comportamento de Pilhas de Rejeito Filtrado e Co-Disposição Durante a Construção**. Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 89. 2020.

ULRICH, B. **Practical thoughts regarding filtered tailings**. Stantec Consulting Services, Cape Town, South Africa, p. 71-80, 2019.

VECCI, Andrea N. **Análise Probabilística da Estabilidade de um Talude de Mineração**. Dissertação de Mestrado. Pontífica Universidade Católica, PUC-RJ. Rio de Janeiro, RJ, p. 82. 2018.

VILAÇA, André S. I. **Valorização de Resíduos da Mineração de Ferro do Quadrilátero Ferrífero: Métricas de Avaliação na Perspectiva da Economia Circular**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, p. 81. 2020.