



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



Clarissa Maria Silva Honório

AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA DE UMA BARRAGEM DE TERRA: ABORDAGEM DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA

Ouro Preto

2022

Avaliação de segurança de uma barragem de terra: abordagem determinística e probabilística

Clarissa Maria Silva Honório

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

Data da aprovação: 14/06/2022

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. D.Sc. Eleonardo Lucas Pereira – UFOP

Ouro Preto

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

H774a Honório, Clarissa Maria Silva.

Avaliação de segurança de uma barragem de terra [manuscrito]:
Abordagem determinística e probabilística. / Clarissa Maria Silva Honório.
- 2022.

75 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Eleonardo Lucas Pereira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Geotecnia. 2. Estabilidade. 3. Barragem de terra. I. Pereira,
Eleonardo Lucas. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Clarissa Maria Silva Honório

Avaliação de segurança de uma barragem de terra: abordagem determinística e probabilística

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

Aprovada em 16 de junho de 2022

Membros da banca

[Doutor] - Eleonardo Lucas Pereira - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutora] - Iraydes Tálita de Sena Nola - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutor] - Felipe de Campos Loch - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Eleonardo Lucas Pereira], orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/06/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Eleonardo Lucas Pereira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/06/2022, às 18:26, 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 **0354473** e o código CRC **F3B73F32**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder essa conquista e me guiar durante os momentos difíceis dessa trajetória.

Aos meus pais, Olavo e Cláudia, que sempre me incentivaram e não mediram esforços para que essa conquista fosse possível.

Ao meu irmão Igor pelo apoio incondicional durante essa jornada.

Agradeço aos meus amigos e familiares que sempre me incentivaram e apoiaram.

A universidade, pelas oportunidades e pessoas as quais tive o prazer de compartilhar conhecimentos e experiências

À Fundação Gorceix e ao CPO pelo aprendizado e crescimento.

À Samarco Mineração SA pela oportunidade, por todo conhecimento proporcionado e por tornar possível a realização desse trabalho.

RESUMO

A atenção com a segurança de barragens tem ganhado lugar na engenharia geotécnica sobretudo após a repercussão dos últimos acidentes. Barragens de terra são estruturas muito utilizadas no Brasil para diversos tipos de empreendimentos e as condições de construção e manutenção dessas estruturas são essenciais para a sua segurança. A variabilidade dos parâmetros geotécnicos de solos e rochas presentes nessas estruturas reflete na segurança desses empreendimentos. Este trabalho tem como objetivo a análise de estabilidade de uma barragem de terra conforme critérios estabelecidos pela NBR 13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) por meio de uma abordagem determinística, pelo método do Equilíbrio Limite, e probabilística, utilizando o método de Monte Carlo e coeficientes de variação dos materiais presentes na estrutura estudada recomendados pela literatura. A metodologia deste trabalho consiste na modelagem computacional utilizando o software GeoStudio onde foram realizadas análises para a condição normal de operação da barragem obtendo-se assim os coeficientes de segurança determinísticos e probabilísticos. Os resultados obtidos mostram que os coeficientes de segurança calculados estão acima do valor mínimo determinado pela norma e, além disso, eles demonstram a importância da obtenção do índice de confiabilidade e da probabilidade de ruptura da barragem. Conclui-se que a realização de uma análise determinística associada a uma análise probabilística traz resultados mais completos e significativos para determinar a estabilidade da estrutura uma vez que a abordagem probabilística permite considerar a variabilidade dos parâmetros dos materiais presentes na barragem e fornece resultados da probabilidade de ruptura e índice de confiabilidade. Além disso, estas análises permitem obter diversos fatores de segurança e sua frequência de ocorrência na estrutura estudada. Uma complementação da análise determinística com a realização da análise probabilística é essencial para um maior controle dos resultados obtidos.

Palavras-chaves: Barragem de Terra, Equilíbrio Limite, Monte Carlo.

ABSTRACT

Attention to dam safety has gained a place in geotechnical engineering, especially after the repercussions of recent accidents. Fill dams are structures widely used in Brazil for various types of projects and the conditions of construction and maintenance of these structures are essential for their safety. The variability of the geotechnical parameters of soils and rocks present in these structures reflects on the safety of these projects. This work aims to analyze the stability of a fill dam according to criteria established by NBR 13.028/2017 through a deterministic approach, using the Limit Equilibrium method, and probabilistic, using the Monte Carlo method and material variation coefficients present in the studied structure recommended by the literature. The methodology of this work consists of computational modeling using GeoStudio software, where analyzes were carried out for the normal operating condition of the dam, thus obtaining deterministic and probabilistic safety coefficients. The results obtained show that the calculated safety coefficients are above the minimum value determined by the standard and, in addition, they demonstrate the importance of obtaining the reliability index and the probability of dam failure. It is concluded that performing a deterministic analysis associated with a probabilistic analysis brings more complete and significant results to determine the stability of the structure since the probabilistic approach allows considering the variability of the parameters of the materials present in the dam and provides results of the probability of rupture and reliability index. In addition, these analyzes allow us to obtain several safety factors and their frequency of occurrence in the structure studied. A complementation of the deterministic analysis with the performance of the probabilistic analysis is essential for a greater control of the obtained results.

Keywords: Fill Dam, Limit Equilibrium, Monte Carlo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de barragem de terra homogênea. Fonte: adaptado de (COSTA, 2012).....	4
Figura 2 - Exemplo de barragem de terra zonada. Fonte: adaptado de (COSTA, 2012).....	4
Figura 3 – Esforços na fatia “i”. Fonte: (TELLES, 2015).	10
Figura 4 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Fonte: (DIAS, 2021).	12
Figura 5 - Esforços na Fatia de Fellenius. Fonte: adaptado de (GERSCOVICH, 2009).....	13
Figura 6 – Esforços na fatia de Bishop. Fonte: adaptado de (GERSCOVICH, 2009).....	15
Figura 7 - Esforços na Fatia de Morgenstern-Price. Fonte: (GERSCOVICH, 2009).	16
Figura 8 - Ábaco de variação do fator f_0 em função das características dimensionais do talude e da granulometria do solo. Fonte: (FABRÍCIO, 2006).	18
Figura 9 – Forças atuantes na fatia pelo método de Spencer (1973). Fonte: (FABRÍCIO, 2006).....	20
Figura 10 - Convergência do Método de Spencer. Fonte: adaptado de (FABRÍCIO, 2006).....	21
Figura 11 – Distribuição estatística das médias da amostra da população. Fonte: (FABRÍCIO, 2006).....	23
Figura 12 - Função de probabilidade normal. Fonte: Autor.....	27
Figura 13 – Transformação da curva normal em curva normal padrão. Fonte: (FABRÍCIO, 2006).....	28
Figura 14 – Probabilidade de ruptura x grau de confiabilidade. Fonte: (FLORES, 2008).....	30

Figura 15 - Probabilidades de ruptura admissíveis. Fonte: (BAECHER, 1982b, apud FLORES, 2008).....	32
Figura 16 - Probabilidades de ruptura. Fonte: (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995, apud FLORES, 2008).....	33
Figura 17 - Probabilidade de ruptura crítica para barragens. Fonte: (BRITISH COLUMBIA HYDRO, 1995, apud FLORES, 2008).	33
Figura 18 – Comparação da probabilidade de falha em dois taludes com FS médio diferentes. Fonte: (SILVA e SOUSA, 2017).....	34
Figura 19 – Seção típica analisada e suas características. Fonte: Autor.....	39
Figura 20 – Método de grades e raios. Fonte: adaptado de (GEO-SLOPE, 2012).	42
Figura 21 – Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Morgenstern-Price. Fonte: Autor.....	46
Figura 22 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Spencer. Fonte: Autor.....	47
Figura 23 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Bishop simplificado. Fonte: Autor.	47
Figura 24 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Fellenius. Fonte: Autor.....	48
Figura 25 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Janbu Simplificado. Fonte: Autor.....	48
Figura 26 - Resultados das análises probabilísticas considerando a barragem na situação normal de operação. Fonte: Autor.....	52
Figura 27 - Distribuição de frequência para a situação normal de operação para 2.000 simulações Monte Carlo. Fonte: Autor.	53
Figura 28 - Distribuição de frequência para a situação normal de operação para 4.000 simulações Monte Carlo. Fonte: Autor.	53

Figura 29 - Distribuição de frequência para a situação normal de operação para 8.000 simulações Monte Carlo. Fonte: Autor.54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração. Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).....	8
Tabela 2 – Características dos Métodos de Equilíbrio Limite. Fonte: Autor.....	11
Tabela 3 – Covariância padrão para os principais parâmetros geotécnicos. Fonte: (SANDRONI E SAYÃO, 1992, apud REZENDE, 2013).	25
Tabela 4 - Coeficientes de Confiança para a distribuição normal. Fonte: (HARR, 1987, apud SILVA, 2015).	36
Tabela 5 – Pluviometria registrada na localização da barragem no período de julho a dezembro de 2021. Fonte: Autor.....	40
Tabela 6 – Parâmetros Geotécnicos de Resistência Efetiva dos Materiais. Fonte: Autor.....	40
Tabela 7 - Desvio Padrão dos Materiais. Fonte: Autor.	43
Tabela 8 - Intervalo de Variação das Características dos Materiais. Fonte: Autor.	44
Tabela 9 – Comparação entre os Fatores de Segurança críticos obtidos por meio de diferentes métodos para a condição normal de operação da barragem. Fonte: Autor.....	49
Tabela 10 - Comparação dos Fatores de Segurança críticos calculados e do Fator de Segurança Mínimo exigido pela NBR 13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).	50
Tabela 11 - Resultados das Análises Probabilísticas. Fonte: Autor.....	55

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo	2
1.1.1	Objetivos Específicos.....	2
2	Revisão Bibliográfica.....	3
2.1	Barragens de terra.....	3
2.2	Segurança de barragens	5
2.2.1	Critérios de estabilidade para barragens de rejeitos da mineração ..	6
2.3	Métodos determinísticos de estabilidade	9
2.3.1	Critério de Mohr-Coulomb.....	11
2.3.2	Método de Fellenius.....	12
2.3.3	Método de Bishop Simplificado	14
2.3.4	Método de Morgenstern-Price.....	16
2.3.5	Método de Janbu Simplificado	17
2.3.6	Método de Spencer.....	19
2.4	Métodos Probabilísticos de estabilidade.....	21
2.4.1	Conceitos de estatística	22
2.4.2	Probabilidade de Falha e Grau de Confiabilidade.....	29
2.4.3	Probabilidades de ruptura aceitáveis para um projeto	30
2.4.4	Simulação de Monte Carlo.....	35
3	Metodologia.....	38
3.1	Descrição da seção da barragem estudada	38
3.2	Parâmetros Geotécnicos de Resistência.....	40

3.3	Análises	41
3.3.1	Análise de Estabilidade Determinística	41
3.3.2	Análise de Estabilidade Probabilística	42
4	Resultados e discussões.....	46
4.1	Análises de Estabilidade Determinísticas	46
4.2	Análises Probabilísticas	51
5	Conclusão	57
	Referências.....	59

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens está associada ao desenvolvimento de uma determinada atividade econômica, seja ela do setor de agronegócio, setor energético, setor de mineração ou de outros. Como consequência da construção dessas estruturas, independente do seu porte, tem-se um risco associado ao dano potencial relativo à perda de vidas, prejuízos ao meio ambiente e bens materiais.

Segundo Ávila (2012) as principais causas de acidentes de barragens são problemas na fundação, falta de controle de erosão, instabilidade de taludes, capacidade inadequada de vertedouros, deficiências no controle e inspeção e falta de dispositivos graduais de segurança ao longo da vida útil da estrutura. Destacam-se os acidentes graves no Brasil envolvendo ruptura nos últimos anos: Barragem de Rio Verde (2001), Barragem de Fundão (2015) e Barragem Córrego do Feijão (2019).

Tal como citado, uma das causas dos acidentes em barragens é a instabilidade de taludes. Os métodos comumente utilizados para a análise de estabilidade de taludes são os determinísticos. Eles utilizam aproximações e generalizações, assim como a média dos parâmetros geotécnicos obtidos em ensaios de laboratório, para representar as propriedades dos solos presentes nos taludes, a fim de obter, por meio de cálculos, a estabilidade expressa através de um Fator de Segurança (FS).

Alternativamente, pode-se também utilizar métodos probabilísticos para a verificação da estabilidade. Esse procedimento associa determinadas funções de distribuição de probabilidade às variáveis envolvidas no problema, tal como a coesão, ângulo de atrito e peso específico dos materiais, resultando em um conjunto de fatores de segurança que permitem a obtenção de um fator de segurança probabilístico (FS_p) e a probabilidade de ruptura (PF) da estrutura em análise.

A estabilidade de taludes é uma das vertentes da engenharia geotécnica dominada pelas incertezas. Isso se deve pela variabilidade das propriedades dos solos e pelas simplificações dos modelos geotécnicos. Nesse cenário, as análises probabilísticas têm o potencial de ampliar o controle sobre a segurança de barragens, porém seu uso ainda não é algo amplo.

Dessa forma, neste trabalho foram realizadas análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de uma barragem de terra zonada para a sua condição normal de operação a fim de comparar os resultados obtidos por ambas as análises e discutir sobre as limitações e grau de incerteza dos dois métodos e também avaliar a segurança da estrutura estudada por meio das análises de estabilidade.

1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo realizar a avaliação de segurança de uma barragem de terra para condição normal de operação através de métodos determinísticos e probabilísticos de estabilidade.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Comparar os diferentes métodos de equilíbrio limite de análise de estabilidade de uma barragem de terra para a condição normal de operação;
- Introduzir uma abordagem probabilística na análise de estabilidade de uma barragem de terra para a condição normal de operação;
- Comparar os resultados das análises determinísticas e probabilísticas e discutir sobre as limitações e grau de incerteza dos dois métodos;
- Comparar valores obtidos nas análises com os valores recomendados pelas normas de avaliação de segurança de barragens.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Barragens de terra

Segundo a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, barragem pode ser definida como:

“Qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas” (BRASIL, 2020).

Segundo Cordeiro (2021) as barragens de terra são, normalmente, utilizadas quando o maciço de fundação não possui as condições necessárias para suportar estruturas de concreto. Além disso, essas estruturas são construídas com bases mais largas do que as barragens de concreto a fim de reduzir as tensões geradas no maciço de fundação. Por conta desses fatores, do menor custo de construção dessas estruturas quando comparado com outros tipos de barragens e da capacidade de adaptação das barragens de terra em diferentes cenários, elas estão entre os tipos de barragens mais encontrados no Brasil.

Para construir esse tipo de estrutura é necessário avaliar a disponibilidade de materiais na região do local de instalação da barragem.

De acordo com Costa (2012) essas barragens podem ser classificadas em dois tipos:

- Homogêneas: quando a estrutura é composta, predominantemente, por apenas um material, excluindo a proteção dos taludes. Nesse tipo de barragem o material necessita ser impermeável para assegurar uma barreira adequada contra a água. A Figura 1 ilustra um exemplo de barragem de terra homogênea;

- Zonadas: quando a estrutura é composta por diferentes tipos de materiais devido a disponibilidade de materiais de empréstimo na região de implantação da estrutura e em função da permeabilidade. A Figura 2 ilustra um exemplo de barragem de terra zonada.

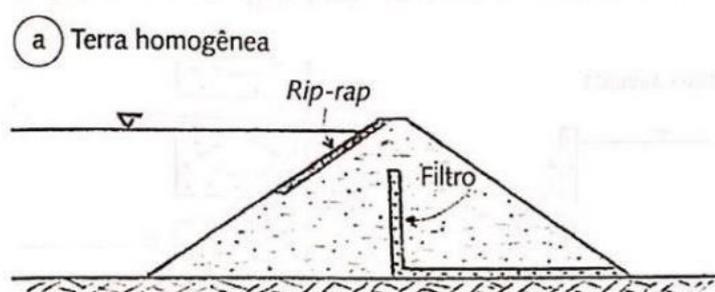


Figura 1 – Exemplo de barragem de terra homogênea. Fonte: adaptado de (COSTA, 2012).

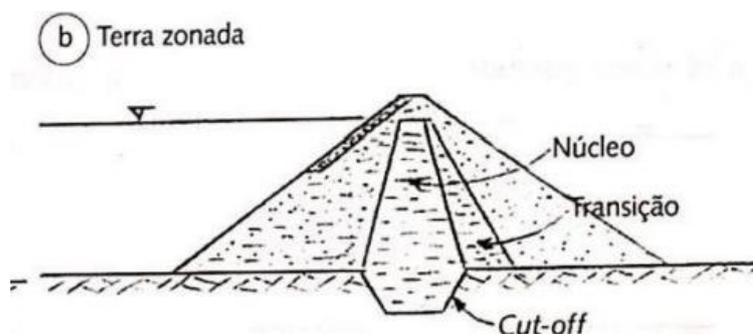


Figura 2 - Exemplo de barragem de terra zonada. Fonte: adaptado de (COSTA, 2012).

Massad (2010) afirma que as barragens de terra homogênea são as mais comuns no Brasil devido à grande disponibilidade de materiais terrosos no país. A inclinação dos taludes de montante e jusante é fixada de maneira a garantir a estabilidade durante a vida útil da barragem. O autor também afirma que as barragens de terra zonada são construídas com dois solos diferentes ou com um único solo de empréstimo, mas compactado em condições diferentes de umidade, o que confere ao solo características geotécnicas diferentes a fim de otimizar a seção da barragem

aproveitando-se das características do solo seco nas encostas, para maior resistência, e do solo úmido no núcleo, para maior estanqueidade.

Segundo Quintas (2002) para que as barragens de terra tenham um bom desempenho é necessário que elas assegurem os seguintes fatores:

- Impermeabilidade suficiente para evitar perdas de água pelo seu corpo;
- Estabilidade, através da sua geometria;
- Talude a montante da barragem deve ser protegido contra ondas por blocos de mão (rip-rap);
- Proteção a jusante a fim de evitar erosões;
- Sistema de drenagem eficiente.

2.2 Segurança de barragens

Segundo Ladeira (2007) até a década de 1960 informações sobre eventuais problemas e suas respectivas causas em obras similares a barragens não eram levadas em conta nos projetos e construções das mesmas. Porém, com a experiência dos engenheiros e problemas ocorridos durante e após a construção dessas estruturas, as etapas de projeto e estudos de retroanálise passaram a ganhar mais destaque. Essa informação pode ser validada pela diminuição do número de acidentes em barragens, o qual não cresceu na mesma proporção que o aumento do número dessas estruturas.

Segundo Leite (2019) o Boletim 99 da ICOLD (1995) reporta que cerca de 2,2% de todas as barragens construídas até 1950 romperam e apenas 0,5% das que foram construídas após esse período, de 1951 a 1986. “A maior parte das rupturas, cerca de 70%, ocorreu com barragens nos seus primeiros 10 anos de operação e, mais especialmente, no primeiro ano após seu comissionamento” (LEITE, 2019).

A maioria dos acidentes ocorridos nesses empreendimentos poderiam ter sido evitados por meio do monitoramento, inspeção e se medidas corretivas tivessem sido adotadas a tempo. Conhecendo o risco que a construção de uma barragem pode

proporcionar e a sua probabilidade de ruptura é necessário estudar maneiras de reduzir esse perigo.

Pensando no correto entendimento das diretrizes de segurança de barragens no Brasil, foram publicados a partir de 1983 pelo Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB) documentos com recomendações para inspeções, instrumentação e procedimentos de operação em barragens. Mas, apenas no ano de 2010 foi publicada a Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (BRASIL, 2010), que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) a qual determinava a classificação das estruturas em operação quanto ao risco e ao dano potencial e a confecção de um Plano de Ação Emergencial, dependendo do resultado da classificação da barragem. Além disso, essa lei determinou a criação de um Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) com a função de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre barragens em construção, operação ou desativadas. A finalidade dessa lei federal é reconhecer os perigos potenciais oferecidos pelas barragens e reduzi-los a níveis aceitáveis. Posteriormente essa lei foi atualizada pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 (BRASIL, 2020).

“Apesar dos avanços obtidos com segurança de barragens os conhecimentos acerca dos mecanismos que levam aos incidentes e acidentes em barragens não são de domínio total da engenharia” (MEDEIROS, 2003). Segundo Medeiros (2003) os modelos e simulações matemáticas utilizadas para cálculos de estabilidade das estruturas geram muitas incertezas visto que dependem de dados de entrada não confiáveis ou inexistentes, além da dependência de equipes técnicas qualificadas para as atividades de manutenção, monitoramento das barragens e de um sistema de auscultação eficiente

2.2.1 Critérios de estabilidade para barragens de rejeitos da mineração

Para realizar a verificação de estabilidade de uma barragem de terra é necessário analisar a resistência dos taludes e fundações quanto ao escorregamento. A avaliação de estabilidade deve ser feita segundo as condições de projeto ou condições de carregamento que o talude pode ser submetido durante sua vida. Segundo a NBR

13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) as análises de estabilidade devem envolver o maciço de partida e sua fundação, os maciços de alteamento (montante, linha de centro ou jusante), sua fundação e o rejeito disposto. Além disso, de acordo com essa norma as determinações de estabilidade das barragens devem ser realizadas para o projeto de cada estágio de implantação: (1) final da construção, (2) rebaixamento rápido do nível do reservatório, (3) percolação estável e (4) ocorrência de sismo.

Segundo Gaioto (2003) a condição de carregamento final de construção corresponde ao estágio anterior ao enchimento do reservatório e, nessa situação, considera-se que a construção do aterro provoca o desenvolvimento de poropressões por conta da adição de camadas, e a dissipação das mesmas ocorre de forma gradual conforme a velocidade de crescimento do aterro.

De acordo com Meirelles (2013) a condição de rebaixamento rápido pode ocorrer por conta de uma situação de emergência ou por fatores que envolvem a operação. Quando os materiais constituintes do aterro possuem baixa permeabilidade essa condição pode não provocar uma dissipação da poropressão, diminuindo a carga estabilizadora sobre o talude de montante. A simulação do rebaixamento pode ser de dois tipos, o primeiro variando o nível do reservatório da cota máxima de operação até o nível mínimo de operação, e o segundo, variando o nível máximo até o nível mais baixo que este reservatório pode atingir.

Para Gaioto (2003) a condição de percolação estável representa a situação na qual o nível do reservatório permanece em seu valor máximo por um período de tempo longo o suficiente para que ocorra a saturação do maciço nas zonas submetidas a percolação. Desse modo admite-se que ocorreu o adensamento do maciço e que a percolação tenha se estabilizado.

As análises sísmicas têm sido recomendadas mesmo em regiões assísmicas por conta da possibilidade de ocorrência de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório.

Assim, os taludes do reservatório devem apresentar estabilidade sob condições de precipitações elevadas, carregamentos sísmicos, rebaixamento rápido do lençol e

qualquer outra situação que ameace a ruptura da estrutura e coloque em risco a segurança. A Tabela 1 resume os fatores mínimos de segurança que são normalmente aceitáveis para os cálculos de estabilidade de barragens de acordo com a NBR 13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Tabela 1 - Fatores de segurança mínimos para barragens de mineração. Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção ^a	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço Maciço e fundações	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
		Montante e jusante	1,1
^a Etapas sucessivas de barragens alteadas com rejeitos não podem analisar como “final de construção”, devendo atender aos fatores de segurança mínimos estabelecidos para as condições de operação.			

2.3 Métodos determinísticos de estabilidade

A estabilidade de uma barragem é avaliada através dos cálculos de estabilidade de taludes de montante e jusante. Essas análises podem ser realizadas durante as etapas de construção da barragem e ao longo da sua vida útil.

Existem dois métodos para avaliar o fator de segurança de uma barragem do ponto de vista determinístico. São eles: a teoria do equilíbrio limite e os modelos matemáticos de tensão e deformação. De acordo com Thomaz (1984, apud PEREIRA, 2013) o método do equilíbrio limite possui algumas vantagens, tais como sua simplicidade, acurácia dos resultados, facilidade e baixo custo para as estimativas dos parâmetros de resistência do solo, e por isso tem sido mais utilizado.

Segundo Fabrício (2006) o método do equilíbrio limite é baseado nas seguintes hipóteses:

- A superfície de ruptura é bem definida;
- O critério de Mohr-Coulomb é satisfeito ao longo da superfície potencial de ruptura;
- O coeficiente de segurança é constante ao longo da superfície de ruptura.

A teoria do equilíbrio limite, de acordo com Fabrício (2006), pode ser dividida em três classificações: métodos que consideram a massa rompida como um corpo único, formulando hipóteses sobre as tensões ao longo das superfícies potenciais de ruptura; métodos que dividem essa massa em cunha e métodos que dividem a massa em fatias. Nesse trabalho será estudado o método das fatias.

Segundo Fabrício (2006) método das fatias ou método das lamelas consiste em dividir a superfície de ruptura potencial em fatias a analisá-las de maneira individual, como um único bloco deslizando e aplicar as equações de equilíbrio de forças e momentos. Para resolver essas equações é necessário adotar algumas hipóteses simplificadoras. Essas hipóteses e a forma da superfície de ruptura considerada diferenciam os diversos métodos das fatias propostos pela literatura para determinação do fator de segurança. A escolha da metodologia a ser utilizado na

análise de estabilidade deve ser em função da forma da ruptura esperada. Esse procedimento é o mais utilizado pelos programas computacionais devido a sua facilidade em adaptar superfícies de geometria complexa, com condições variáveis de solos e rochas e com interferência de cargas.

O método das fatias considera a heterogeneidade do solo quanto a tensões, geometria do talude e irregularidade da superfície considerada, além disso ele permite a distribuição da poropressão quando necessário, de modo que seja possível analisar a situação mais crítica.

Conforme Telles (2015) mostra, a Figura 3a mostra uma superfície dividida em fatias e uma fatia “i” genérica em e as forças atuantes sobre ela em (b), onde W_i é o peso da fatia, N'_i é a resultante das tensões efetivas normais à base da fatia, U_i a resultante das poropressões na base da fatia, T_i a resultante das tensões tangenciais mobilizadas na base da fatia, E_i e X_i as componentes normal e tangencial, respectivamente, das forças de interação entre as fatias na face esquerda e, E_{i+1} e X_{i+1} são as componente das forças de interação entre as fatias na face direita.

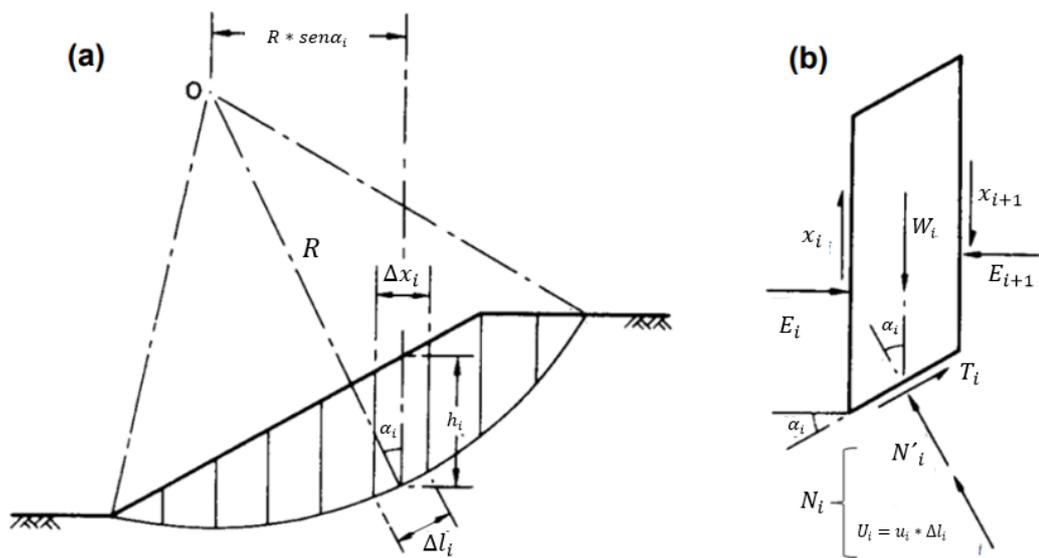


Figura 3 – Esforços na fatia “i”. Fonte: (TELLES, 2015).

Na Tabela 2 é apresentado um resumo das características dos métodos de equilíbrio limite utilizados nesse trabalho.

Tabela 2 – Características dos Métodos de Equilíbrio Limite. Fonte: Autor.

Método	Superfície de ruptura	Características
Fellenius (1927)	Circular	Não considera forças entre fatias
Bishop simplificado (1955)	Circular	Resultante das forças entre fatias é horizontal
Morgenstern e Price (1965)	Qualquer	Localização da força normal entre fatias definida por uma linha de empuxo arbitrária $f(x)$
Janbu Simplificado (1968)	Qualquer	Resultante das forças entre fatias é horizontal
Spencer (1973)	Qualquer	Resultante das forças entre fatias têm inclinações constantes através da massa do solo

2.3.1 Critério de Mohr-Coulomb

Segundo Dias (2021) no critério de Mohr-Coulomb o colapso ocorre quando a tensão cisalhante atuante no plano de resistência alcança o valor da tensão cisalhante de resistência do material. A envoltória é uma curva, mas pode ser ajustada por uma reta no intervalo das tensões normais de interesse. A equação de uma reta para descrever a resistência de materiais dentro da mecânica dos solos foi proposta por Coulomb, a expressão é apresentada na Equação 1:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (\text{Equação 1})$$

Na qual:

τ é a tensão de cisalhamento durante ruptura;

σ é a tensão normal;

c é a coesão do material;

ϕ é o ângulo de atrito do material.

A equação é definida em função das tensões normais (σ) e tensões cisalhantes (τ). O ponto onde a reta intercepta o eixo Y representa a coesão e o coeficiente angular da reta é igual ao ângulo de atrito do material.

A Figura 4 apresenta o comportamento das tensões atuantes na superfície de resistência de Mohr-Coulomb de acordo com a Equação 1.

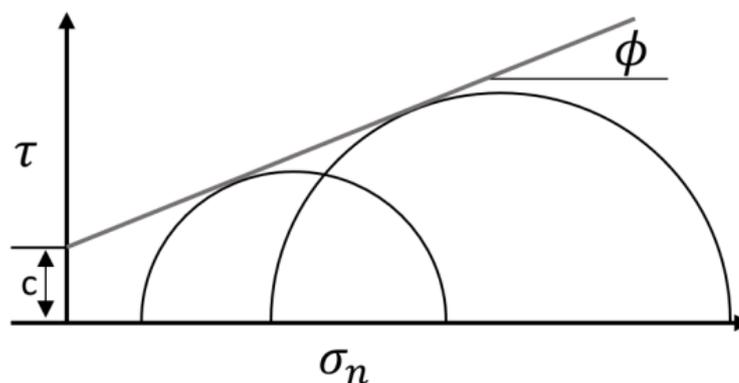


Figura 4 - Critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Fonte: (DIAS, 2021).

2.3.2 Método de Fellenius

Segundo Telles (2015) o método de Fellenius é um método de análise simplificado pois ele não atende às três equações básicas do equilíbrio estático, é possível realizar os cálculos sem a necessidade de uso de recursos computacionais. A metodologia de Fellenius considera que os esforços entre fatias são nulos como premissa básica de cálculo.

O cálculo do fator de segurança considera apenas o equilíbrio forças na direção normal à superfície de deslizamento e o equilíbrio de momentos, assim como mostra a Figura 5. Além disso, essa metodologia considera a superfície de ruptura circular.

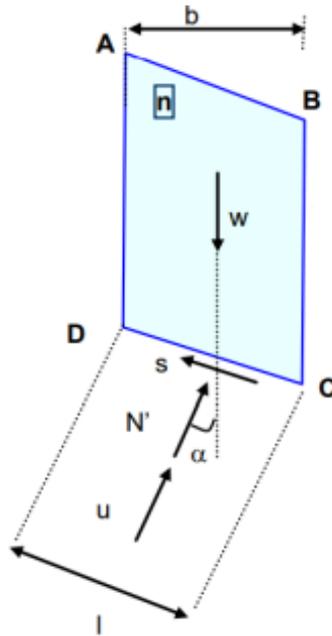


Figura 5 - Esforços na Fatia de Fellenius. Fonte: adaptado de (GERSCOVICH, 2009).

Desse modo, a Equação 2 apresenta o fator de segurança pelo método considerando a ausência de poropressão.

$$FS = \frac{\sum(c\beta + N \tan \phi)}{\sum W \sin \alpha} = \frac{\sum S_{resistente}}{\sum S_{mobilizado}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

FS é o fator de segurança;

c é a coesão

β é o comprimento da base da fatia;

N é a força normal da base;

ϕ é o ângulo de atrito;

W é o peso da fatia;

α é a inclinação da base da fatia.

Por sua vez, a Equação 3 apresenta o cálculo do fator de segurança considerando a poropressão como parcela contra segurança.

$$FS = \frac{\sum [c'(b/\cos \alpha) + (W \cos \alpha - u(b/\cos \alpha)) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

c' é a coesão efetiva do solo;

ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo;

u é a poropressão média aplicada na base da fatia.

De acordo com Gerscovich (2012) esse método tende a ser mais conservativo e fornecer valores mais baixos para o FS.

2.3.3 Método de Bishop Simplificado

Conforme Silva (2019) o método de Bishop Simplificado (1955), idealizado pelo professor Alan W. Bishop nos anos de 1950, é um método que desconsidera a componente tangencial das forças entre as fatias de modo que a resultante entre elas é horizontal, assim como mostra a Figura 6. Esse método não satisfaz os momentos individuais de cada fatia, Tal como o método de Fellenius, Bishop Simplificado também considera a superfície de ruptura com forma circular.

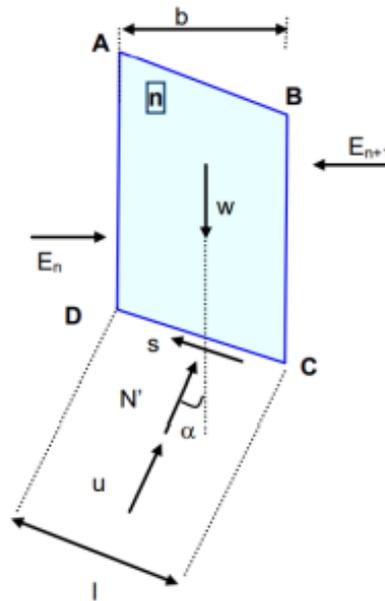


Figura 6 – Esforços na fatia de Bishop. Fonte: adaptado de (GERSCOVICH, 2009).

A Equação 4 apresenta a equação para o cálculo do fator de segurança.

$$FS = \frac{\sum (c' b + (W - ub) \tan \phi') \frac{1}{m_\alpha}}{\sum W_i \sin \alpha} \quad (\text{Equação 4})$$

E m_α é expresso pela Equação 5:

$$m_\alpha = \cos \alpha \frac{\sin \phi' \tan \alpha}{FS} \quad (\text{Equação 5})$$

Para o cálculo do fator de segurança é necessário um processo iterativo de cálculo, o qual demanda, inicialmente, de um palpite para o valor do FS no cálculo do m_α . O processo é repetido até que o valor de FS esteja dentro de uma tolerância especificada. Normalmente, é necessário apenas algumas iterações para atingir a solução convergida (DIAS, 2021).

Segundo Gerscovich (2012) a diferença entre os Fatores de Segurança obtidos pelo método de Bishop Simplificado e os métodos mais rigorosos, tal como Morgenstern-Price e Spencer não ultrapassa 5%.

2.3.4 Método de Morgenstern-Price

Segundo Silva (2019) o Método de Morgenstern-Price é o método mais geral de equilíbrio limite. O cálculo de fator de segurança, apresentado pelos professores Dr. Morgenstern e Dr. Price, apresenta uma particularidade de permitir superfícies de ruptura em formato não circular.

Essa metodologia, considerada como uma das mais rigorosas, atende a todas as condições de equilíbrio de forças e momentos. A massa é dividida em fatias infinitesimais e devido à complexidade de cálculo esse método requer recursos computacionais para ser realizado.

As forças atuantes nas fatias são mostradas na Figura 7, onde P_w é a poropressão no contorno entre fatias e dP_b é a resultante da poropressão na base da fatia, os esforços entre as fatias são E e T , o peso é dW e a resistência da base é ds .

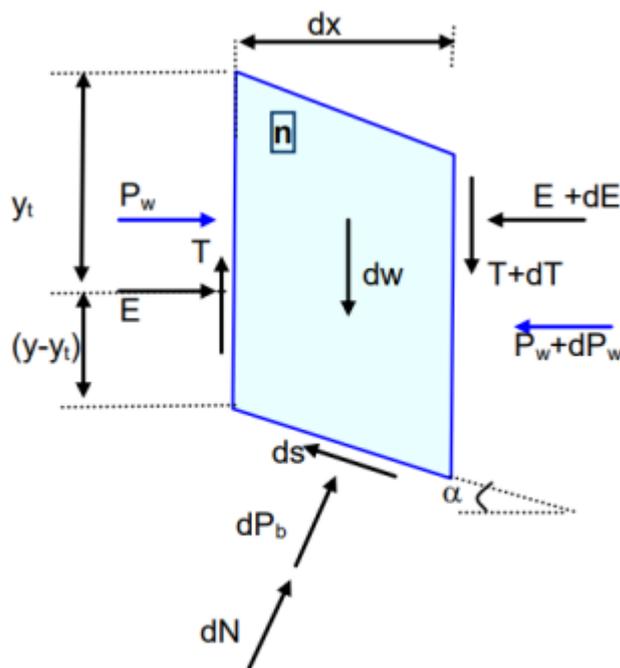


Figura 7 - Esforços na Fatia de Morgenstern-Price. Fonte: (GERSCOVICH, 2009).

Desse modo, para resolver os cálculos do método, a Equação 6 ou Equação 7 podem ser utilizadas.

$$\frac{T}{E} = \lambda * f(x) \quad (\text{Equação 6})$$

$$\tan \theta = \frac{T}{E} = \lambda * f(x) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

λ é a constante a ser determinada através da solução de cálculo do FS;

$f(x)$ é a função que precisa ser especificada;

E é a componente normal da resultante das forças entre fatias;

T é componente tangencial resultante das forças entre fatias.

Segundo Gerscovich (2019) para $f(x)$ nula a solução é idêntica à de Bishop e para $f(x)$ constante a solução torna-se idêntica a solução de Spencer.

2.3.5 Método de Janbu Simplificado

O método de Janbu Simplificado é uma simplificação de um método rigoroso de fatias. Segundo Gerscovich (2012) essa metodologia foi desenvolvida a fim de reduzir o esforço computacional exigido pelo método rigoroso e permitir a obtenção do Fator de Segurança através de cálculos mais simples.

A metodologia de Janbu Simplificada baseia-se no equilíbrio de forças, desconsiderando as componentes verticais tangenciais às laterais das fatias (Y_i e Y_{i+1}). Para satisfazer parcialmente o equilíbrio de momentos existe um fator de correção f_0 , o qual depende do tipo de solo e do formato das superfície de ruptura, assim como ilustrado na Figura 8.

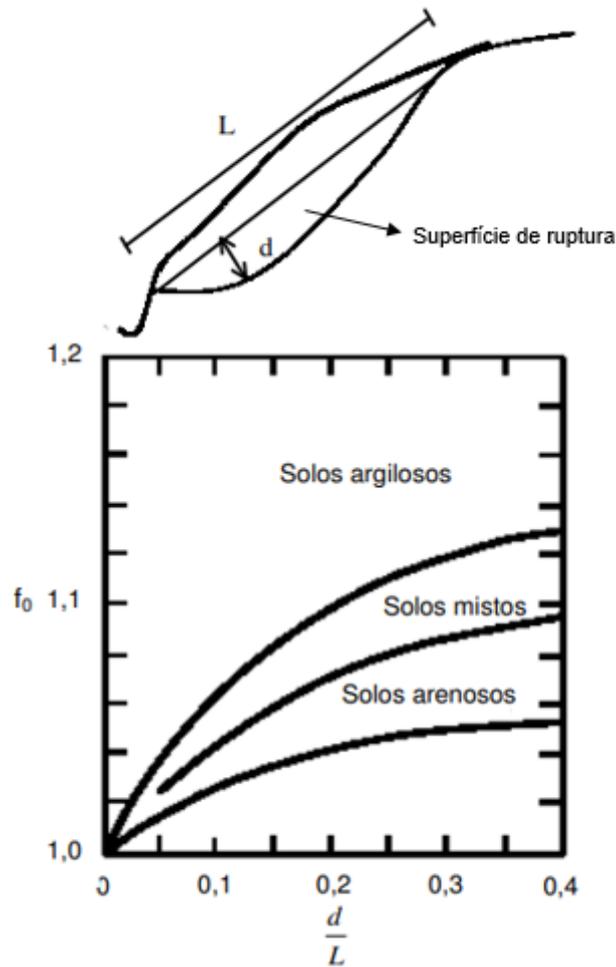


Figura 8 - Ábaco de variação do fator f_0 em função das características dimensionais do talude e da granulometria do solo. Fonte: (FABRÍCIO, 2006).

O fator de segurança nesse método é dado pela Equação 8.

$$FS = \frac{f_0}{\sum W \tan \alpha} \sum [c' b + (W - ub) \tan \phi'] / \cos \alpha m_\alpha \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

$$m_\alpha = \cos \alpha \left[1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{FS_i} \right] \quad (\text{Equação 9})$$

Segundo Boutup et. al (1979, apud FABRÍCIO, 2006) os fatores de segurança obtidos por esse método são menos confiáveis em análises de estabilidade com

superfícies de ruptura profundas, que interceptam a superfície do solo no topo do talude com ângulos elevados.

Segundo Gerscovich (2012) o método de Bishop Simplificado e o método de Janbu Simplificado são muito utilizados devido a sua rapidez e facilidade no cálculo do Fator de Segurança. Entretanto, como eles não satisfazem rigorosamente o equilíbrio de força e momento, existe a possibilidade de que fatores de segurança obtidos através desses métodos sejam diferentes dos fatores de segurança determinados por métodos que satisfazem completamente as condições de equilíbrio.

2.3.6 Método de Spencer

De acordo com Telles (2015) o método de Spencer é uma metodologia rigorosa tal como o método de Morgenstern-Price, pois também satisfaz as condições de equilíbrio de forças e momentos. Inicialmente, ela foi desenvolvida para superfícies de ruptura de forma circular e, posteriormente, passou por adaptações a fim de atender superfícies de formas irregulares.

Essa metodologia baseia-se na premissa de que todas as fatias possuem inclinações de mesmo ângulo, o qual é calculado dentro do processo de solução do problema. Spencer considerou que as forças $X_i, Y_i, X_{i+1}, Y_{i+1}$ poderia ser substituídas por uma resultante Q_i inclinada em um ângulo δ_i com a horizontal. Essa resultante atua no ponto médio da base da fatia e passa pelo ponto de intercessão da força peso da fatia (W_i), da resultante das tensões normais efetivas (N_i) e da resultante da resistência ao cisalhamento mobilizada ao longo da base da fatia (T_i), assim como ilustrado na Figura 9.

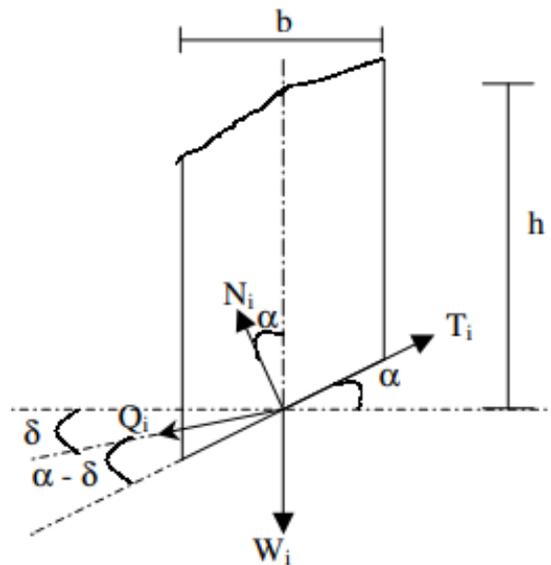


Figura 9 – Forças atuantes na fatia pelo método de Spencer (1973). Fonte: (FABRÍCIO, 2006).

De acordo com Telles (2015), com a imposição do equilíbrio de forças nas direções normal e tangencial à base da fatia e adotando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb encontra-se a Equação 10.

$$Q = \frac{\frac{c'b \sec \alpha}{F} + \frac{\tan \phi' (h \cos \alpha - ub \sec \alpha)}{F} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \delta) * [1 + \frac{\tan \phi \tan(\alpha - \delta)}{F}]} \quad (\text{Equação 10})$$

Segundo Fabrício (2006) supondo a ausência de forças externas atuantes no talude, as componentes horizontal e vertical da força devem ser nulas, sendo assim:

$$\sum Q \cos \delta = 0 \quad (\text{Equação 11})$$

$$\sum Q \sin \delta = 0 \quad (\text{Equação 12})$$

Como a soma dos momentos das forças externas em relação ao centro de rotação (0) é nula, a soma dos momentos das forças entre fatias em relação ao mesmo ponto 0 também deve ser nula. Assim:

$$\sum QR \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (\text{Equação 13})$$

Adotando ângulo δ_i constante para todas as fatias, tem-se:

$$\sum Q = 0 \quad (\text{Equação 14})$$

Com a Equação 14 e Equação 13, e variando o ângulo δ calculam-se dois fatores de segurança diferentes, um deles baseado na equação de equilíbrio de forças e o outro na equação de equilíbrio de momentos. A interseção das curvas representa o fator de segurança da estrutura, assim como ilustrado na Figura 10.

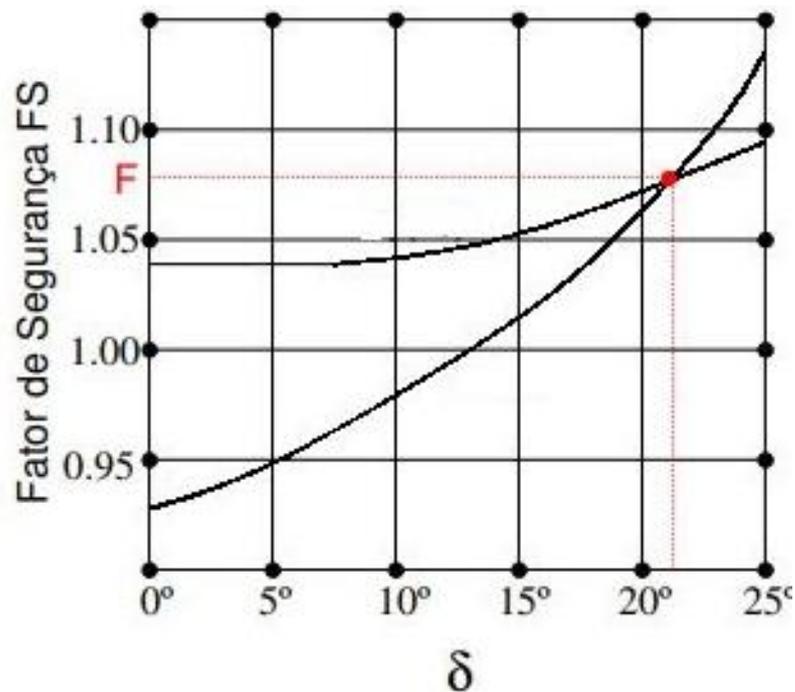


Figura 10 - Convergência do Método de Spencer. Fonte: adaptado de (FABRÍCIO, 2006).

2.4 Métodos Probabilísticos de estabilidade

Segundo Netto (2019) os solos são materiais formados naturalmente, conseqüentemente, suas propriedades físicas variam de ponto a ponto. Esta variação ocorre mesmo em uma camada aparentemente homogênea. A variabilidade no valor das propriedades do solo é um dos principais contribuintes para a incerteza na estabilidade. Uma das incertezas dos métodos do equilíbrio limite é a pouca

representatividade das variações nas características geotécnicas em uma massa de solo de grandes proporções, assim como de barragens.

Diante disso, a análise probabilística de estabilidade de taludes permite não somente considerar a variabilidade nos parâmetros de entrada a fim de obter um fator de segurança probabilístico (FS_p), mas também quantificar a probabilidade de falha (PF), o que permite saber o grau de confiabilidade da análise (β).

“A análise probabilística não possui grande abrangência na prática da engenharia geotécnica, embora seu entendimento e suas vantagens já não sejam novidade” (APAZA e BARROS, 2018).

A seguir, são apresentados alguns conceitos de probabilidade e estatística cuja compreensão facilita a assimilação das análises probabilísticas.

2.4.1 Conceitos de estatística

Uma análise estatística tem como objeto de estudo um grupo nomeado de universo. O universo engloba, na estabilidade de taludes, os parâmetros geotécnicos envolvidos de forma direta e indireta com o fator de segurança relacionado à ruptura.

O conjunto de valores possíveis a serem medidos e que possuem as mesmas características são chamados de população. Para as análises de estabilidade os exemplos de população que formam o universo são: ângulo de atrito, coesão, nível da água, peso específico do solo. Uma unidade de amostragem é o valor dado para cada elemento da população e a amostra é o conjunto de unidades de amostragem.

2.4.1.1 Tendência central

De acordo com Rezende (2013) a maior parte dos dados de uma amostra apresentam uma propensão de se concentrar em torno de um ponto central. De maneira geral, as medidas de tendência central resumem as principais características do conjunto de dados. Caso sejam realizadas séries de determinações com “n”

medidas aleatórias é possível calcular a média aritmética para cada amostra pela Equação 15.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

\bar{X} é média da amostra;

n é número de medidas da série (tamanho da amostra);

x_i é valor individual de cada medida da amostra.

Por meio de um histograma é possível visualizar que as maiores quantidades de valores ocorrem em torno do intervalo de valor central μ , o qual corresponde à média da população estudada.

O histograma ilustra como uma determinada amostra ou população está distribuída, auxiliando na visualização da distribuição de dados. Ele possui dois eixos, o horizontal é dividido em intervalos de valores e o vertical indica as porcentagens de valores encontrados em cada intervalo. A Figura 11 exemplifica um histograma.

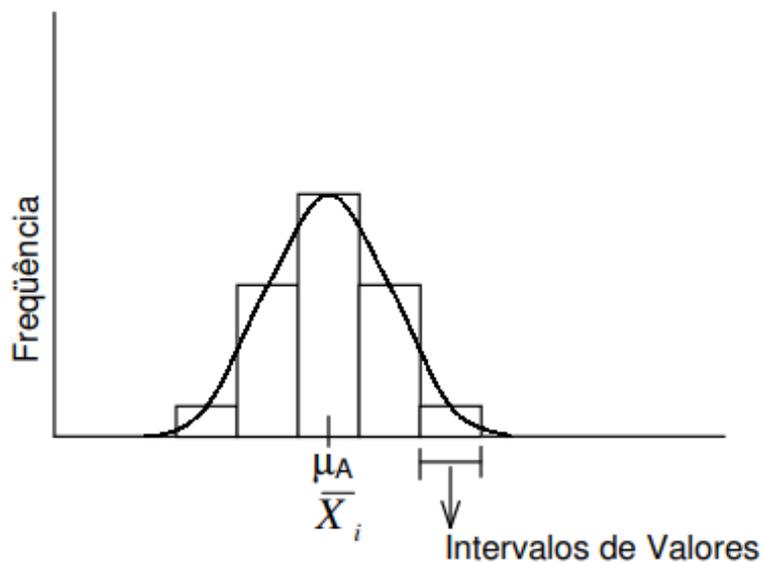


Figura 11 – Distribuição estatística das médias da amostra da população.

Fonte: (FABRÍCIO, 2006).

Entretanto, segundo Rezende (2013), diversas vezes não é possível realizar medida de todas as unidades de uma amostra de uma população, desse modo a Equação 16 é a maneira adotada para estimativa μ da população.

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x * f(x) * d(x) \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

$f(x)$ é a função distribuição de probabilidade;

μ é a média da população.

A média é uma informação relevante para as análises de estabilidade, uma vez que em análises determinísticas ela é adotada como valor para os parâmetros geotécnicos. Porém, para as análises probabilística são utilizadas outras características das variáveis.

2.4.1.2 Medidas de variação

“Medidas de variação indicam a quantidade de dispersão ou espalhamento dos dados e podem ser representados em um histograma assim como na Figura 11” (REZENDE, 2013). A forma utilizada para estimar a dispersão de uma amostra ou de uma população é por meio do desvio padrão e da variância.

O desvio padrão é a raiz quadrada da soma das diferenças ao quadrado em torno da média aritmética dividida pelo tamanho da amostra menos 1, conforme a Equação 17.

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

\bar{X} é média da amostra;

n é número de medidas da série (tamanho da amostra);

x_i é valor individual de cada medida da amostra.

O coeficiente de variação C.V mede a dispersão de dados em relação à média aritmética e é expresso como porcentagem, assim como mostra a Equação 18.

$$C.V = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

C. V é o coeficiente de variação;

S é o desvio padrão amostral;

\bar{X} é a média aritmética.

Segundo Fabrício (2006), para a estimativa do desvio padrão amostral (s) ou desvio padrão de uma população (σ), em análises de estabilidade, existem dois métodos. O primeiro consiste em realizar de oito a dez ensaios, utilizando o desvio padrão encontrado como estimativa. Caso não haja ensaios suficientes para o estudo deve-se adotar valores existentes na literatura para os principais parâmetros geotécnicos, assim como mostra a Tabela 3.

**Tabela 3 – Covariância padrão para os principais parâmetros geotécnicos.
Fonte: (SANDRONI E SAYÃO, 1992, apud REZENDE, 2013).**

Parâmetros	Valor recomendado (%)	Coeficiente de variação (%)
Peso específico	3	02 a 08
Coesão efetiva	40	20 a 80
Ângulo efetivo de resistência	10	04 a 20
Coesão não drenada	30	20 a 50

Já a variância é, aproximadamente, a média das diferenças ao quadrado entre cada observação feita de um conjunto de dados e a média aritmética do conjunto, é também o quadrado do desvio padrão (s^2 ou σ^2).

2.4.1.3 Probabilidade

“Probabilidade é um termo utilizado para quando existe mais de uma possibilidade de um evento acontecer dentre de certos eventos alternativos” (ANG & TANG, 1975, apud SILVA, 2015).

2.4.1.4 Cálculo de probabilidade

Para calcular a probabilidade é preciso conhecer o espaço amostral (S) estudado. A partir disso, a probabilidade de um determinado evento A ocorrer é denominada de P(A) e pode ser calculada por meio da Equação 19.

$$P(A) = \frac{n(A)}{n(S)} \quad (\text{Equação 19})$$

Onde:

P(A) é a probabilidade de ocorrência do evento A;

n(A) é o número de elementos do evento A;

n(S) é o número de elementos do espaço amostral.

2.4.1.5 Variáveis aleatórias

Uma variável aleatória é uma variável quantitativa na qual o valor depende de fatores aleatórios. Do ponto de vista matemático, variável aleatória é uma função que associa elementos do espaço amostral valores numéricos.

2.4.1.6 Distribuição da probabilidade dos parâmetros geotécnicos

A distribuição de probabilidade trata-se de um modelo matemático que relaciona um valor da variável em estudo com a sua probabilidade de ocorrência. Para descrever essa distribuição de probabilidade existem vários métodos descritos pela literatura, assim como a distribuição normal, log-normal, binomial, geométrica,

Poisson, hiperbólica, entre outras. Nesse trabalho será apresentado a distribuição normal, a qual será utilizada nas análises desse estudo.

Segundo Rezende (2013) a distribuição normal, também conhecida como distribuição de Gauss, é uma das mais utilizadas na geotecnia e apresenta uma função curva simétrica, em forma de sino (Figura 12). Essa função é dada pela Equação 20.

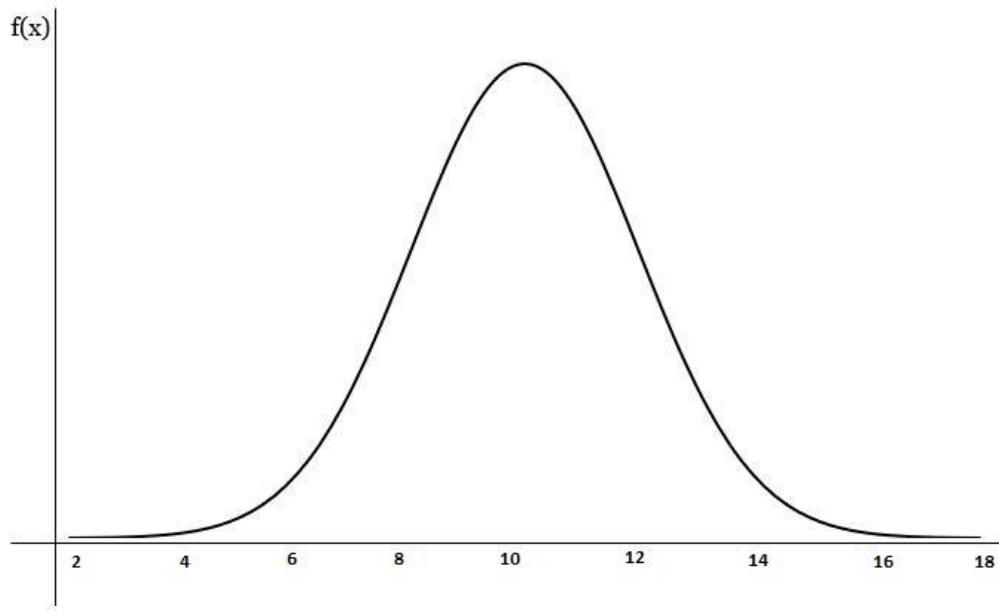


Figura 12 - Função de probabilidade normal. Fonte: Autor.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Equação 20})$$

“Para saber a probabilidade de uma variável ser menor que um determinado valor integra-se a Equação 20” (REZENDE, 2013), assim como mostrado abaixo:

$$\int_{-\infty}^a f(x)dx = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (\text{Equação 21})$$

De acordo com Fabrício (2006) como não existe uma solução analítica para a Equação 21, utilizam-se métodos numéricos para a sua resolução. Esses métodos transformam a curva de distribuição normal em uma curva de distribuição normal padrão com desvio padrão $\sigma = 1$ e média $\mu = 0$. Sendo assim, substituindo esses

valores na Equação 21 a probabilidade de uma variável aleatória (x) ser menor ou igual a z é dada pela Equação 22:

$$f(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (\text{Equação 22})$$

Onde z é uma variável aleatória dada pela Equação 23:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma(x)} \quad (\text{Equação 23})$$

Desse modo, qualquer distribuição normal pode ser transformada em uma distribuição normal padrão, conforme mostra a Figura 13, em que duas curvas com desvio padrão e tendências centrais diferentes adquirem a mesma forma após a aplicação da Equação 22 e Equação 23.

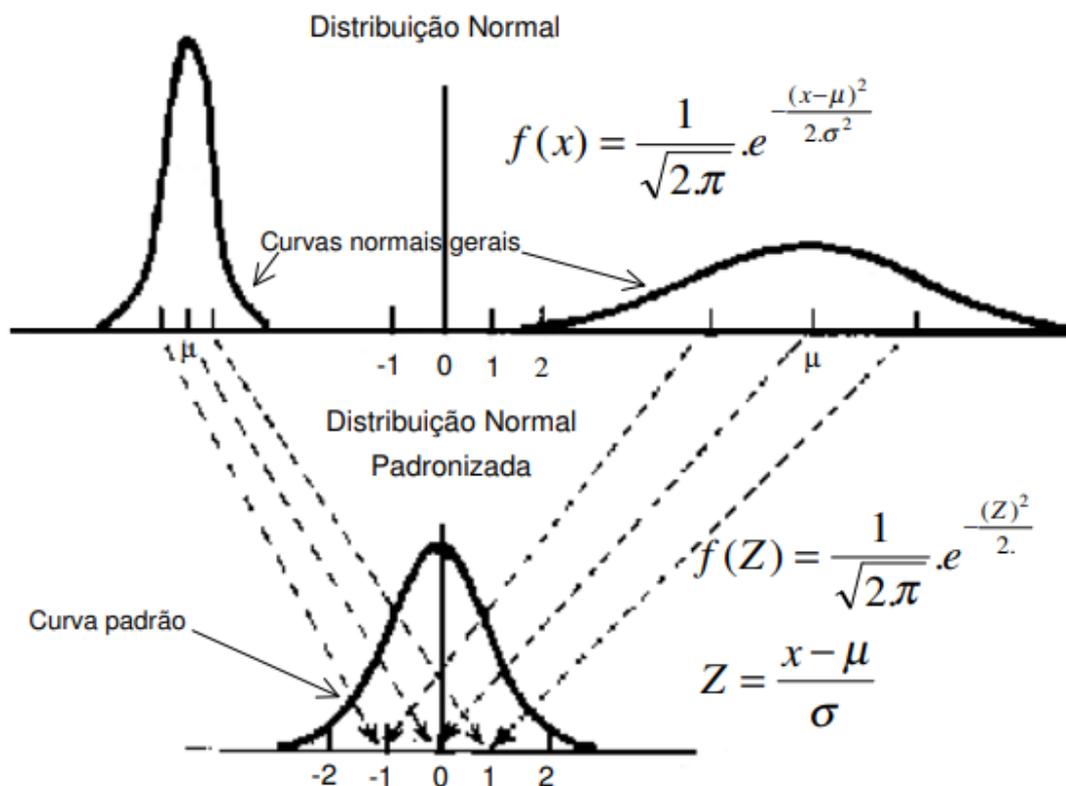


Figura 13 – Transformação da curva normal em curva normal padrão. Fonte: (FABRÍCIO, 2006).

2.4.2 Probabilidade de Falha e Grau de Confiabilidade

Segundo Flores (2008) o primeiro passo na realização de uma análise probabilística é definir uma função probabilidade representativa para cada parâmetro que seja uma incerteza na análise ou que tenha influência no resultado, pois elas serão utilizadas a fim de estimar a distribuição de probabilidade do Fator de Segurança.

Flores (2008) define a probabilidade de falha como a probabilidade do fator de segurança ultrapassar o estado limite, o qual, em uma análise de estabilidade, é limitado por $FS = 1$. A probabilidade de falha pode ser obtida por meio do cálculo do grau de confiabilidade dado pela Equação 24.

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (\text{Equação 24})$$

Onde, μ_M é o valor médio, σ_M é o desvio padrão da margem de segurança e M é a margem de segurança obtida pela Equação 25 para distribuição normal de probabilidade, e na qual R é a resistência e Q é a tensão à qual o sistema está exposto.

$$M = R - Q \quad (\text{Equação 25})$$

Para uma distribuição normal de probabilidade, que será empregada nesse trabalho, a margem de segurança também será normalmente distribuída, desse modo, o grau de confiabilidade pode ser obtido pela Equação 26, na qual $E[FS]$ é o fator de segurança médio.

$$\beta = \frac{E[FS] - 1}{\sigma_M} \quad (\text{Equação 26})$$

Desse modo, segundo Flores (2008) a probabilidade de falha pode ser definida como:

$$PF = 1 - \phi(B) = \phi(-B) \quad (\text{Equação 27})$$

Onde $\phi(-B)$ é obtido pela função de densidade de probabilidade normal.

A Figura 14 é o gráfico da Probabilidade de Ruptura em função do grau de confiabilidade para várias distribuições de probabilidade. Por meio dele é possível

observar que para um grau de confiabilidade menor ou igual a 2 há pouca diferença entre os valores de PF obtido por diferentes distribuições de probabilidade, além disso, para pequenos valores de β a probabilidade de ruptura é maior para a distribuição de probabilidade normal, dessa maneira assumir a distribuição de probabilidade normal, na ausência de dados é um procedimento a favor da segurança.

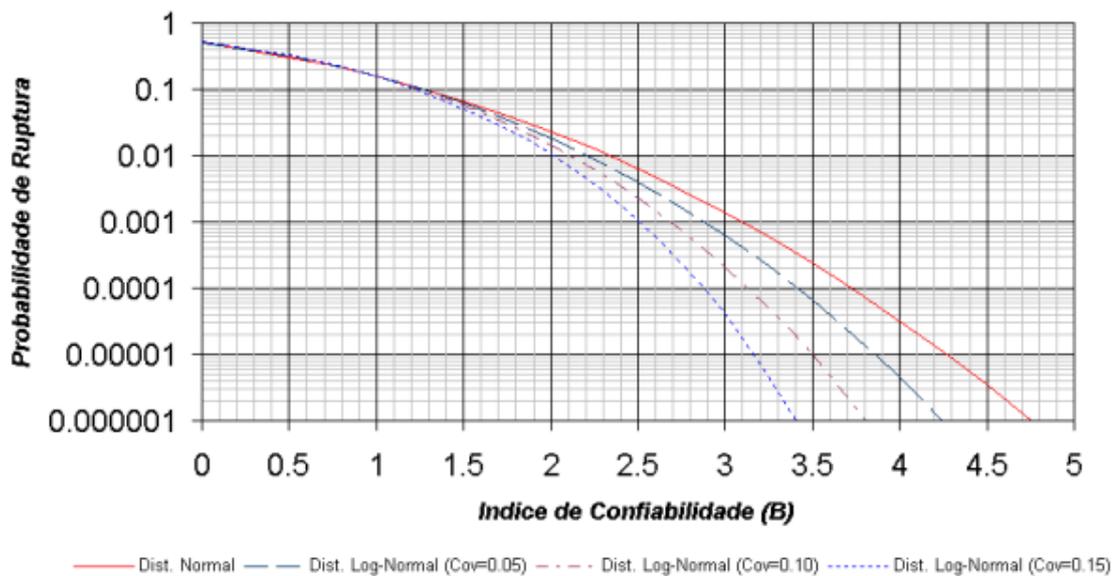


Figura 14 – Probabilidade de ruptura x grau de confiabilidade. Fonte: (FLORES, 2008).

2.4.3 Probabilidades de ruptura aceitáveis para um projeto

De acordo com Netto (2019) a possibilidade de ruptura existe em qualquer projeto de engenharia mesmo que tenha sido um projeto bem elaborado e que sua execução tenha seguido à risca os projetos de execução. A palavra falha não implica necessariamente na ruína ou ruptura do empreendimento, mas também a um desempenho inaceitável para o qual o projeto foi realizado.

A partir da determinação de um risco admissível em um dado empreendimento pode-se adotar uma probabilidade de ruptura aceitável e, indo mais além, estabelecer intervalos de probabilidade aceitáveis para determinados problemas.

A definição de risco é dada por:

$$\text{Risco} = (\text{Probabilidade} \times \text{Consequência}) \quad (\text{Equação 28})$$

A partir disso é possível concluir que a probabilidade de ruptura admissível deve ser em função do risco que se queira assumir e das consequências associadas a esse risco.

Em projetos geotécnicos a cautela com a probabilidade de falha deve ser ainda maior devido à variabilidade das propriedades dos materiais. Por isso, para a análise da probabilidade de falha é necessário a consideração da variabilidade dos parâmetros. Os parâmetros são adotados como variáveis aleatórias e podem assumir qualquer valor dentro de um intervalo associado a uma distribuição de probabilidades, com média e desvio padrão. Desse modo, é possível obter um intervalo de resultados possíveis e suas probabilidades de ocorrência.

Alguns autores desenvolveram formas de associação da probabilidade de ruptura com suas consequências a fim de estabelecer um padrão para o gerenciamento de risco.

Baecher (1982b, apud FLORES, 2008) expõe diferentes probabilidades de ruptura admissíveis, baseadas no tipo de estrutura construída. Para barragens, é considerada aceitável uma probabilidade de ruptura inferior a 10^{-4} (Figura 15).

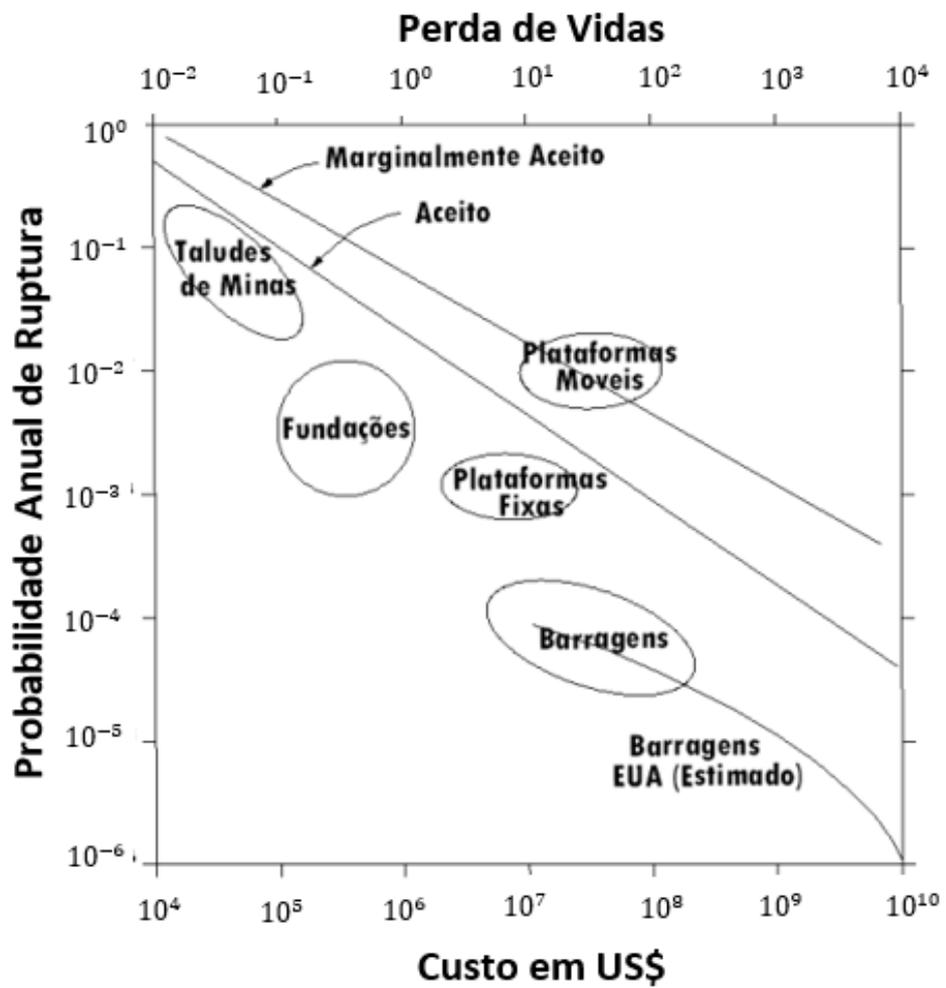


Figura 15 - Probabilidades de ruptura admissíveis. Fonte: (BAECHER, 1982b, apud FLORES, 2008).

O "US Army Corps of Engineers" (apud FLORES, 2008) propõe um nível aceitável com probabilidade de ruptura de 3×10^{-5} conforme a Figura 16.

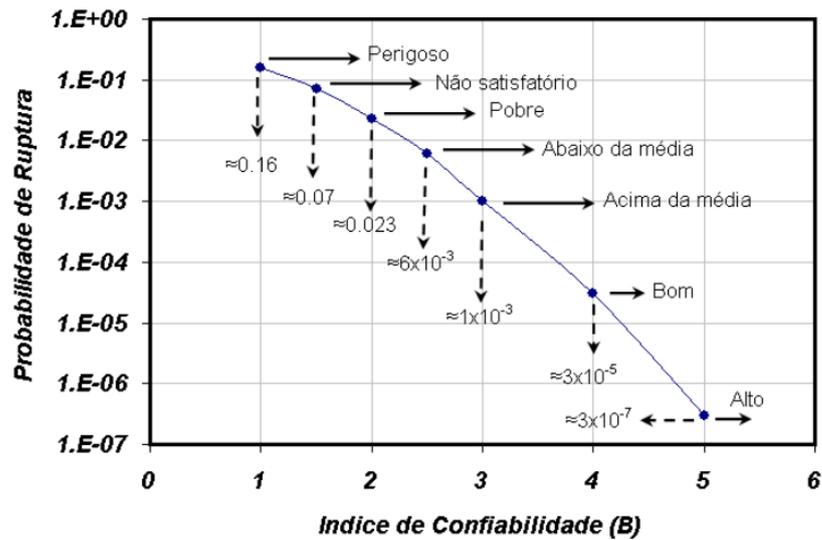


Figura 16 - Probabilidades de ruptura. Fonte: (US ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995, apud FLORES, 2008).

A "British Columbia Hydro" (apud FLORES, 2008) adota como aceitável para barragens, uma probabilidade de ruptura inferior a 10^{-4} (Figura 17).

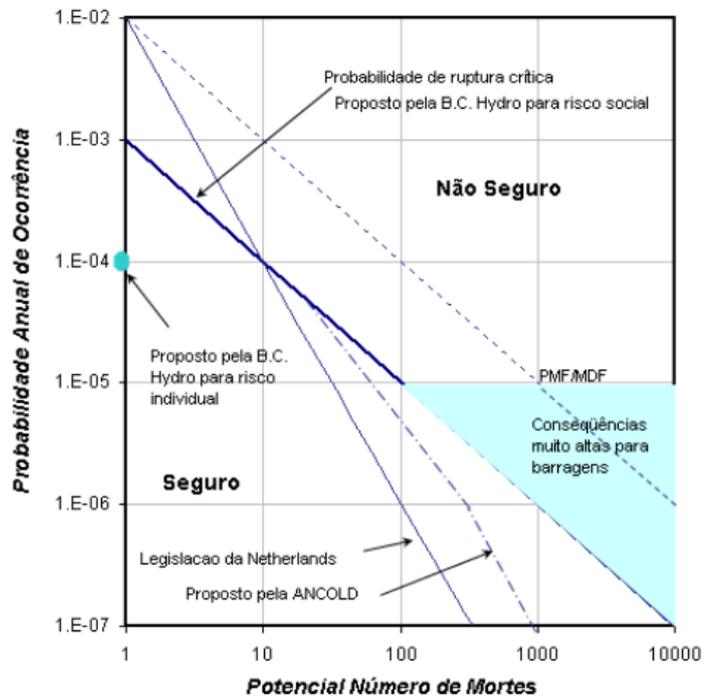


Figura 17 - Probabilidade de ruptura crítica para barragens. Fonte: (BRITISH COLUMBIA HYDRO, 1995, apud FLORES, 2008).

Desse modo, observa-se que as associações mostradas acima não possuem valores definidos e suficientemente claros para valores máximos de probabilidade de ruptura pois eles dependem de outros fatores, assim como o tipo de empreendimento, a quantidade de informações disponíveis e do senso crítico de quem realiza a classificação.

A utilização da abordagem probabilística para o estudo de um talude de uma barragem permite que a verificação do desempenho do talude seja realizada de uma maneira mais ampla e completa. Um exemplo que mostra a importância da realização da análise probabilística é ilustrado na Figura 18. Segundo Silva e Sousa (2017) se apenas a abordagem probabilística fosse realizada o empreendimento considerado como mais seguro seria o talude A já que ele possui um maior fator de segurança, entretanto a abordagem probabilística mostra que o talude mais seguro seria o talude B já que ele apresenta uma menor probabilidade de falha, ou seja, possui uma menor densidade de probabilidade de apresentar um FS menor que 1.

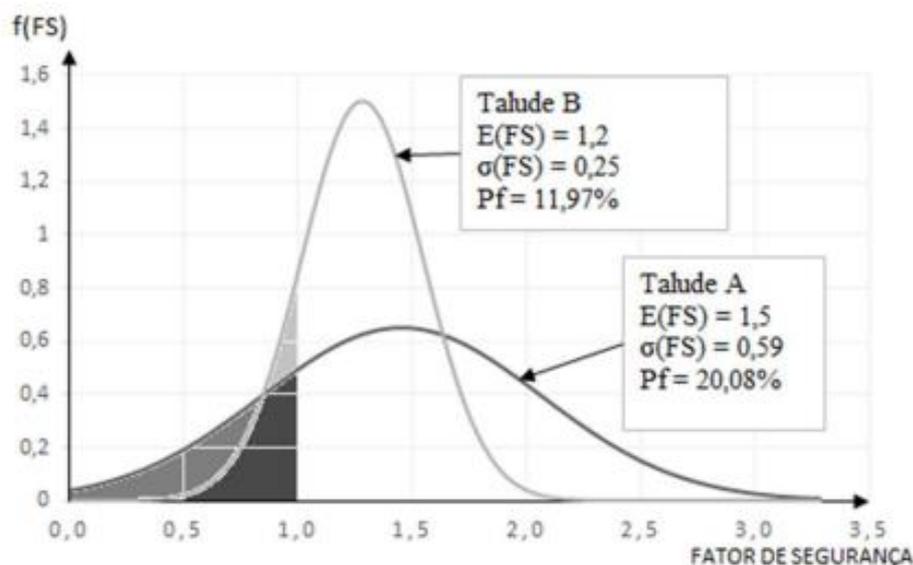


Figura 18 – Comparação da probabilidade de falha em dois taludes com FS médio diferentes. Fonte: (SILVA e SOUSA, 2017).

Sendo assim, as análises probabilísticas não devem substituir as análises determinísticas, mas sim servir como um complemento, conferindo uma maior

aceitabilidade ao projeto, no qual o estudo do fator de segurança pode validar ou não o risco associado, através da probabilidade de ruptura.

2.4.4 Simulação de Monte Carlo

Dentre os métodos probabilísticos utilizados na geotecnia, simulação de Monte-Carlo será empregado nesse trabalho para a realização das análises probabilísticas. De acordo com Flores (2008) as vantagens dessa metodologia são que ela fornece a distribuição de probabilidade de falha e do fator de segurança, além disso não há aumento da complexidade na análise em função do aumento de variáveis aleatórias a serem consideradas.

“O método de simulação Monte Carlo consiste em gerar aleatoriamente um número N de valores para n parâmetros de incerteza que fazem parte do cálculo do fator de segurança” (FABRÍCIO, 2006). Os parâmetros de incerteza para as análises de estabilidade são a coesão (c), o peso específico do solo (γ) e ângulo de atrito (ϕ). Esse procedimento pode ser realizado por meio de programas estatísticos no qual é fornecido para os dados de entrada a média, o desvio padrão e a forma de distribuição da variável. Assim, são realizadas N análises determinísticas selecionando o menor fator de segurança obtido em cada uma delas. A partir desses resultados calcula-se a média e o desvio padrão do fator de segurança e assim determinar o grau de confiabilidade β por meio da Equação 26.

Harr (1987, apud FABRÍCIO, 2006) determinou a Equação 29 para a determinação do número de simulações necessárias (N_S).

$$N_S = \left(\frac{h_{a/2}^2}{4\varepsilon^2} \right)^n \quad (\text{Equação 29})$$

Onde:

$h_{a/2}$ = função de confiabilidade ($1 - \alpha$), valor tabelado (Tabela 4);

ε = precisão em %;

n = número de variáveis aleatórias em estudo.

Tabela 4 - Coeficientes de Confiança para a distribuição normal. Fonte: (HARR, 1987, apud SILVA, 2015).

Nível de confiança (%) (1 - $\tilde{\alpha}$)	$h_{\tilde{\alpha}/2}$
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

Para um talude hipotético, no qual realiza-se uma análise considerando três variáveis aleatórias independentes que alteram no valor do Fator de Segurança e supondo um nível de confiança de 90% para essa situação, o número N de simulações de Monte Carlo pode ser estimado em:

$$N_s = \left(\frac{1,64^2}{4 * 0,1^2} \right)^3 = 304.007 \text{ simulações}$$

Para essa mesma situação, mas supondo um nível de confiança de 95% a quantidade de simulações de Monte Carlo seria:

$$N_s = \left(\frac{1,96^2}{4 * 0,05^2} \right)^3 = 56.693.913 \text{ simulações}$$

Este exemplo evidencia o aumento do número de simulações Monte Carlo com o aumento do nível de confiança. Para problemas com número maior de variáveis

independentes esse valor se eleva ainda mais. Devido a isso, em casos mais complexos, o tempo computacional pode ser excessivamente alto e até mesmo inviável. Desse modo, alguns critérios alternativos para a determinação do número de simulações Monte Carlo podem ser aceitos.

Um dos critérios baseia-se na observação da forma da distribuição de probabilidade com o aumento do número de simulações. Aceitando-se resultados que estabilizaram com o aumento do número de simulações.

3 METODOLOGIA

3.1 Descrição da seção da barragem estudada

A barragem de mineração estudada no presente trabalho é uma barragem de terra zonada, em parte com seção mista e em parte com seção homogênea e trata-se de uma estrutura real de contenção de sedimentos e água. A altura do talude de jusante dessa barragem é igual a 48m, a crista dos taludes de jusante está localizada na elevação 770m e possui 315m de comprimento e 7,5m de largura. A inclinação dos taludes de jusante e de montante é igual a 2,0H:1,0V (26,6°) e o ângulo geral do talude é aproximadamente 2,35H:1,0V (22,5°).

A seção estudada no presente trabalho é a seção mais alta do aterro misto. Esta seção foi considerada crítica devido às condições de sua geometria, tal como sua altura, características de sua fundação e nível freático. Na Figura 19 é ilustrada a seção da barragem analisada com sua geometria, os tipos de solo presentes ao longo da sua extensão e os instrumentos utilizados para determinar seus níveis freático e piezométrico, tal como medidores de nível de água (LI), piezômetros de tubo aberto tipo Casagrande (PI) e piezômetros acústicos (PA). É importante ressaltar que os dados a respeito dos materiais presentes nesta seção e dos seus limites foram fornecidos pela empresa projetista da estrutura.

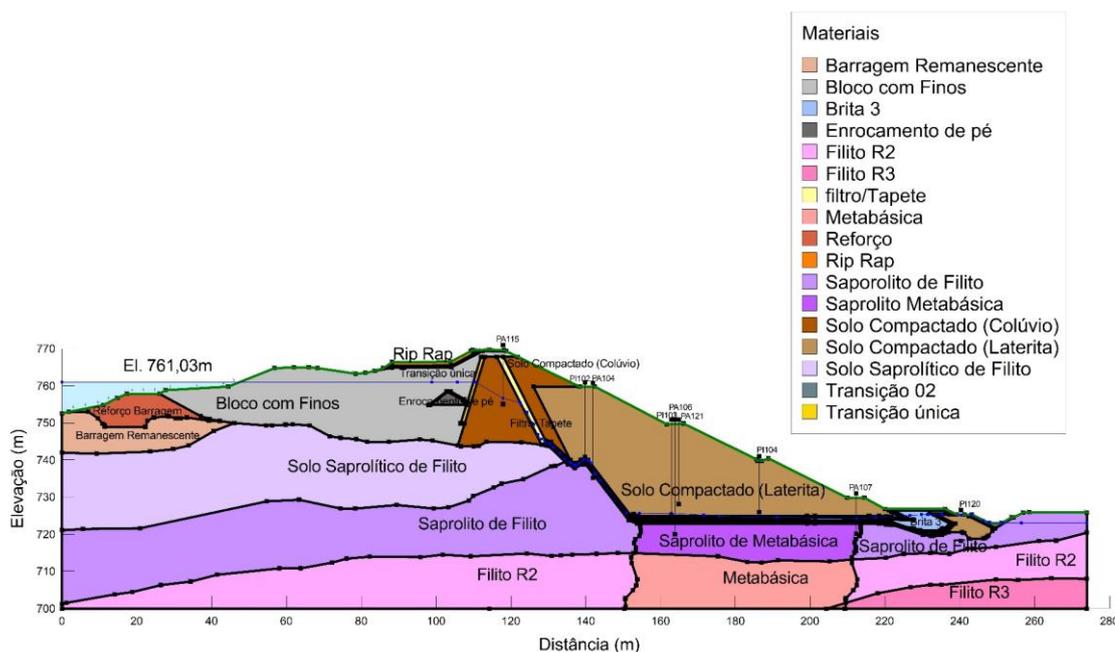


Figura 19 – Seção típica analisada e suas características. Fonte: Autor.

Pela Figura 19, pode-se perceber que a barragem tem a fundação constituída de Saporolito de Metabásica, Filito R2, Filito R3, Metabásica, Saporolito de Filito, e Solo Saporolítico de Filito. A seção Típica Mista da estrutura é constituída de Solo Compactado (solo laterítico e colúvio) e Blocos com Finos, além da drenagem interna composta por filtro inclinado e tapete drenante de fundação.

As linhas freáticas utilizadas nas análises foram obtidas a partir de leituras máximas registradas nos instrumentos, piezômetros e indicadores de nível de água, entre os meses de julho e dezembro do ano de 2021. Para o estudo em análise foi escolhido a linha freática referente ao mês de dezembro pois foi o mês do período analisado que teve maior pluviosidade, e conseqüentemente maior nível do reservatório a montante, a fim de representar uma situação mais crítica referente ao nível d'água da seção analisada. A Tabela 5 mostra a pluviosidade acumulada em cada mês analisado registrada por uma estação pluviométrica localizada próxima à barragem estudada nos meses analisados.

Tabela 5 – Pluviometria registrada por uma estação pluviométrica na localização da barragem no período de julho a dezembro de 2021. Fonte: Autor.

Mês	Pluviometria acumulada registrada na localização da barragem (mm)
Julho	0,0
Agosto	12,4
Setembro	36,5
Outubro	328,5
Novembro	299,7
Dezembro	401,0

3.2 Parâmetros Geotécnicos de Resistência

Os parâmetros admitidos nas análises foram obtidos através de ensaios de campo e de laboratório avaliados pelo critério de “Mohr-Coulomb”. Na Tabela 6 tem-se os valores dos parâmetros de resistência adotados, cabendo observar que para o presente estudo não foram disponibilizados os relatórios detalhado dos ensaios executados: coesão efetiva (c'), ângulo de atrito efetivo (ϕ') e peso específico (γ) para cada material, utilizados nas análises de estabilidade.

Tabela 6 – Parâmetros Geotécnicos de Resistência Efetiva dos Materiais.

Fonte: Autor.

Material	Peso específico (γ) kN/m³	Coesão (c') kPa	Ângulo de atrito (ϕ') °
Barragem Remanescente	19	19	32
Bloco com Finos	23	5	35
Brita 3	20	0	35
Enrocamento de pé	21	0	40

Filito R2		21	70	32
Filito R3		21	100	34
Filtro/Tapete		20	0	30
Metabásica		20	35	28
Reforço		26	10	38
Rip rap		25	0	40
Saprolito de Filito		19	68	25
Saprolito de Metabásica		19	25	26
Colúvio		19	32	29
Laterita		20	48	30
Solo Saprolítico de Filito		19	42	16
Transição 02		20	0	35
Transição Única		20	0	35

3.3 Análises

3.3.1 Análise de Estabilidade Determinística

Para as análises de estabilidade determinísticas da barragem, foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e o método do Equilíbrio Limite para superfícies circulares. Os valores adotados para os parâmetros dos materiais nas análises são mostrados na Tabela 6 e o estudo foi realizada para a condição normal de operação da barragem.

As análises determinísticas foram processadas através do módulo SLOPE/W correspondente ao programa computacional da GeoStudio 2018 v.9.11, desenvolvido pela Geo-Slope International (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2018) e foram utilizados os métodos:

- Fellenius (1927);
- Bishop Simplificado (1955);
- Morgenstern-Price (1965);
- Janbu Simplificado (1968);
- Spencer (1973).

Para realizar a análise no software foi utilizada a opção “grades e raios” para obter a superfícies de ruptura. Essa opção necessita que o usuário determine uma grade de pontos fora do talude analisado e cada ponto dessa grade é considerado como o centro das superfícies circulares potenciais de ruptura. Além disso, desenha-se uma malha no interior do talude a ser analisado, onde as superfícies de análise serão tangentes conforme ilustrado na Figura 20.

Para as análises determinísticas foram arbitrados valores para o número de incrementos da grade de pesquisa e número de incremento de raios visto que não foram encontrados recomendações na literatura a respeito desses dados. Para a grade de pesquisa aplicou-se um número de incrementos igual a 10, gerando uma grade com um refinamento de 10x10 e para o número de incrementos de raios adotou-se uma malha com 10 incrementos. Quanto ao número de divisões da massa de solo considerada nas superfícies de pesquisa foi adotado o valor de 30 fatias.

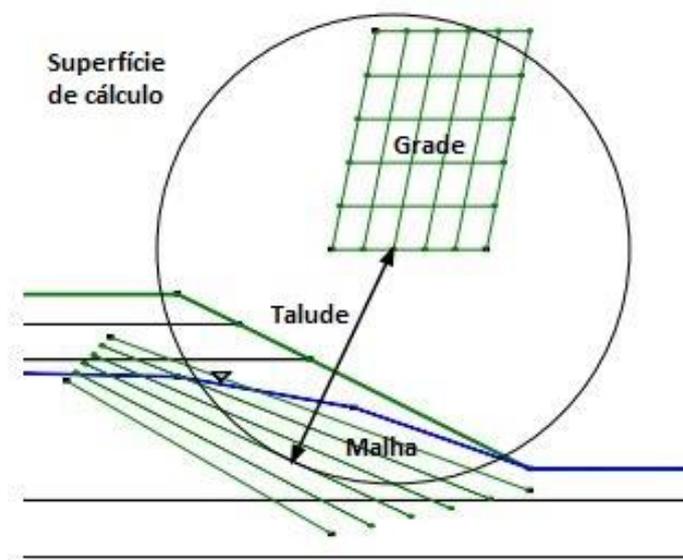


Figura 20 – Método de grades e raios. Fonte: adaptado de (GEO-SLOPE, 2012).

3.3.2 Análise de Estabilidade Probabilística

Para realizar a análise de estabilidade com abordagem probabilística é necessário possuir informações sobre as variáveis de entrada. É importante conhecer

o desvio padrão e média dos dados de entrada tal como peso específico, ângulo de atrito e coesão, além disso recomenda-se que essas informações sejam retiradas de sondagens e ensaios laboratoriais.

Para este trabalho, os valores utilizados na análise determinística foram adotados como valores médios e os valores do desvio padrão foram obtidos por meio das seguintes etapas:

- 1) Identificação dos materiais relevantes na análise determinística, ou seja, aqueles que são interceptados pela superfície crítica. Estes materiais, em ordem de interceptação da esquerda para a direita, são:
 - Blocos com finos;
 - Colúvio;
 - Solo Saprolítico de Filito;
 - Saprolito de Filito;
 - Saprolito de Metabásica.

Os materiais “Brita 3”, “Filtro/Tapete”, “Rip-Rap” e “Transição Única” apesar de interceptados pela superfície crítica apresentam área de influência muito pequena comparada com os outros materiais e por isso são desprezados nas análises.

- 2) Em função da insuficiência de ensaios e dos mesmos não terem sido disponibilizados para o presente trabalho, os valores do desvio padrão foram obtidos por meio dos coeficientes de variação padrão mostrados na Tabela 3. Para os parâmetros ângulo de atrito e peso específico aplicou-se Equação 18 e a covariância padrão determinada para esses parâmetros. Para a coesão utilizou-se o mesmo processo, porém adotou-se o valor mínimo do coeficiente de variação para evitar que seu valor ficasse menor do que zero. Os resultados são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Desvio Padrão dos Materiais. Fonte: Autor.

Material	Parâmetro	Média	Desvio Padrão
	Coesão (kPa)	5	1

Blocos com finos	Ângulo de atrito (°)	35	3,5
	Peso específico (kN/m ³)	23	0,69
Colúvio	Coesão (kPa)	32	6,4
	Ângulo de atrito (°)	29	2,9
	Peso específico (kN/m ³)	19	0,57
Solo Saprolítico de Filito	Coesão (kPa)	42	8,4
	Ângulo de atrito (°)	16	1,6
	Peso específico (kN/m ³)	19	0,57
Saprolito de Filito	Coesão (kPa)	68	13,6
	Ângulo de atrito (°)	25	2,5
	Peso específico (kN/m ³)	19	0,57
Saprolito de Metabásica	Coesão (kPa)	25	5
	Ângulo de atrito (°)	26	2,6
	Peso específico (kN/m ³)	19	0,57

A Tabela 8 apresenta o intervalo de variação das propriedades dos materiais. Esse intervalo é fornecido pelo GeoStudio 2018 v.9.11 (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2018) a partir do lançamento do valor do desvio padrão.

É importante ressaltar que esses intervalos foram definidos a partir de dados fornecidos pela literatura.

Tabela 8 - Intervalo de Variação das Características dos Materiais. Fonte: Autor.

Material	Peso específico	Coesão	Ângulo de atrito
Blocos com finos	19,55 – 26,45	0 - 10	17,5 – 52,5
Colúvio	16,15 – 21,85	0 - 64	14,5 – 43,5
Solo Saprolítico de Filito	16,15 – 21,85	0 - 84	8 - 24
Saprolito de Filito	16,15 – 21,85	0 - 136	12,5 – 37,5
Saprolito de Metabásica	16,15 – 21,85	0 - 50	13 - 39

As análises probabilísticas também foram processadas através do módulo SLOPE/W correspondente ao programa computacional da GeoStudio 2018 v.9.11 (GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD, 2018).

Para as análises probabilísticas foi adotado o método de Morgenstern-Price, pois é um método rigoroso que atende ao equilíbrio de forças e momentos. Como o caso estudado possui 15 variáveis aleatórias o número de simulações Monte Carlo obtido por meio da aplicação da Equação 29 para um nível de confiança de 85% seria:

$$h_{\bar{a}/2} = 1,44 \text{ (pela Tabela 4);}$$

$$\varepsilon = 0,15;$$

$$n = 15 \text{ (Nesta análise há 15 variáveis em estudo);}$$

$$N_s = \left(\frac{h_{\bar{a}/2}^2}{4\varepsilon^2} \right)^n = \left(\frac{1,44^2}{4 * 0,15^2} \right)^{15} = 2,737 * 10^{20}$$

Aplicando esses dados na Equação 29, tal como mostrado acima, tem-se o número de simulações igual a aproximadamente $2,737 * 10^{20}$. Esse número de simulações obtido é excessivamente alto devido ao elevado número de variáveis aleatórias em estudo (15 variáveis aleatórias), o que inviabiliza a análise. Com isso, serão realizadas quatro análises probabilísticas com 2.000, 4.000 e 8.000 simulações Monte Carlo para verificar se os resultados serão estabilizados e a partir disso discutir sobre os dados encontrados utilizando esse método.

A configuração de análise de estabilidade foi mantida em grades e raios com a grade com um refinamento de 10x10 e a malha com 10 incrementos de raio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análises de Estabilidade Determinísticas

Da Figura 21 a Figura 25, são exibidos os resultados das análises, segundo o Método de Bishop Simplificado, Morgenstern-Price, Fellenius, Janbu Simplificado e Spencer para a condição normal de operação da barragem com nível freático e piezométrico referentes ao mês de dezembro de 2021.

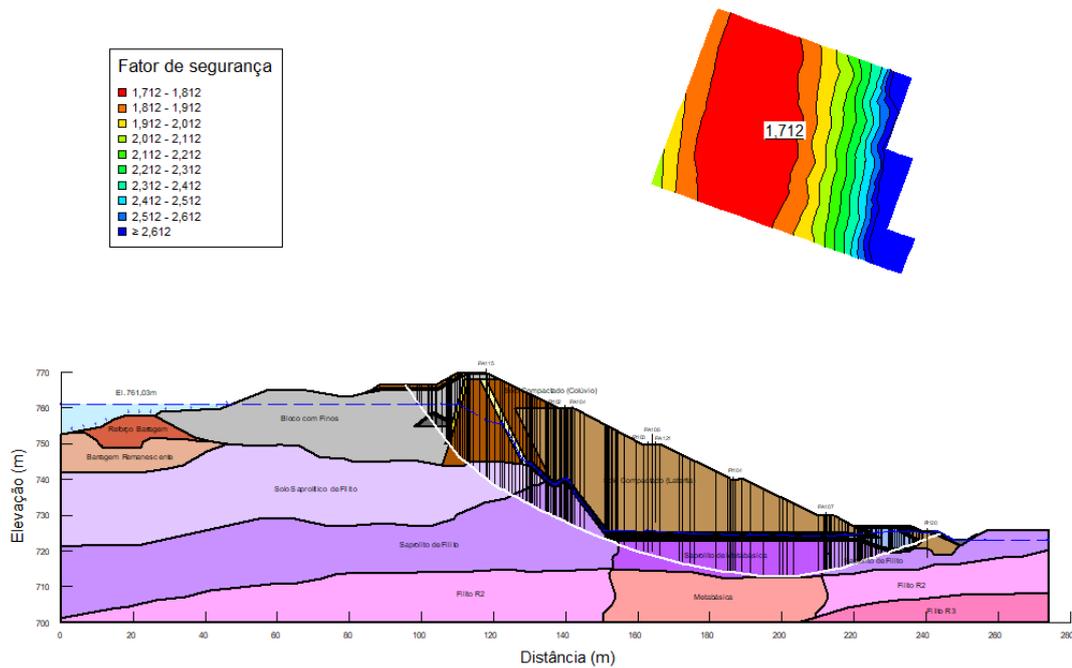


Figura 21 – Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Morgenstern-Price. Fonte: Autor.

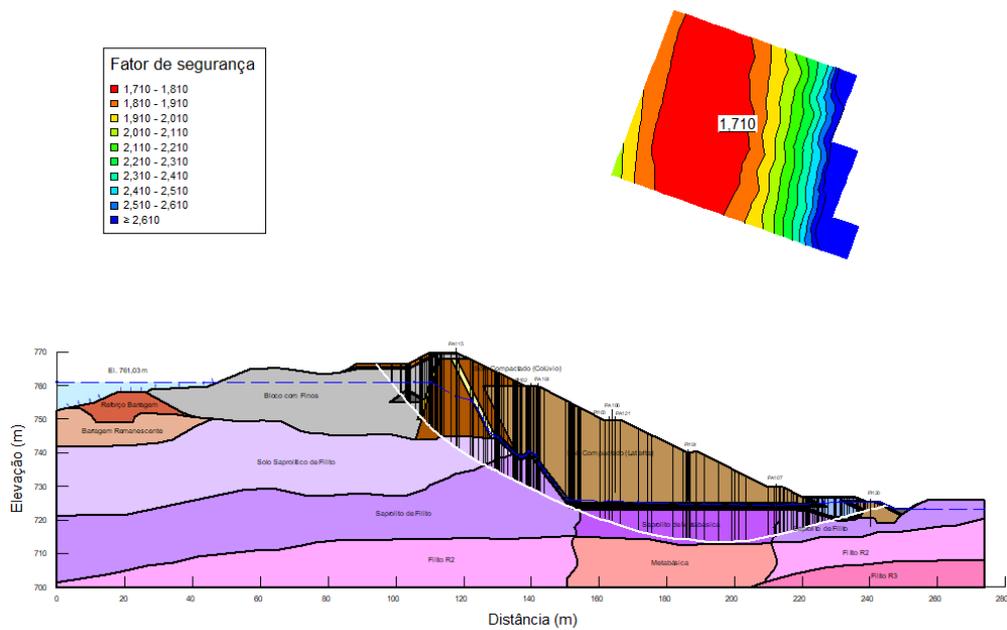


Figura 22 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Spencer. Fonte: Autor.

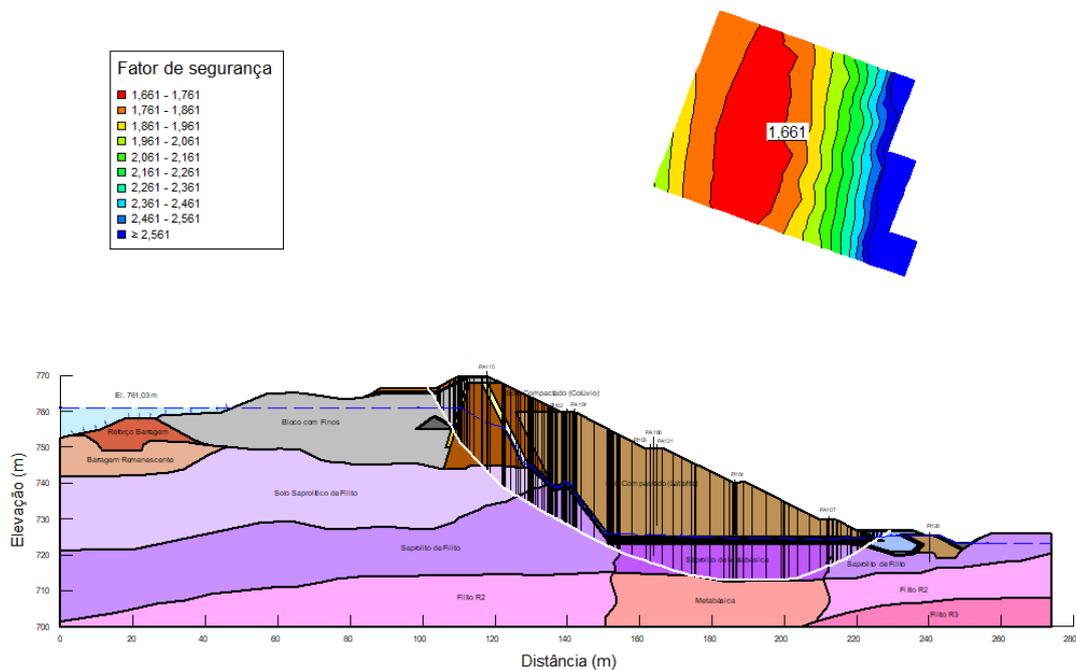


Figura 23 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Bishop simplificado. Fonte: Autor.

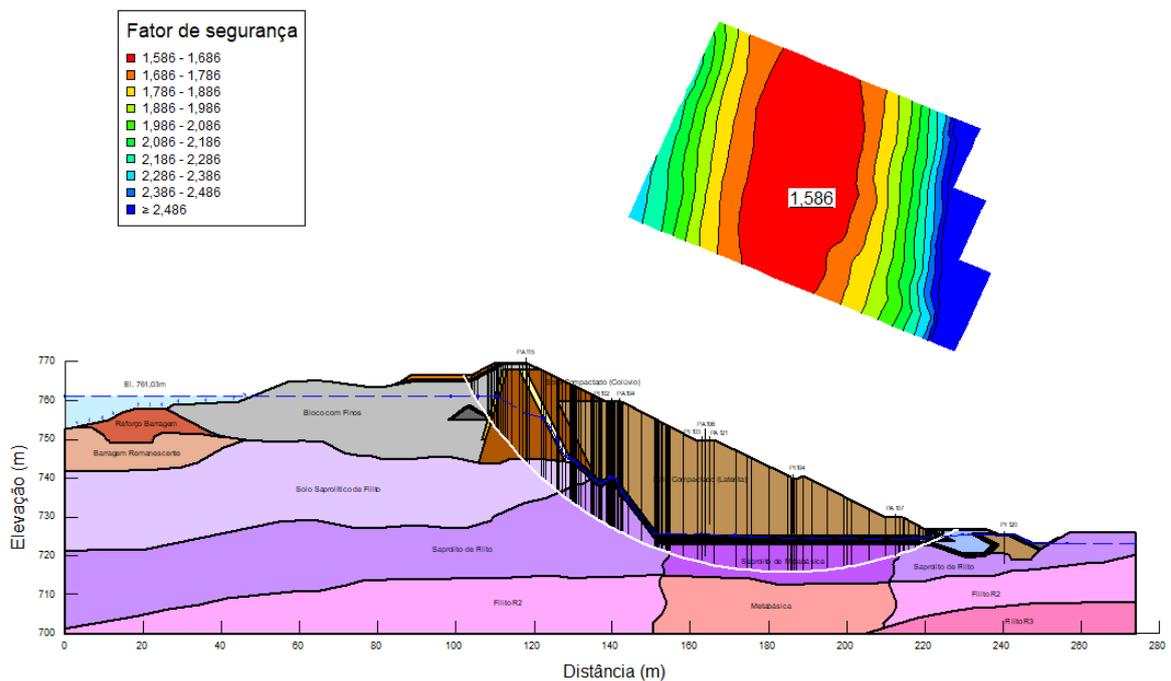


Figura 24 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Fellenius. Fonte: Autor.

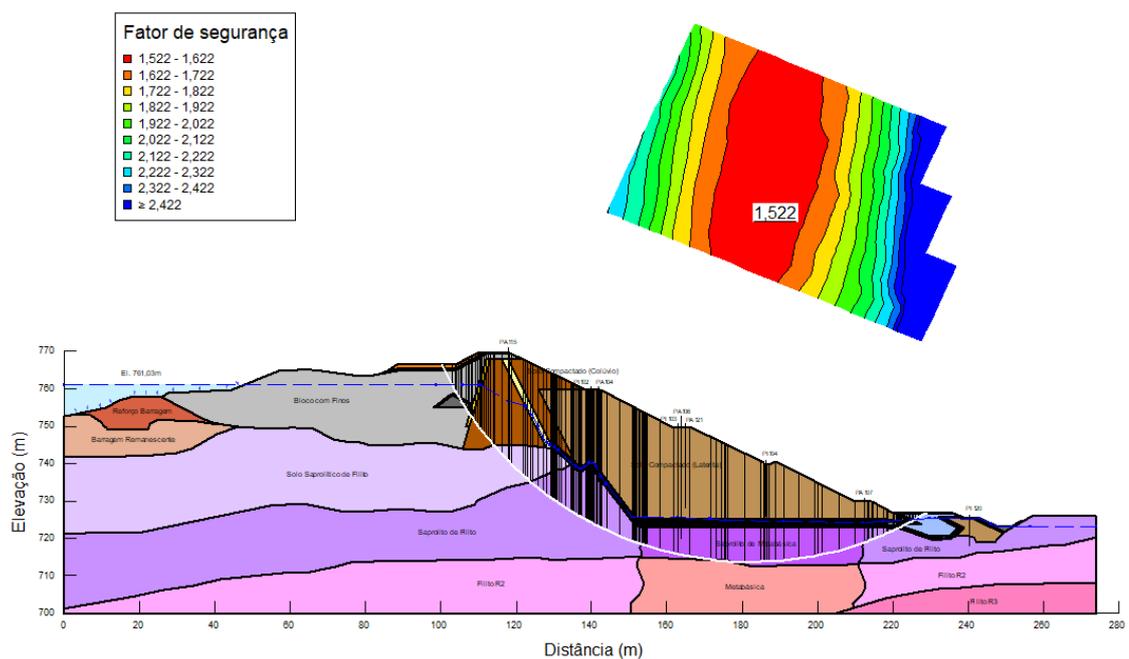


Figura 25 - Superfície crítica para a condição normal de operação da barragem pelo método de Janbu Simplificado. Fonte: Autor.

A superfície de ruptura é limitada pela superfície destacada em branco e a região acima dela apresenta a massa de solo potencialmente instável com a divisão considerada em fatias. As figuras, que mostram os resultados das análises determinísticas, possuem uma malha de cores localizada acima da superfície de ruptura, os valores do FS são posicionados nessa malha de acordo com a localização do centro das superfícies de ruptura circulares calculadas. A faixa vermelha indica outras superfícies de ruptura com fator de segurança próximo ao calculado, quanto maior essa área mais frequente são os valores do FS próximos ao valor mínimo. As informações referentes a faixa de valor que cada cor dessa malha representa são indicadas na legenda inserida na figura.

É importante destacar que o fator de segurança obtido é o menor fator encontrado na análise. A linha tracejada em azul representa a linha piezométrica considerado para o mês de análise.

Tabela 9 apresenta a comparação dos valores de fator de segurança encontrados nas análises determinísticas pelas diferentes metodologias estudadas.

Tabela 9 – Comparação entre os Fatores de Segurança críticos obtidos por meio de diferentes métodos para a condição normal de operação da barragem.

Fonte: Autor.

Método	FS crítico calculado
Morgenstern-Price	1,712
Spencer	1,710
Bishop	1,661
Fellenius	1,586
Janbu Simplificado	1,522

Tabela 9 e a Figura 21 a Figura 25 permitem afirmar que os menores valores obtidos para o fator de segurança foram pelo método de Janbu Simplificado e Fellenius. Essa diferença no resultado obtido por estas metodologias comparada com

o método de Bishop Simplificado, Morgenstern-Price e Spencer pode ser justificada pelo fato de que ambas as metodologias possuem um maior número de hipóteses simplificadoras, diferente das demais que são métodos mais rigorosos, além disso, conforme Gerscovich (2012) o método de Fellenius tende a ser mais conservador e Janbu Simplificado tende a gerar FS diferente dos métodos que satisfazem completamente as condições de equilíbrio.

A metodologia de Bishop Simplificado apresentou resultados próximos aos métodos mais rigorosos de Spencer e Morgenstern-Price mesmo não satisfazendo o equilíbrio de forças horizontais. Assim como Gerscovich (2012) afirma o resultado do FS fornecido pela metodologia de Bishop Simplificado e os métodos mais rigorosos não ultrapassaram 5% de diferença, tanto que para a barragem em estudo o valor obtido pelo método de Bishop Simplificado apresentou uma variação de cerca de 3% em relação a esses métodos, confirmando a teoria.

As variações entre os resultados podem ocorrer em razão da diferença entre as hipóteses simplificadoras de cálculo utilizadas em cada método. Os métodos de Janbu Simplificado, Bishop Simplificado e Fellenius são mais simples, já os métodos de Spencer e Morgenstern-Price são considerados métodos rigorosos. As diferenças ocorrem nos esforços considerados em cada método e as relações entre eles.

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre os Fatores de Segurança calculados pelos diferentes métodos e o Fator de Segurança mínimo exigido pela NBR 13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Tabela 10 - Comparação dos Fatores de Segurança críticos calculados e do Fator de Segurança Mínimo exigido pela NBR 13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Método	FS Mínimo (NBR 13.028)	FS crítico calculado
Morgenstern-Price	1,5	1,712
Spencer	1,5	1,710

Bishop Simplificado	1,5	1,661
Fellenius	1,5	1,586
Janbu Simplificado	1,5	1,522

A avaliação da Tabela 10 mostra que a barragem analisada é segura para a condição normal de operação, pois atende aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma. Entretanto, como a análise determinística não fornece informações a respeito das limitações e grau de incerteza dos resultados e nem da variação dos parâmetros utilizados na análise será realizada a análise probabilística de estabilidade.

4.2 Análises Probabilísticas

Na Figura 26 é apresentado o resultado obtido na análise probabilística na condição de Operação Normal para 2.000, 4.000 e 8.000 simulações Monte Carlo.

Assim como nas análises determinísticas, a superfície crítica é destacada pela linha branca e a região acima dela representa a massa de solos potencialmente instável dividida em fatias, de acordo com o que foi considerado para o cálculo do FS. O valor do Fator de Segurança mínimo obtido é posicionado na grade no centro da superfície de ruptura. A faixa vermelha indica outras superfícies de ruptura com fator de segurança próximo ao calculado, quanto maior essa área mais frequente são os valores do FS próximos ao valor mínimo e os dados referentes a faixa de valor que cada cor dessa malham representa são indicadas pela tabela “Fator de Segurança” inserida nas figuras. A linha tracejada em azul indica a linha piezométrica considerada na análise para o mês de dezembro de 2021.

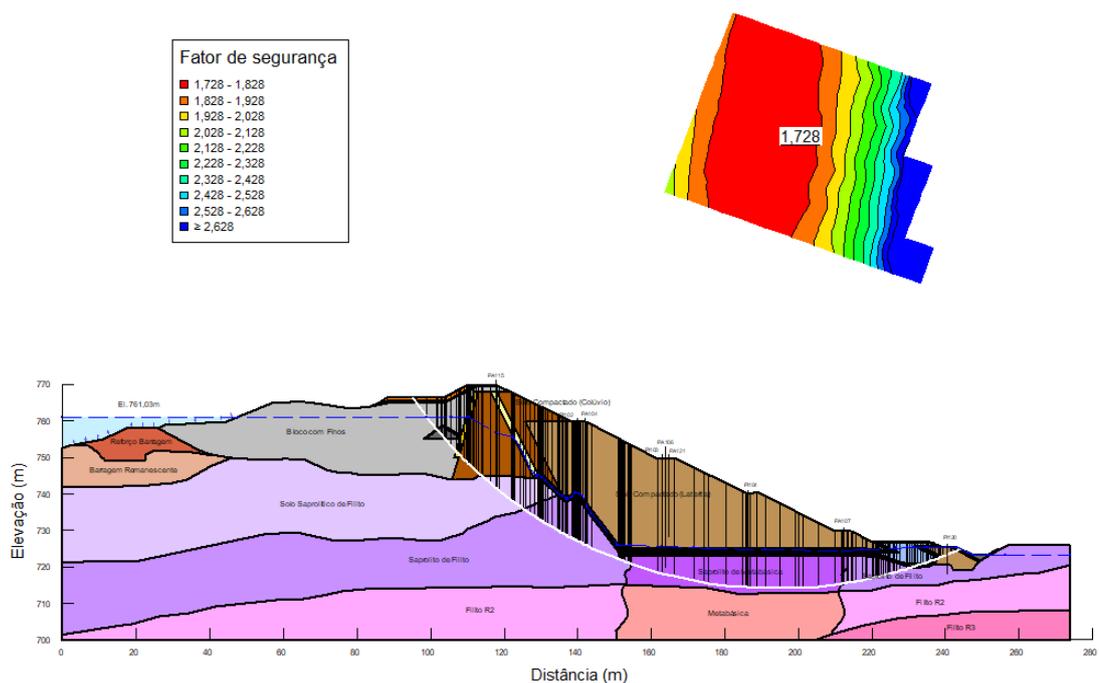


Figura 26 - Resultados das análises probabilísticas considerando a barragem na situação normal de operação. Fonte: Autor.

Da Figura 27 até a Figura 29, são mostradas a função densidade de probabilidade, através de um histograma e do traçado de uma curva de distribuição normal, das simulações para a condição de operação normal da barragem para 2.000, 4.000 e 8.000 simulações Monte Carlo, respectivamente.

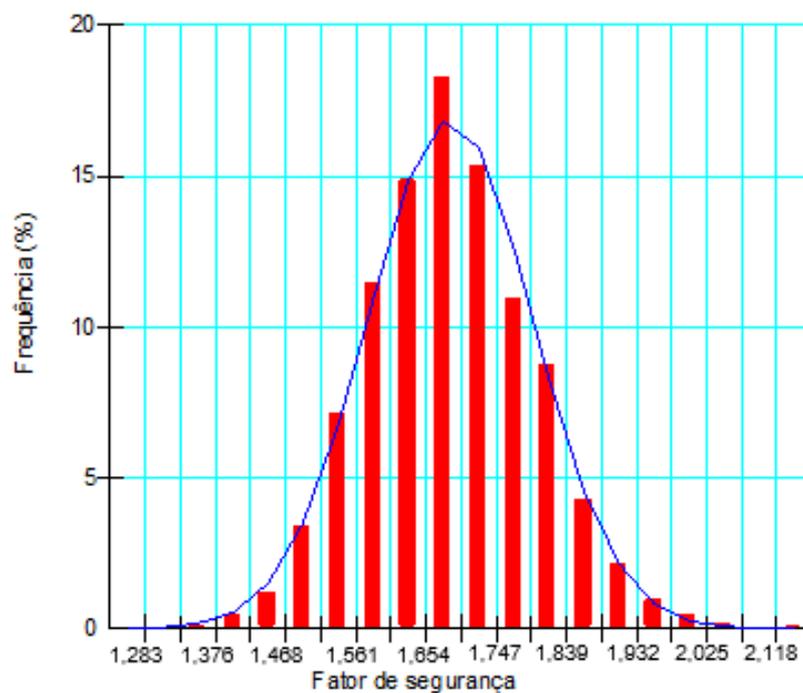


Figura 27 - Distribuição de frequência para a situação normal de operação para 2.000 simulações Monte Carlo. Fonte: Autor.

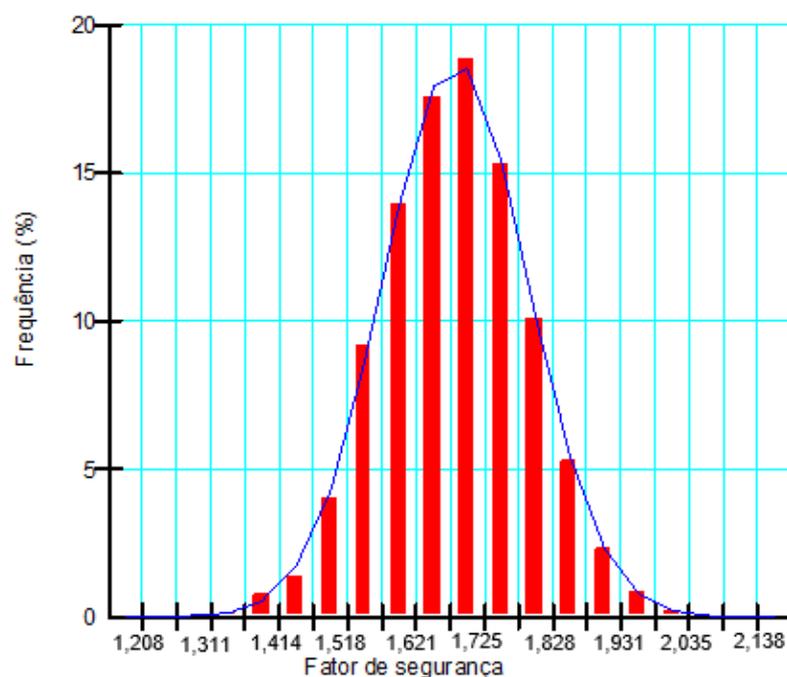


Figura 28 - Distribuição de frequência para a situação normal de operação para 4.000 simulações Monte Carlo. Fonte: Autor.

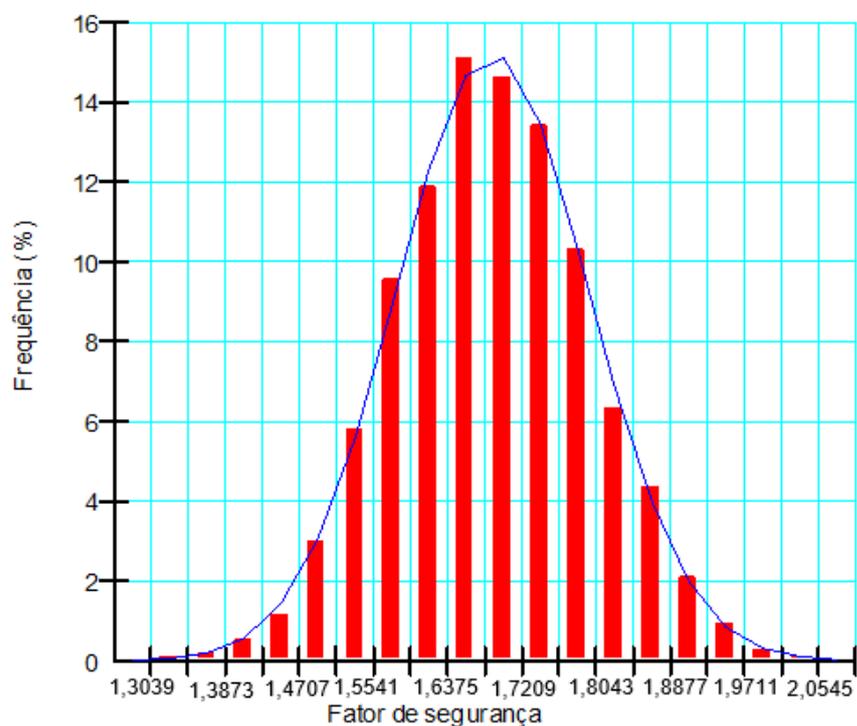


Figura 29 - Distribuição de frequência para a situação normal de operação para 8.000 simulações Monte Carlo. Fonte: Autor.

As imagens de distribuição de frequência para as simulações realizadas mostram que nenhuma das simulações apresentou $FS < 1$ e que a frequência dos $FS < 1,5$ foi pequena comparada com a frequência dos $FS > 1,5$, que é o fator de segurança mínimo determinado pela NBR 13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017). Para as simulações realizadas apenas cerca de 2,5% dos resultados obtidos para o Fator de Segurança foram menores que 1,5.

É importante ressaltar o fato de as probabilidades de ruptura apresentarem valor nulo em todas as simulações. Este valor é considerado como zero com a precisão de oito casas decimais no Slope/ W e abrange a menor probabilidade de ruptura, com valor igual a 3×10^{-7} . Essa probabilidade de ruptura nula pode ser justificada pela inexistência de valores de $FS < 1$ obtidos na análise.

Na Tabela 11 apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos nas análises probabilísticas.

Tabela 11 - Resultados das Análises Probabilísticas. Fonte: Autor.

Número de simulações	FS médio	Índice de confiabilidade	FS_{min}	FS_{max}	Probabilidade de ruptura (%)
2.000	1,732	6,6802	1,2828	2,2101	0
4.000	1,732	6,6686	1,2076	2,2406	0
8.000	1,732	6,6676	1,304	2,1363	0

Dessa forma, comparando os resultados obtidos nas superfícies potenciais de ruptura, da abordagem determinística e probabilística pelo método de Morgenstern-Price, pode-se observar que as combinações de variáveis de entrada geraram uma concentração maior em FS com valores superiores ao obtido na análise determinística. Portanto, para o intervalo pré-definido de variação dos parâmetros de entrada definidos pela literatura (Tabela 8) e para as três simulações realizadas, a aleatoriedade do método de Monte Carlo forneceu resultados favoráveis para o Fator de Segurança da estrutura considerada.

De forma geral o fator de segurança médio teve resultado próximo ao fator de segurança determinístico de sua análise correspondente.

Além disso, a partir dos resultados obtidos (média, índice de confiabilidade, probabilidade de falha, etc) nas diferentes simulações, observa-se uma pequena variabilidade desses valores com a evolução do número de simulações, assim aceita-se o resultado fornecido pela metodologia Monte Carlo. Com isso, verifica-se um índice de confiabilidade de 6,6721 e uma probabilidade de falha na ordem de 3×10^{-7} para a seção crítica da barragem estudada.

Sendo assim, pode-se dizer que os resultados fornecidos por meio da abordagem probabilística são satisfatórios e atendem aos valores de probabilidade de ruptura definidos como seguros para uma barragem de acordo com Flores (2008), Baecher, "British Columbia Hydro" e "US Army Corps of Engineers", os quais associam a

probabilidade de ruptura com suas consequências, assim como abordado no item 2.4.3 deste trabalho.

Entretanto, é importante salientar que os resultados obtidos nesse trabalho foram a partir de intervalos de parâmetros definidos pela literatura. Variações de parâmetros determinadas a partir de ensaios geotécnicos gerariam intervalos mais próximos da realidade, uma vez que as variações nos parâmetros podem ser em função da gênese do solo, das diferenças entre as compactações de campo, para o caso de aterros, e também em função da interpretação dos ensaios. Nesse trabalho, a covariância padrão para a coesão determinada por Sandroni e Sayão (1992, apud REZENDE, 2013) gerou um intervalo de variação no Saprolito de Filito de 0kPa a 136kPa. Esse intervalo é muito grande para representar a variação da coesão desse material e ele seria menor caso fosse realizado a partir de ensaios geotécnicos,

5 CONCLUSÃO

Como o objetivo desse trabalho é a avaliação de estabilidade da barragem, por meio da avaliação da sua seção crítica, através de métodos determinísticos e probabilísticos, pode-se concluir que a mesma é estável em ambas as abordagens. Todas as análises apresentam resultados superiores ao fator de segurança mínimo recomendado pela NBR 13.028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017) para a condição normal de operação e além disso, o método probabilístico apresentou probabilidade de ruptura igual a zero em todas as análises.

Pôde-se constatar nas análises determinísticas realizadas que os menores valores obtidos para o Fator de Segurança foram pelo método de Janbu Simplificado e Fellenius, o que era esperado já que esses métodos possuem um maior número de hipóteses simplificadoras. Os métodos de Bishop Simplificado, Spencer e Morgenstern-Price apresentaram os maiores resultados para o Fator de Segurança e com pouca diferença entre eles. Essa diferença pode-se também ser atribuída à agilidade e precisão nos cálculos dos métodos mais rigorosos.

No que se refere as análises probabilísticas, pode-se concluir que a equação que auxilia na determinação do número de simulações de Monte Carlo, não foi viável para este trabalho. É necessário a comparação do índice de confiabilidade obtido nas simulações realizadas pelo método de Monte Carlo com um índice de confiabilidade calculado a partir de outro método de programação, a fim de verificar a veracidade do resultado obtido. Com relação à aplicação do método probabilístico, no uso do software não há dificuldades adicionais quando comparado com a aplicação do método determinístico, exceto pelo tempo de processamento, que pode levar muitas horas dependendo da quantidade de superfícies e casos a serem analisados.

Comparando o método determinístico com o probabilístico, pode-se concluir que houve um ganho de informações geradas nos resultados, uma vez que na análise determinística o Fator de Segurança representa um valor pontual e na análise probabilística, o resultado do FS é uma função de distribuição de probabilidade. Além disso, o índice de confiabilidade permite a identificação da acurácia do processo de

cálculo para o método realizado e fornece um parâmetro de avaliação da qualidade e precisão do resultado.

Além disso, é importante ressaltar que quanto maior o número de informações, maior é a representatividade do modelo de análise melhorando a confiabilidade dos resultados. Pode-se concluir que uma complementação da análise determinística com a realização da análise probabilística considerando variação das propriedades geotécnicas é essencial para um maior controle dos resultados obtidos.

É importante salientar que a realização de ensaios geotécnicos para a determinação dos intervalos de variação dos parâmetros é importante para a obtenção de intervalos de variação dos parâmetros mais próximos da realidade.

Ressalta-se que o trabalho tem cunho meramente científico, não podendo subsidiar qualquer tipo de análise ou projeto das estruturas investigadas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Guia para Elaboração de Projetos de Barragens**. Brasília, DF. 2011.

APAZA, M. A. F.; BARROS, J. M. D. C. **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo**. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG. São Paulo, p. 8. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2017.

ÁVILA, J. P. D. **Barragens de Rejeito no Brasil**. CBDB. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: [s.n.], 2012.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)**, 20 Setembro 2010. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei-12334-20-setembro-2010-608607-publicacaooriginal-129691-pl.html>>.

BRASIL. Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. **Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)**, Brasília, DF, 30 Setembro 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>>.

CORDEIRO, B. T. **Análise de Estabilidade e Percolação em Barragens de Terra: Estudo de Caso em um Dique de Terra Homogênea**. **Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, 2021. 175.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

DIAS, F. B. **Avaliação de Estabilidade de Uma Barragem Alteada Pelo Método de Montante Por Diferentes Metodologias de Cálculo de Fator de Segurança: Comparação Determinística**. Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos

requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2021.

FABRÍCIO, J. V. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contensões**. Dissertação de Mestrado (título de Mestre pelo Programa de PósGraduação em Engenharia Civil) - PUC Rio. Rio de Janeiro. 2006.

FLORES, E. A. F. **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes Considerando a Variabilidade Espacial do Solo**. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2008.

GAIOTO, N. **Introdução ao Projeto de Barragens de Terra e Enrocamento**. São Carlos: EESC - USP, 2003.

GEO-SLOPE INTERNACIONAL LTD. **Stability Modeling with SLOPE/W**. Manual Técnico. Alberta, Canadá. 2012.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. **Stability Modeling With SLOPE/W**. Alberta, Canadá. 2018.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos , 2012. ISBN ISBN 978-85-7975-24-4.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos o caso UHE - São Simão**. Dissertação (Mestrado em saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

LEITE, S. R. **Modelo para Avaliação de Riscos em Segurança de Barragens com Associação de Métodos de Análise de Decisão Multicritério e Conjuntos Fuzzy**. Dissertação de Mestrado Profissional em Computação Aplicada - Universidade de Brasília. Brasília. 2019.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MEDEIROS, C. H. D. A. C. **Segurança e Auscultação de Barragens**. Salvador: [s.n.], v. II, 2003.

MEIRELLES, F. S. C. **Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais: Barragens de Terra e Enrocamento**. ANA. Curso Segurança de Barragens. 2013.

NETTO, A. S. **Análise de Esabilidade de uma Barragem de Terra**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, p. 89. 2019.

PEREIRA, T. D. S. **Avaliação do Desempenho de Diferentes Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes em Barragem de Terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS. 2013.

QUINTAS, F. E. G. **Planejamento da Construção de Barragens de Terra**. Dissertação - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. [S.l.]. 2002.

REZENDE, D. A. D. **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes em Barragens de Rejeito**. Trabalho de Conclusão de Curso - UFRJ. Rio de Janeiro, p. 108. 2013.

SILVA, B. W. G. D.; SOUSA, T. F. D. P. **Estudo do Efeito do Truncamento dos Parâmetros de Entrada na Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes**. Monografia em Engenharia Civil - Universidade de Brasília. Brasília, p. 106. 2017.

SILVA, C. C. D. **Análise de Estabilidade de um Talude da Cava de Alegria Utilizando Abordagem Probabilística**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2015.

SILVA, D. L. D. **Estudo Comparativo entre Análises Probabilísticas e determinísticas de Estabilidade de Talude de Um Depósito de Resíduos de Mineração**. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2019.

TELLES, A. C. D. M. **Análise de Análise de Estabilidade de um Talude Rompido na Rodovia RJ 130, Teresópolis, RJ.** Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.