

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

GABRIELA LUANA AYRES

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA:
ABORDAGENS DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA**

FLORIANÓPOLIS, 2023.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA – CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

GABRIELA LUANA AYRES

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA:
ABORDAGENS DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Civil.

Orientadora:
Prof^a. Fernanda Simoni Schuch, Doutora

FLORIANÓPOLIS, 2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Ayres, Gabriela Luana

**Análise de Estabilidade de uma Barragem de Terra:
Abordagens Determinística e Probabilística / Gabriela Luana
Ayres; orientação de Fernanda Simoni Schuch. - Florianópolis,
SC, 2023.**

100 p.

**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico
de Construção Civil.**

Inclui Referências.

1. Barragem de Terra. 2. Análise de Estabilidade.
3. Método de Spencer. 4. Monte Carlo. 5. GeoStudio. I.
Schuch, Fernanda Simoni. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. III. Análise de Estabilidade de uma Barragem
de Terra: Abordagens Determinística e Probabilística

.

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE TERRA: ABORDAGENS
DETERMINÍSTICA E PROBABILÍSTICA**

GABRIELA LUANA AYRES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira Civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 27 de junho, 2023.

Banca Examinadora:

Fernanda Simoni Schuch, Doutora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

André Puel, Doutor
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Lucas Rodrigues Heckrath, Engenheiro Civil
Nova Engevix Engenharia

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por ter me guiado até aqui, por ter me dado forças e por ter sido meu refúgio nos momentos em que estive fraca.

À minha avó, Regina, que sempre me apoiou e incentivou a buscar os meus estudos, mesmo diante das dificuldades. Mesmo estando distante, você esteve sempre presente. Obrigada por acreditar na minha capacidade!

Ao meu pai, Luciano, pelo grande exemplo de determinação, esforço e inteligência. Obrigada por ter me dado suporte sempre que precisei, por todos os conselhos e ensinamentos.

À minha mãe, Ana Paula, por sempre ter batalhado pela minha educação nas melhores escolas.

Ao IFSC, por ter sido o meu segundo lar durante esses anos de graduação e por todo o conhecimento adquirido. Agradeço especialmente à professora Fernanda Simoni Schuch, por ter sido uma inspiração para mim, além de todo o suporte e apoio prestados durante a realização deste trabalho de conclusão de curso.

À Nova Engevix, pela oportunidade de estagiar por 2 anos nessa empresa e por fornecer as informações utilizadas neste trabalho. Em especial, agradeço aos engenheiros João Raphael Leal e Lucas Rodrigues Heckrath pela paciência e pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos que estiveram ao meu lado durante esses anos de graduação, obrigada por tornarem tudo mais leve e divertido.

Por fim, quero expressar meus sinceros agradecimentos àqueles que não foram mencionados, mas que contribuíram de alguma forma nessa jornada.

RESUMO

As barragens de terra caracterizam-se em um dos tipos de barramento mais comumente utilizado no Brasil. A alta variabilidade dos parâmetros geotécnicos dos materiais utilizados em sua construção, ou seja, a inconstância no tipo de solo e rochas. Dito isso, essa variação dos parâmetros pode acarretar emergências e colocar a estrutura em risco de ruptura. O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é realizar uma comparação entre os fatores de segurança obtidos através das duas metodologias, a fim de verificar a variabilidade do fator de segurança do barramento de terra em questão. Dessa forma, o presente trabalho realizou um estudo de estabilidade de uma barragem de terra em operação, através do método determinístico de Spencer, sem considerar a variação dos parâmetros geotécnicos, e através do método probabilístico de Monte Carlo, considerando a variação. O estudo contempla diferentes cenários de carregamento, sendo eles: final de construção, rebaixamento rápido do reservatório, operação normal, operação normal com sismo e elevação da linha freática. Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises foram definidos com base nos dados do projeto básico e do projeto executivo do empreendimento. A metodologia consistiu na modelagem computacional de uma seção crítica do barramento em questão, com o auxílio do *software* GeoStudio. Inicialmente, realizou-se a análise de percolação, para os diferentes cenários, a fim de definir a posição da linha freática. Posteriormente as análises de estabilidade para os carregamentos predefinidos. Face ao exposto, os resultados obtidos mostram que os coeficientes de segurança calculados estão acima do valor mínimo determinado, e na abordagem probabilística os fatores de segurança obtidos foram levemente superiores aos obtidos através da abordagem determinística. Conclui-se que, visando a maior precisão nos estudos de estabilidade, o ideal seria a associação da análise determinística com a análise probabilística, pois traz resultados mais completos e significativos para determinar a estabilidade da estrutura.

Palavras-chave: Barragem de terra. Análise de Estabilidade. Método de Spencer. Monte Carlo. *GeoStudio*.

ABSTRACT

Earth dams are one of the most commonly used types of dam in Brazil. The high variability of the geotechnical parameters of the materials used in its construction, that is, the inconstancy in the type of soil and rocks. That said, this variation in parameters can lead to emergencies and put the structure at risk of failure. The objective of this course completion work is to compare the safety factors obtained through the two methodologies, in order to verify the variability of the safety factor of the earth bus in question. Thus, the present work carried out a study of the stability of an earth dam in operation, through Spencer's deterministic method, without considering the variation of the geotechnical parameters, and through the probabilistic Monte Carlo method, considering the variation. The study contemplates different loading scenarios, namely: end of construction, rapid lowering of the reservoir, normal operation, normal operation with earthquake and elevation of the water table. The geotechnical parameters used in the analyzes were defined based on data from the basic project and the executive project of the enterprise. The methodology consisted of computational modeling of a critical section of the bus in question, with the help of GeoStudio software. Initially, a percolation analysis was carried out, for the different scenarios, in order to define the position of the water table. Subsequently, the stability analyzes for the predefined loads. Given the above, the results obtained show that the calculated safety coefficients are above the minimum value determined, and in the probabilistic approach the safety factors obtained were slightly higher than those obtained through the deterministic approach. It is concluded that, aiming at greater precision in stability studies, the ideal would be the association of the deterministic analysis with the probabilistic analysis, as it brings more complete and significant results to determine the stability of the structure.

Keywords: Earthfill dams. Stability analysis. Spencer method. Monte Carlo. Geostudio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipo de material das barragens submetidas à PNSB.....	21
Figura 2 - Representação de barragens de concreto: (a) Concreto gravidade, (b) Concreto aliviada, (c) Concreto em contraforte, (d) Concreto rolado, (e) Concreto de abóbada, (f) Arco simples e (g) Arcos múltiplos.....	23
Figura 3 – Representação de barragens de enrocamento: (c) Com núcleo central, (d) Com núcleo inclinado, (e) Com face de concreto e (f) Com chapa de aço.	24
Figura 4 – Representação de barragens de terra: (a) Homogênea e (b) Zonada.	25
Figura 5 – (a) Definição de linhas de fluxo e linhas equipotenciais e (b) Rede de fluxo finalizada.	31
Figura 6 – Rede de fluxo em uma barragem de terra.....	33
Figura 7 – Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros.	40
Figura 8 – Gráfico Tensão Normal x Cisalhamento.....	42
Figura 9 – Representação dos critérios de ruptura: (a) de Coulomb e (b) de Mohr.	43
Figura 10 – Forças atuantes numa superfície cilíndrica	44
Figura 11 – Esforços na fatia – Método de Spencer	46
Figura 12 – Fator de Segurança.....	49
Figura 13 – Probabilidades de ruptura aceitáveis	51
Figura 14 - Fluxograma – Método de Monte Carlo.....	52
Figura 15 – Seção típica da barragem de terra (Estaca 26+00).....	54
Figura 16 – Planta baixa da barragem de terra.	55
Figura 17 – Seção de análise (Estaca 39+10).	56
Figura 18 – Perfil de solo da seção em questão.	58
Figura 19 – Fluxograma da metodologia executada.	61
Figura 20 – Modelagem no <i>software</i> SEEP/W – Análise de Percolação.....	65
Figura 21 – Refinamento da malha de elementos finitos	66
Figura 22 – Regime Transiente - Informações	68
Figura 23 – Regime Transiente – Rebaixamento Rápido – Carga Total a Montante	69
Figura 24 - Parâmetros Probabilísticos	74
Figura 25 - Análise de Percolação – Operação Normal – N.A Normal.....	78
Figura 26 - Análise de Percolação – Fluxo de água.....	78
Figura 27 - Análise de Percolação – Operação Excepcional – Elevação da Linha Freática	79
Figura 28 - Análise de Percolação – Regime Transiente – 0 horas	80

Figura 29 - Análise de Percolação – Regime Transiente – 24 horas	80
Figura 30 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Operação Normal.....	81
Figura 31 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Operação Normal.....	82
Figura 32 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Elevação da Linha Freática.....	83
Figura 33 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Análise Sísmica	84
Figura 34 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Análise Sísmica	84
Figura 35 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 0 horas.....	85
Figura 36 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 24 horas.....	85
Figura 37 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Operação Normal.....	87
Figura 38 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Jusante – Operação Normal	87
Figura 39 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Jusante – Elevação da Linha Freática	88
Figura 40 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Análise Sísmica	89
Figura 41 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Análise Sísmica	89
Figura 42 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 0 horas.....	90
Figura 43 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 24 horas.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Matriz de classificação da barragem.	28
Quadro 2 - Características dos métodos das fatias.....	45
Quadro 3 - Classificação de valores de IC e Probabilidade de Ruptura.....	50
Quadro 4 - Parâmetros dos materiais de fundação.....	59
Quadro 5 - Parâmetros dos materiais naturais de construção.	60
Quadro 6 – Permeabilidades adotadas nas análises de percolação.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (k)	30
Tabela 2 - Valores mínimos de fator de segurança.....	38
Tabela 3 – Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.....	39
Tabela 4 - Análise de Percolação - Regime Permanente - Condições de Contorno.	66
Tabela 5 – Fatores de Segurança Mínimos Adotados	71
Tabela 6 – Parâmetros de Resistência e Peso Específico	71
Tabela 7 - Valores típicos do coeficiente de variação dos principais parâmetros geotécnicos.....	73
Tabela 8 – Parâmetros geotécnicos médios utilizados na abordagem de Monte Carlo.	73
Tabela 9 - Desvio padrão dos parâmetros analisados na seção a partir da covariância padrão.....	74
Tabela 10 - Coeficiente de confiança para a distribuição normal.....	75
Tabela 11 - Compilação dos Fatores de Segurança - Análises Determinísticas.....	86
Tabela 12 - Compilação dos Fatores de Segurança - Análises Probabilísticas	91
Tabela 13 - Compilação dos Fatores de Segurança	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CCR	Barragens de Concreto Compactado com Rolo
FOSM	Primeira Ordem e Segundo Momento
FS	Fator de Segurança
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
ICOLD	<i>International Committee on Large Dams</i>
SNISB	Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens
PEM	Estimativas Pontuais
MC	Monte Carlo
RSB	Relatório de Segurança de Barragens

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Definição do Problema	17
1.3	Objetivo Geral.....	17
1.4	Objetivos Específicos.....	18
1.5	Estrutura do Trabalho.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Generalidades sobre Barragens	20
2.2	Tipos de barragens	21
2.2.1	Barragens de concreto.....	22
2.2.2	Barragens de enrocamento.....	23
2.2.3	Barragens de terra	24
2.3	Segurança de barragens	25
2.3.1	Avaliação da condição de segurança em barragens de terra	26
2.4	Análise de percolação em barragens de terra.....	28
2.4.1	Movimento de água no solo	28
2.4.2	Redes de fluxo	30
2.4.3	Gradiente hidráulico crítico.....	34
2.5	Análise de estabilidade em barragens de terra	35
2.5.1	Cenários de carregamento.....	36
2.5.2	Fator de segurança	37
2.5.3	Parâmetros geotécnicos de resistência	38
2.5.3.1	<i>Granulometria</i>	38
2.5.3.2	<i>Peso específico natural</i>	40
2.5.3.3	<i>Resistência ao cisalhamento</i>	41
2.5.4	Métodos determinísticos de estabilidade	42
2.5.4.1	<i>Método Spencer</i>	46
2.5.5	Métodos probabilísticos de estabilidade	47
2.5.5.1	<i>Método de Monte Carlo</i>	48
3	ESTUDO DE CASO	53
3.1	Características da barragem	53
3.2	Investigações geológico-geotécnicas executadas	57
3.2.1	Parâmetros geotécnicos da fundação da barragem.....	57
3.2.2	Parâmetros geotécnicos dos materiais naturais de construção	59
4	METODOLOGIA	60
4.1	Análises de percolação	62
4.1.1	Seção de análise modelada.....	63
4.1.2	Análises em regime permanente.....	66
4.1.3	Análises em regime transiente	67
4.2	Análises de estabilidade.....	69
4.2.1	Condições de carregamento	69
4.2.2	Coeficientes de segurança mínimos	70
4.2.3	Análise de estabilidade determinística	71
4.2.4	Análise de estabilidade probabilística	72
5	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	77
5.1	Análises de percolação	77

5.2	Análises de estabilidade determinísticas	81
5.3	Análises de estabilidade probabilísticas	86
5.4	Comparação dos resultados	92
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	94
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	96
	REFERÊNCIAS	97

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens é tão antiga quanto a história do homem e existem registros da construção delas em praticamente todas as culturas. Ainda que o número de barragens tenha crescido significativamente no século XX, a prática de construir barramentos em rios, com o objetivo de reservar a água para consumo, irrigação e até para mover rodas d'água, foi uma constante na história (CRUZ, 1996).

Com os avanços científicos e tecnológicos, as estatísticas mostram que o número e a altura das barragens têm crescido largamente e, estima-se que existem atualmente cerca de 50 mil grandes barragens em operação no mundo, segundo a Comissão Internacional de Grandes Barragens (*International Committee on Large Dams*) (ICOLD, 2019).

Segundo Cruz (1996), existem diversos tipos de barragens que podem ser classificadas conforme o material utilizado para construí-las. Dentre os tipos de barragens existentes, a de aterro (terra e/ou enrocamento) constitui-se em um dos principais, representando aproximadamente 65% do total de barragens cadastradas no Registro Mundial de Barragens (ICOLD, 2019).

Embora as barragens ofereçam diversos benefícios para a sociedade, seus impactos sobre as áreas vizinhas incluem diversos fatores, dentre eles, aspectos relacionados à segurança (ICOLD, 2019). De acordo com dados do Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), da ICOLD, do Banco Mundial (*World Bank*) e Comissão Mundial de Barragens (*World Commission of Dams*), uma barragem para ser considerada segura deve possuir integridade estrutural, não induzir sentimento de ameaça e não causar danos ambientais.

Com o intuito de nortear a questão de segurança de barragens no Brasil, foi sancionada em 2010 a Lei nº 12.334, alterada em 2020 pela Lei nº 14.066, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB, destinada à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e cria o Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de barragens – SNISB (BRASIL, 2020).

Geralmente, a engenharia determina a segurança de seus empreendimentos com uma abordagem determinística, por meio do Fator de

Segurança (FS) (YOKOZAWA; DE ASSIS; DA ROCHA, 2019). Existem diversas metodologias para a análise de estabilidade determinística, sendo uma das mais antigas a introduzida por Fellenius, conhecida também como ordinária ou sueca de fatias. Em meados da década de 1950, Janbu (1954) e Bishop (1955) desenvolveram avanços no método. Com o advento de computadores eletrônicos na década de 1960, tornou-se possível obter uma rapidez maior com os processos iterativos, levando assim o método a formulações matematicamente mais rigorosas, como as desenvolvidas por Morgenstern-Price (1965) e por Spencer (1967) (GEO-STUDIO, 2020).

Nas análises de abordagem determinística, os parâmetros geotécnicos dos solos envolvidos, embora possam apresentar grande dispersão, são considerados fixos. Um enfoque probabilístico para estudar a estabilidade de taludes, permite quantificar as incertezas oriundas da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, com a determinação de um índice de confiabilidade e de uma probabilidade de ruína. Existem três métodos probabilísticos frequentemente utilizados no meio geotécnico: Primeira Ordem e Segundo Momento (FOSM), Estimativas Pontuais (PEM) e Monte Carlo (MC) (APAZA e BARROS, 2014).

Neste trabalho realiza-se, inicialmente, análises de percolação a fim de subsidiar as análises de estabilidade de uma barragem de terra homogênea. As análises de estabilidade serão realizadas através de um método determinístico e de um método probabilístico, quanto aos critérios de segurança estabelecidos pela Agência Nacional de Águas – ANA (2016), no Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, com o objetivo de realizar uma comparação do fator de segurança obtido pelos dois métodos.

1.1 Justificativa

As fases de construção e enchimento do reservatório de uma barragem constituem os momentos críticos relacionados à segurança da obra. No entanto, durante a operação, a barragem também necessita de um controle e previsão de seu comportamento. O conceito de segurança deve ser entendido em um sentido global, envolvendo desde aspectos estruturais até aspectos da natureza (SARÉ *et al.*, 2004).

Segundo dados expostos no Relatório Anual de Segurança de Barragens (ANA, 2021), em 2021 foram reportados cerca de 13 acidentes e 37 incidentes em barragens cadastradas, quantitativo considerado superior aos verificados em todos os anos anteriores, com exceção do ano de 2020, que foi um ano excepcionalmente atípico, com 29 acidentes e 77 incidentes reportados. Dito isso, é de extrema importância garantir que as estruturas já construídas e as que estão em fase de projeto se encontrem suficientemente seguras.

A metodologia numérica de segurança na engenharia geotécnica mais antiga é a análise da estabilidade da estrutura. A estabilidade de taludes de terra é uma vertente dominada pelas incertezas por conta da variabilidade espacial das propriedades do solo, além de simplificações adotadas nos modelos geotécnicos e erros durante as etapas de projeto e construção (EL-RAMLY, MORGENSTERN e CRUDEN, 2002).

Em decorrência dessa variabilidade de propriedades, os valores adotados podem sofrer variações. Uma das formas de lidar com o risco da obra geotécnica, seria através de métodos probabilísticos, que, diferente da abordagem determinística, consegue incorporar a variabilidade dos parâmetros e carregamento no projeto, por meio de distribuições estatísticas. Dito isso, pode-se dizer que a análise probabilística é uma complementação da análise determinística (SILVA, 2015).

1.2 Definição do Problema

A diferença entre os fatores de segurança de uma barragem de terra obtidos através de uma abordagem determinística e uma abordagem probabilística pode impactar no resultado de um estudo de estabilidade?

1.3 Objetivo Geral

Determinar as condições de estabilidade de uma barragem de terra (estudo de caso) utilizando-se um método determinístico e um probabilístico.

1.4 Objetivos Específicos

Visando-se dar cumprimento ao objetivo geral acima definido, tem-se como objetivos específicos:

- a) Escolher os critérios sob os quais se fará a análise das condições de estabilidade de uma barragem de terra estudo de caso;
- b) Realizar a análise de percolação da barragem de terra para os diferentes cenários de carregamento;
- c) Realizar a análise de estabilidade da barragem de terra (estudo de caso) através do método determinístico de Spencer;
- d) Realizar a análise de estabilidade de barragem estudo de caso através do método probabilístico de Monte Carlo;

1.5 Estrutura do Trabalho

O primeiro capítulo deste trabalho consiste na introdução, onde é realizada uma breve explanação da importância das análises de estabilidade para a segurança das barragens de terra e conseqüentemente para a população. Além disso, é apresentada a justificativa e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo serão apresentadas generalidades a respeito de barragens e dos métodos de análise de percolação e estabilidade existentes. Além disso, é feita uma breve explanação acerca da segurança de barragens no Brasil, inclusive, da lei de segurança de barragens em vigor.

O objeto do estudo de caso deste Trabalho de Conclusão de Curso é apresentado no terceiro capítulo, bem como características do projeto, investigações geológico-geotécnicas realizadas e a definição dos parâmetros geotécnicos do aterro e da fundação.

No quarto capítulo será descrita a metodologia e os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de percolação e estabilidade do barramento. Além de serem realizadas as simulações de análise de percolação, e análise de estabilidade através do método determinístico e probabilístico.

No capítulo 5 serão apresentados e analisados, através do tratamento das informações e os resultados obtidos através dos diferentes métodos de análise de estabilidade realizados.

Por fim, no capítulo 6 serão apresentadas as considerações finais deste trabalho e sugestões para possíveis futuros trabalhos na mesma linha de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se o referencial teórico necessário para o desenvolvimento e entendimento do conteúdo exposto neste trabalho de conclusão de curso.

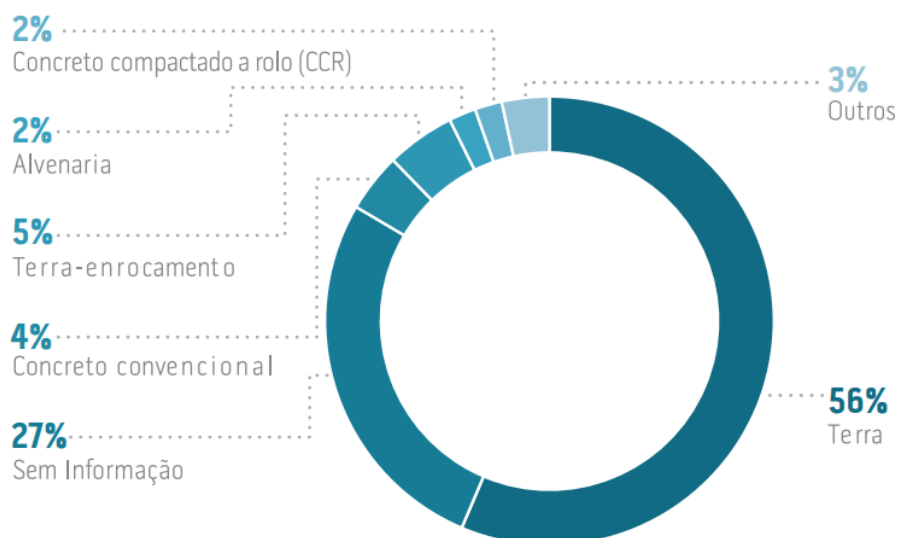
2.1 Generalidades sobre Barragens

Segundo Costa (2012), os objetivos para quais as barragens são projetadas são de inteiro conhecimento daqueles que lidam com tais obras. No entanto, a sua definição constitui a primeira condicionante no planejamento de uma barragem. Com relação ao seu objetivo, as barragens são separadas em dois grupos: regularização e contenção.

As barragens de regularização têm como objetivo regularizar o regime hidrológico de um rio, armazenando água nos períodos em que a afluência é maior do que a demanda para utilizá-la nos períodos de déficit de afluência. Já as barragens de contenção objetivam reter água de maneira temporária ou acumular sedimentos, resíduos industriais ou minerais (COSTA, 2012).

Conforme dados apresentados pela ANA (2022) no Relatório de Segurança de Barragens (RSB), existem 22.654 barragens cadastradas, dentre elas, 54% possuem informação de altura, 87% apresentam informação de volume e 51% possuem algum tipo de ato de autorização, estando regularizadas.

Em relação ao material, 56% das barragens submetidas à PNSB foram construídas em terra, 4% em concreto convencional e 5% em terra-enrocamento. Em 27% das barragens não existe a informação a respeito do material, conforme Figura 1 (ANA, 2022).

Figura 1 – Tipo de material das barragens submetidas à PNSB.

Fonte: ANA (2022).

Nesse trabalho avalia-se as condições de estabilidade de uma barragem de terra, o barramento mais frequente no Brasil, conforme exposto na Figura 1.

2.2 Tipos de barragens

Conforme Costa (2012), as tecnologias nas soluções de projetos de barragens evoluem constantemente, no entanto, atualmente ainda são utilizados métodos mais primitivos quando a obra assume pequenas proporções. Dessa forma, o autor cita soluções convencionais, tais como: barragens de concreto, barragens de enrocamento e barragens de terra.

Vale ressaltar que, antes de tecer considerações quanto à escolha do tipo de barragem mais adequado dado um certo local, é de extrema importância atentar-se aos aspectos geológico-geotécnicos no projeto, na construção e na segurança das barragens. Dito isso, os principais fatores a se considerarem na escolha do tipo de barragem são: geológico-geotécnico; hidrológico-hidráulico; topográfico; materiais de empréstimo; custo; prazo; clima e método construtivo (MASSAD, 2010).

2.2.1 Barragens de concreto

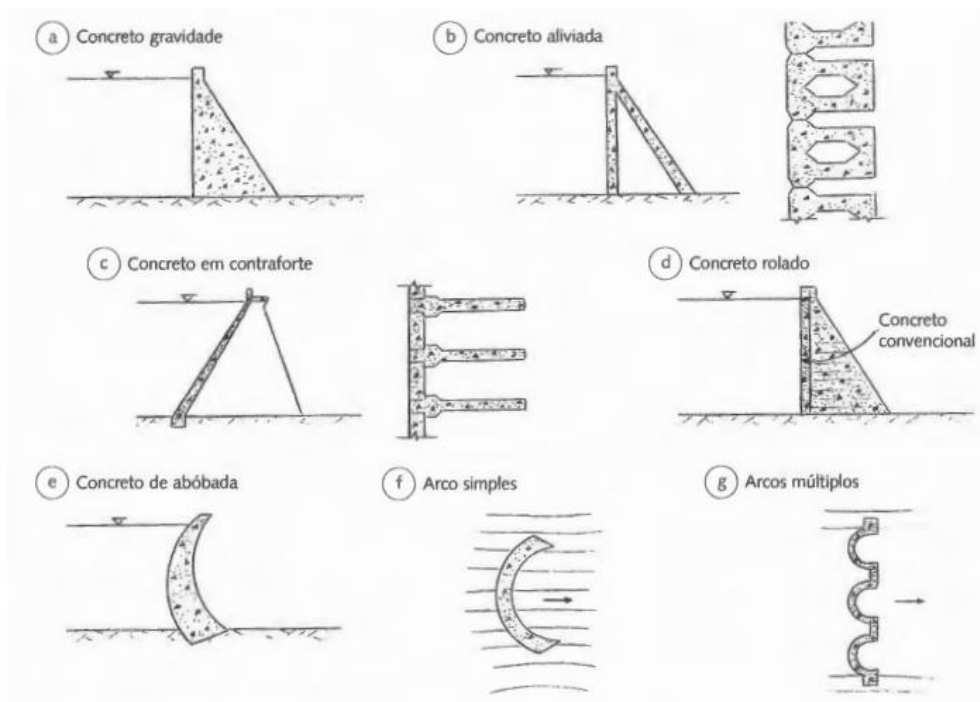
De acordo com Costa (2012), as barragens de concreto podem ser divididas em: de gravidade, de gravidade aliviada, em contraforte, de concreto rolado ou compactado e de abóbada (em arco). As barragens de concreto gravidade, Figura 2 (a) possuem pouca armação e sua principal característica física é a estrutura trabalhando apenas à compressão. Nestas estruturas a resultante das forças atuantes é transmitida ao solo do leito do rio através da sua base. O mesmo autor pontua que as barragens de concreto de gravidade aliviada, Figura 2 (b) são uma simplificação da anterior, onde possuem uma estrutura mais leve por serem vazadas, por conta disso ocorrem esforços de tração que exigem um maior uso de armação (COSTA, 2012).

As barragens de contraforte, Figura 2 (c), são ainda mais leves do que as de gravidade aliviada. O esforço no paramento montante é transmitido para a fundação através de uma série de contrafortes perpendiculares ao eixo. Os contrafortes atuam de forma semelhante a pilares, pois recebem o esforço do empuxo do paramento de montante descarregando-o para as fundações (POSSAN, 2013).

Com relação as barragens de concreto compactado com rolo (CCR), Figura 2 (d), tratam-se de barragens de gravidade onde o concreto é espalhado e depois compactado com rolos compactadores, a sua estanqueidade é garantida por uma camada de concreto convencional construída no talude de montante (NOVAK, 2007).

Por fim, tratando-se das barragens de abóbada ou arco, Figura 2 (e, f e g), estas apresentam curvatura em planta e transferem a maior parte das tensões que estão submetidas ao terreno de fundação, em geral, para as ombreiras (COSTA, 2012).

Figura 2 - Representação de barragens de concreto: (a) Concreto gravidade, (b) Concreto aliviada, (c) Concreto em contraforte, (d) Concreto rolado, (e) Concreto de abóbada, (f) Arco simples e (g) Arcos múltiplos.



Fonte: Costa (2012).

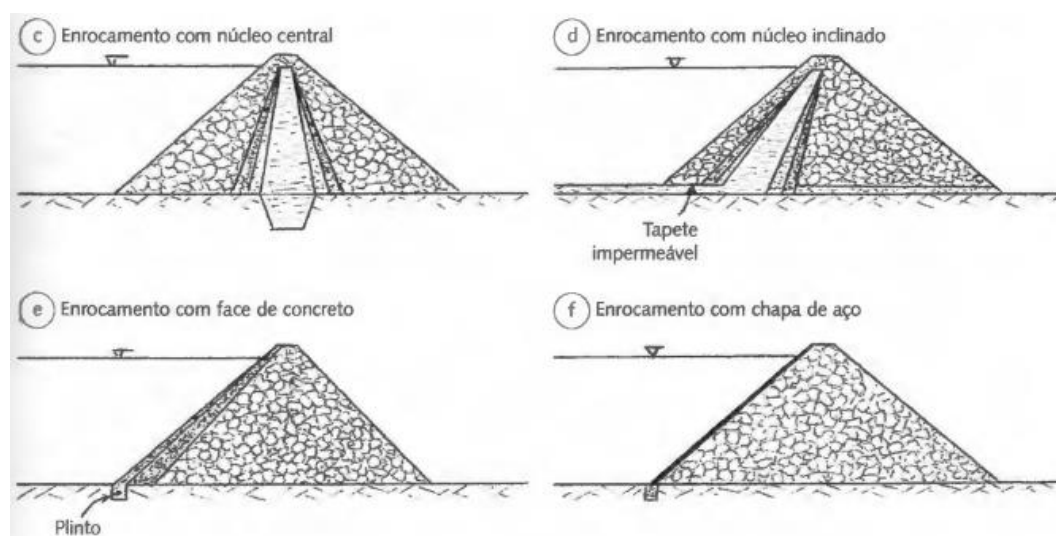
2.2.2 Barragens de enrocamento

Nas barragens de enrocamento o aterro é composto de fragmentos de rochas ou cascalhos, compactados em camadas. Além disso, devem possuir uma zona impermeável, geralmente formada por solos e filtros de material granular. Esse tipo de barragem é subdividido de acordo com o seu sistema de impermeabilização, sendo eles: com núcleo impermeável e com face impermeável (POSSAN, 2013).

Segundo Costa (2012), nas barragens de enrocamento com núcleo impermeável, a vedação é realizada usualmente por meio de um núcleo argiloso, separado do enrocamento por zonas de transição. Esse núcleo pode ficar centralizado, Figura 3 (c), ou inclinado para montante, Figura 3 (d).

Já as barragens de enrocamento com face impermeável, a vedação é garantida pela impermeabilização da face de montante da barragem, que pode ser realizada através de uma camada de asfalto, uma placa de concreto, Figura 3 (e), ou ainda, por uma chapa de aço, Figura 3 (f) (COSTA, 2012).

Figura 3 – Representação de barragens de enrocamento: (c) Com núcleo central, (d) Com núcleo inclinado, (e) Com face de concreto e (f) Com chapa de aço.



Fonte: Costa (2012).

De acordo com Possan (2013), para optar por uma barragem de enrocamento, o local considerado deverá possuir algumas características prévias, tais como: disponibilidade de material rochoso suficiente; possibilidade de utilização direta do material independente da fonte; largura do vale, na cota da crista da barragem, deve ser a mais estreita no trecho aproveitável do rio e as fundações e ombreiras devem ser resistentes e estanques.

2.2.3 Barragens de terra

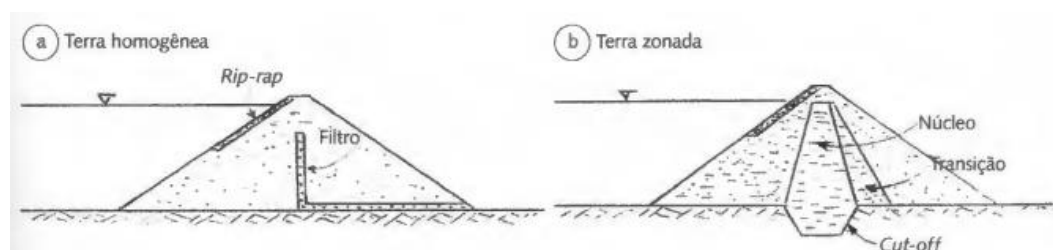
As barragens de terra são construções de longa data, sendo um dos registros mais antigos o de uma barragem de 12 metros de altura, construída no Egito, há aproximadamente 6,8 mil anos (MASSAD, 2010).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (2016), as barragens de terra caracterizam-se em um dos tipos de barramento mais comumente utilizado no Brasil. Consistem em estruturas compostas fundamentalmente por materiais naturais ou processados, definidos conforme as condicionantes locais.

Costa (2012) divide as barragens de terra em duas tipologias, sendo estas homogêneas ou zonadas. As barragens de terra homogêneas, Figura 4 (a), são constituídas de um único material, com exceção dos demais elementos presentes tais

como filtros e enrocamento de proteção (*rip-rap*). Já nas barragens de terra zonadas, Figura 4 (b), há a ocorrência de mais de um material terroso, geralmente o núcleo, constituído por um material impermeável envolvido por zonas mais permeáveis.

Figura 4 – Representação de barragens de terra: (a) Homogênea e (b) Zonada.



Fonte: Costa (2012).

Esse tipo de barragem é considerado o mais utilizado no Brasil, pelas condições topográficas, com vales muito abertos, e da disponibilidade de material terroso no país. Além disso, as barragens de terra toleram fundações mais deformáveis, desde que sejam devidamente investigadas, estudadas e projetadas (MASSAD, 2010).

2.3 Segurança de barragens

A segurança de barragens é um aspecto fundamental para todas as entidades envolvidas, desde a concepção do projeto até ao descomissionamento, as quais devem ser proporcionais ao tipo, dimensão e risco envolvido. As condições de segurança devem ser periodicamente revisadas, levando em consideração eventuais alterações (ANA, 2016).

A falta de fiscalização e manutenção contribuiu para o aumento de incidente em barragens ao longo dos anos. Por conta disso, em 2010 foi sancionada a Lei nº 12.334, alterada em 2020 pela Lei nº 14.066, conhecida como a Lei de Segurança de Barragens, onde foi instituída a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que possui como principal objetivo regulamentar as ações de segurança, com o intuito de reduzir a ocorrência de acidentes. Além disso, foi criado também um Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

(SNISB), que possui como função a coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre barragens (BRASIL, 2020).

Conforme o art. 1º, a PNSB aplica-se a barragens que apresentem pelo menos uma das características (ANA, 2022):

- a) Altura do maciço igual ou superior a 15 (quinze) metros;
- b) Capacidade total do reservatório superior ou igual a 3.000.000 m³ (três milhões de metros cúbicos);
- c) Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- d) Categoria de dano potencial associado e categoria de risco alto, a critério do órgão fiscalizador conforme descrito nesta mesma lei.

O cadastro de barragens é a base da PNSB, onde deve conter todas as barragens existentes, independentemente de serem submetidas à PNSB ou não. Com as informações apresentadas nele é possível realizar qualquer avaliação sobre a segurança de barragens no país (ANA, 2022).

2.3.1 Avaliação da condição de segurança em barragens de terra

As inspeções de segurança das barragens têm como objetivo avaliar as condições físicas das suas partes integrantes, de forma a identificar e monitorar anomalias que afetem potencialmente a sua segurança. Elas apontam a necessidade de reabilitar as barragens que estejam em risco de rompimento, reduzindo prejuízos à vida humana, econômicos e ambientais às localidades afetadas (ANA, 2016).

No momento da inspeção visual em campo, recomenda-se percorrer toda a extensão da barragem, contemplando todas as suas partes, tais como, talude de montante, crista, talude de jusante, pé e área de jusante, ombreiras, faixa de segurança de projeto a jusante da saia da barragem, zona do reservatório e estruturas extravasoras. Sugere-se, também, que durante a inspeção visual em campo sejam realizados registros fotográficos das anomalias para fins de correção e monitoramento (ANA, 2016).

Segundo Oliveira (2008), a segurança de uma barragem não está condicionada somente ao surgimento de anomalias visíveis, sendo necessária uma avaliação periódica, com profissionais qualificados, a fim de definir com confiabilidade a real condição da estrutura.

Os aspectos específicos indicados para a revisão periódica de barragens de terra são: análise das propriedades geotécnicas dos materiais do aterro; condições e tratamentos da fundação; análises dos parâmetros de projeto; e análises de percolação e estabilidade (ANA, 2016).

Tratando-se dos estudos geotécnicos que deverão ser realizados, estes devem: revisar os ensaios de laboratório e de campo executados no maciço de fundação e os relativos aos materiais de construção; revisar os registros dos níveis d'água, antes e depois do enchimento do reservatório; revisar os relatórios geotécnicos desde os preliminares até os relatórios da construção; correlacionar a atitude das descontinuidades com a estabilidade dos taludes, estabilidade da fundação e cargas na barragem e reservatório; analisar a compatibilidade da caracterização geotécnica definida no projeto com a situação encontrada durante a construção da barragem; e reavaliar os estudos de percolação, estabilidade e os valores de controle da instrumentação (ANA, 2016).

A resolução ANA nº 236 (2017), alterada pela resolução ANA nº 121 (2022), define a periodicidade da inspeção de segurança regular e da revisão periódica de segurança. O dano potencial associado e a categoria de risco em que se classificam a barragem, Quadro 1, define a periodicidade das inspeções e revisões de segurança. A resolução define que devem ser realizadas, no mínimo, uma inspeção de segurança regular por ano, com exceção das barragens Classe D onde pode ser adotada a periodicidade bianual.

Quadro 1 – Matriz de classificação da barragem.

Categoria de Risco	Dano Potencial Associado		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	A	B	D
Baixo	A	B	D

Fonte: Resolução ANA nº 236 (2022).

Sendo a classificação por categoria de risco definida em função das características técnicas, dos métodos construtivos, do estado de conservação, da idade do empreendimento e do atendimento ao Plano de Segurança de Barragem. Já a classificação por dano potencial associado à barragem é feita em função do potencial de perdas de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais decorrentes da ruptura da barragem (BRASIL, 2020).

A classificação da barragem é realizada pelo órgão fiscalizador, que, além de seguir os critérios já pré-definidos acima, poderá também incluir novos critérios nessa classificação (BRASIL, 2020).

2.4 Análise de percolação em barragens de terra

Ao se projetar uma barragem de terra, é fundamental conhecer e controlar o fluxo da água pelo maciço, fundação e ombreiras. A importância do estudo da percolação da água no solo sustenta-se nas estatísticas que apresentam a movimentação da água como causa de diversos problemas práticos, tais como: drenagem superficial, controle de águas subterrâneas, cálculo de vazões, análises de recalque, estabilidade de taludes, entre outros (PINTO, 2006).

2.4.1 Movimento de água no solo

A água frequentemente ocupa a maior parte ou a totalidade dos vazios do solo e, por conta das diferenças de potenciais, a água desloca-se no seu interior (PINTO, 2006). Cruz (1996) define a permeabilidade de um material como a

capacidade que um fluido possui de passar pelos poros ou vazios de determinado meio, sendo assim, uma permeabilidade elevada indica maior facilidade para o fluxo mover-se pelo meio.

De acordo com Marangon (2018), o fluxo em um meio poroso ocorre devido a existência de uma diferença de carga hidráulica total entre dois pontos distintos, sendo a carga total, Equação (1), a soma da carga altimétrica e a carga piezométrica.

$$H = z + \frac{u}{\gamma_0} \quad (1)$$

Em que,

H	Carga hidráulica total
z	Carga altimétrica
u	Pressão neutra
γ_0	Peso específico da água

Darcy em 1856, realizou um experimento para estudar as propriedades do fluxo de água através de uma camada de filtro de areia. Esse experimento deu origem a Lei de Darcy, expressa através da Equação (2) (MARANGON, 2018).

$$Q = k \times i \times A \quad (2)$$

Em que,

Q	Vazão ou descarga de água pelo solo
k	Coeficiente de permeabilidade
i	Gradiente hidráulico
A	Área da seção transversal da amostra de solo

A obtenção do coeficiente de permeabilidade (k) pode ser feita através de ensaios geotécnicos de laboratório, ensaios de campo ou ainda, por métodos indiretos. Dentre os ensaios geotécnicos de laboratório que podem ser utilizados, destacam-se o Permeâmetro de Carga Constante e o Permeâmetro de Carga Variável. O princípio desses ensaios é medir o volume de água que percola em um meio poroso com a finalidade de determinar o coeficiente de permeabilidade através da Lei de Darcy (PINTO, 2006).

De posse dos dados de permeabilidade, é possível classificar o material em questão. Desse modo, para solos sedimentares, Pinto (2006) apresenta uma ordem de grandeza para os valores de permeabilidade mais recorrentes, em função da granulometria, conforme exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores típicos de coeficiente de permeabilidade (k).

Material	k (m/s)
Argilas	$< 10^{-9}$
Siltes	10^{-6} a 10^{-9}
Areias argilosas	10^{-7}
Areias finas	10^{-5}
Areias médias	10^{-4}
Areias grossas	10^{-3}

Fonte: Pinto (2006).

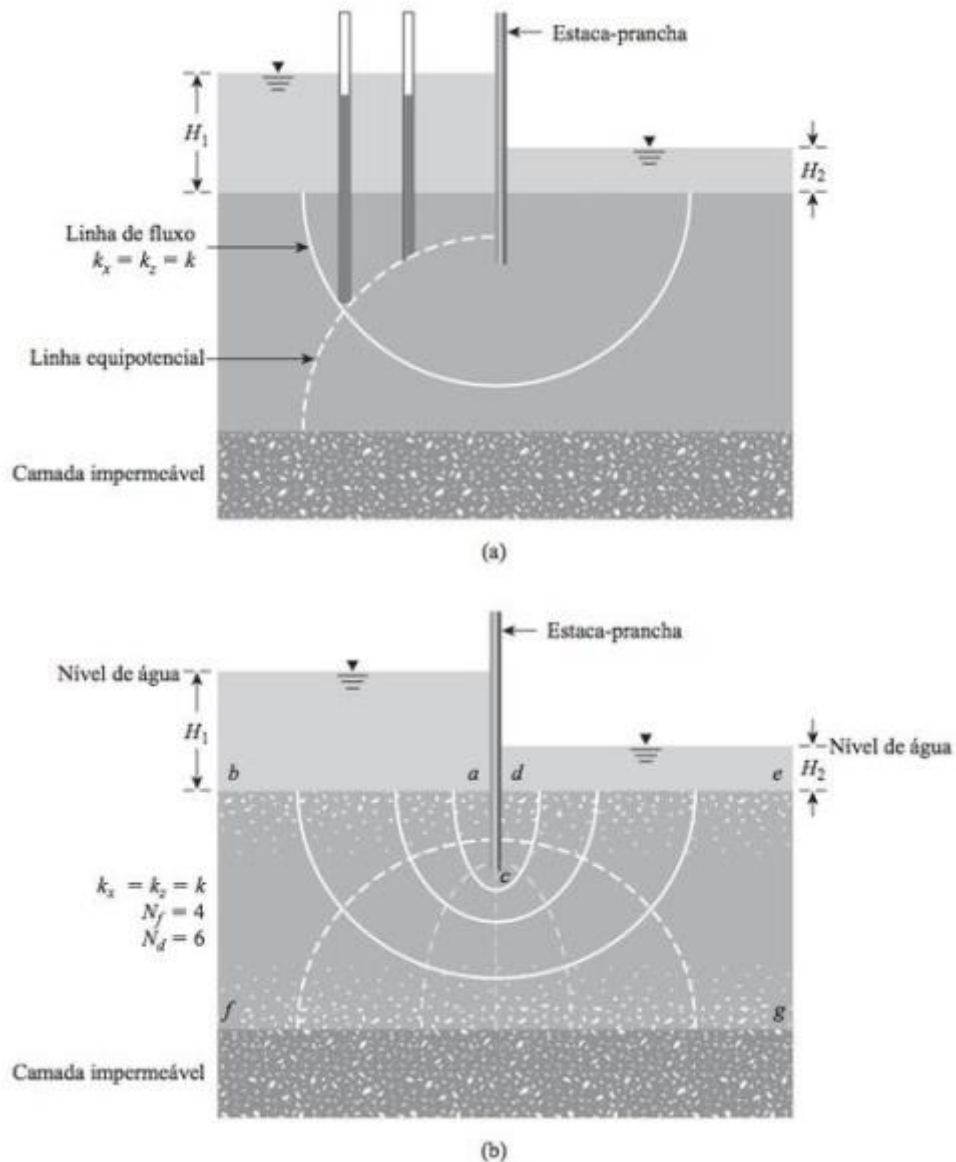
Destaca-se que os valores expostos na Tabela 1 representam apenas uma ordem de grandeza (PINTO, 2006).

2.4.2 Redes de fluxo

O trajeto que a água percorre através de um meio saturado é designado linha de fluxo. Por se tratar de um regime laminar, as linhas de fluxo não podem se cruzar. No entanto, como existem perdas de carga nesse percurso, haverá pontos em que uma determinada fração de carga total já terá sido consumida. Os locais

geométricos que possuem a mesma carga total são chamados de equipotenciais. Esses conceitos podem ser observados na Figura 5 (a) e a rede de fluxo finalizada na Figura 5 (b) (MASSAD, 2010).

Figura 5 – (a) Definição de linhas de fluxo e linhas equipotenciais e (b) Rede de fluxo finalizada.



Fonte: Das (2014).

Conforme cita Pinto (2006), quando o fluxo de água ocorre sempre na mesma direção, o fluxo é considerado unidimensional. Já quando as partículas de água se deslocam em qualquer direção, o fluxo é tridimensional, como no caso da migração de água para um poço. Por fim, tem-se o fluxo bidimensional, que acontece

quando as partículas de água seguem caminhos curvos, mas, contidos em planos paralelos, sendo o caso da percolação pelas fundações de uma barragem.

Os fluxos bidimensionais e tridimensionais são caracterizados pela equação diferencial de fluxo, Equação (3), a qual vale-se das seguintes premissas: solo homogêneo, solo e água incompressíveis (MARANGON, 2018).

$$k_x \times \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \times \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \times \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{e+1} \times \left(e \times \frac{\partial S}{\partial t} + S \times \frac{\partial e}{\partial t} \right) \quad (3)$$

Em que,

- k_i Permeabilidade na direção i
- h Carga hidráulica total
- S Grau de saturação
- e Índice de vazios
- t Tempo

Visto que no caso de barragens o fluxo é bidimensional, a Equação (3) pode ser simplificada para essa condição, considerando o meio saturado e fluxo permanente (MARANGON, 2018).

$$k_x \times \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \times \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

Em que,

- k_i Permeabilidade na direção i
- h Carga hidráulica total

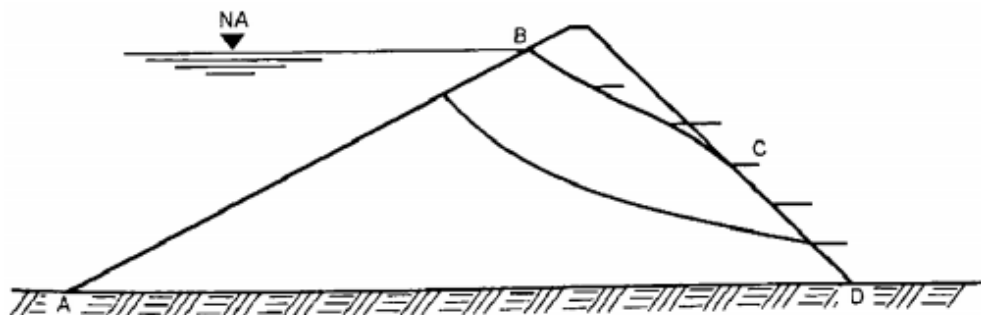
De acordo com Marangon (2018), quando o solo em questão é isotrópico, ou seja, que possui o mesmo coeficiente de permeabilidade na direção x e na direção

y, a equação pode ser simplificada novamente, resultando na Equação de Laplace (Equação (5)).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

Pinto (2006) menciona que o método mais comum de traçado de redes de fluxo é a construção gráfica, baseada em tentativas, mediante a definição das linhas limites. Na Figura 6, as linhas BA e CD são linhas equipotenciais limite, e as linhas BC e AD representam linhas de fluxo limites e, por fim, a linha BC é a linha freática (MASSAD, 2010).

Figura 6 – Rede de fluxo em uma barragem de terra.



Fonte: Massad (2010).

Após o traçado da rede de fluxo, pode-se obter a perda de água ou vazão (Q) por metro de seção transversal da barragem, conforme Equação (6) (MASSAD, 2010).

$$Q = k \times H \times \frac{n_c}{n_q} \quad (6)$$

Em que,

Q Perda de água ou vazão por metro da seção transversal

k Coeficiente de permeabilidade dos materiais

H Carga hidráulica total dissipada

n_c Número de canais de fluxo

n_q Número de quedas potenciais ou números de regiões

A pressão neutra em qualquer ponto na rede de fluxo é calculada por meio da Equação (7).

$$u_i = \gamma_w \times (h_T - z_i) = \gamma_w \times h_p \quad (7)$$

Em que,

u Poropressão em qualquer ponto no interior da rede de fluxo

γ_w Peso específico da água

h_T Carga total sobre o ponto, descontando a perda de carga

z_i Altura altimétrica no ponto específico i

h_p Carga piezométrica sobre o ponto

2.4.3 Gradiente hidráulico crítico

De acordo com Pinto (2006), o gradiente hidráulico é caracterizado pela dissipação da carga total por unidade de comprimento. O gradiente hidráulico crítico é o valor de gradiente que promove o estado de areia movediça, tal estado pode acontecer quando há um fluxo ascendente, como por exemplo, na saída de água no pé do talude de jusante de barragens de terra apoiadas em fundações de solos arenosos.

O gradiente hidráulico é determinado na Equação x. Seu valor é da ordem de um, ou seja, quando o valor de peso específico submerso do solo e o peso específico da água se igualam (PINTO, 2006).

$$i_{crit} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (8)$$

Em que,

i_{crit} Gradiente hidráulico crítico

γ_{sub} Peso específico submerso do solo

γ_w Peso específico da água

Na prática, gradientes de 0,5 a 0,8 já são considerados valores críticos junto ao pé do talude de jusante na saída de água. Destaca-se a importância da determinação do valor do gradiente hidráulico no ponto de saída do fluxo, local onde pode ocorrer uma situação crítica (MASSAD, 2010).

2.5 Análise de estabilidade em barragens de terra

Conforme cita Fiori (2015), um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças distintos, sendo eles: forças devidas ao peso dos materiais; forças devidas ao escoamento da água e forças devidas à resistência ao cisalhamento. Dito isso, o estudo da estabilidade deve levar em consideração o equilíbrio entre essas forças.

A ruptura de taludes ocorre devido a formação de uma superfície de cisalhamento contínua sobre a massa de solo. A camada de solo existente nessa superfície, perde suas propriedades mecânicas durante o processo de ruptura, formando assim uma zona cisalhada no maciço terroso (GERSCOVICH, 2016).

2.5.1 Cenários de carregamento

De acordo com a Eletrobrás (2003), para a garantia de estabilidade ao escorregamento, os taludes da barragem deverão ser analisados para tais condições de carregamento: ao final de construção; rebaixamento rápido do nível do reservatório; situação de percolação estável e à ocorrência de um sismo.

O cenário de carregamento de final de construção corresponde ao estágio anterior ao enchimento do reservatório e posterior ao término da construção do aterro da barragem. Considera-se essa condição crítica principalmente para a seção de fechamento da barragem, que desenvolve pressões neutras devidas ao adensamento do aterro não dissipadas totalmente (ELETROBRÁS, 2003).

No caso da condição de rebaixamento rápido, a análise é necessária pois quando os materiais dos aterros possuem permeabilidades baixas, um rebaixamento do reservatório poderá não conduzir a dissipação adequada das poropressões instaladas. Esse rebaixamento origina uma complexa combinação de carregamento, tais como: redução das tensões principais com aumento da tensão desviatória, rotação da direção das tensões principais e o estabelecimento de condições transientes de fluxo gravitacional de água (ANA, 2016).

No que tange a condição de percolação em regime permanente, esta corresponde a situação de operação na qual o nível do reservatório permanece em seu valor máximo por um período suficiente para a saturação do maciço nas zonas submetidas a percolação (ANA, 2016).

Por fim, tratando-se da análise de estabilidade durante a ocorrência de um sismo, esta é considerada em regiões sísmicas e tem sido recomendada em regiões historicamente com pequena atividade sísmica, em virtude da possibilidade de sismos induzidos pelo próprio enchimento do reservatório. Para essa análise, na ausência de estudos de sismicidade, recomenda-se a adoção das seguintes cargas: 0,05 gravidade na direção horizontal e 0,03 gravidade na direção vertical (ANA, 2016).

2.5.2 Fator de segurança

Um dos principais objetivos das análises de estabilidade é a determinação do fator de segurança (FS), que é definido através da Equação (9) (DAS, 2014).

$$F_S = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (9)$$

Em que,

F_S Fator de segurança com relação à resistência

τ_f Resistência média ao cisalhamento do solo

τ_d Tensão média de cisalhamento ao longo da superfície potencial de escorregamento

A resistência ao cisalhamento de um solo é calculada conforme a Equação (10) (DAS, 2014).

$$\tau_f = c' + \sigma' \times tg\phi' \quad (10)$$

Em que,

τ_f Resistência ao cisalhamento do solo

c' Coesão

σ' Tensão normal na superfície potencial de ruptura

ϕ' Ângulo de atrito

Em conformidade com o exposto por Das (2014), resultados de FS inferiores a 1,00 indicam uma situação de instabilidade, e quando o valor obtido for igual a 1,00 têm-se a situação de ruptura iminente. De maneira geral, um fator de

segurança igual ou superior a 1,50 é considerado seguro para manter a condição de talude estável.

De acordo com a Eletrobrás (2003), os critérios de aceitação do coeficiente de segurança estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores mínimos de fator de segurança.

Caso	Fator de Segurança
Final de Construção	1,3*
Rebaixamento Rápido	1,1 a 1,3**
Percolação Estável	1,5
Análise Sísmica	1,0

* Para barragens acima de 15 m de altura sobre fundações fracas, usar fator de segurança mínimo de 1,4.

** Nos casos em que o rebaixamento ocorre com frequência, considerar coeficiente de 1,3.

Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2003).

Junto as informações expostas na Tabela 2, ANA (2016) apresenta valores relativamente diferentes dos mencionados, considerando um coeficiente de 1,5 para a condição de percolação estável, 1,4 para a condição de final da construção, 1,3 para situações de rebaixamento rápido do reservatório e 1,1 para as demais ocorrências excepcionais, tais como sismos e elevação da linha freática (colmatação dos drenos).

2.5.3 Parâmetros geotécnicos de resistência

Em geral, solos são formados a partir do intemperismo das rochas, portanto, suas propriedades geotécnicas são determinadas, em princípio, pelos minerais que constituem suas partículas (DAS, 2014).

2.5.3.1 Granulometria

Num solo, geralmente convivem partículas de tamanhos diversos. Para o reconhecimento do tamanho dos grãos de um solo, realiza-se uma análise

granulométrica, que consiste na fase de peneiramento e sedimentação, conforme NBR 7181 (ABNT, 2016).

Conforme exposto na NBR 6502, ABNT (2022), para diversas faixas de tamanho de grãos, existem denominações específicas, conforme definidas na Tabela 3. Após conhecida a distribuição granulométrica do solo, determina-se a porcentagem correspondente a cada uma das frações.

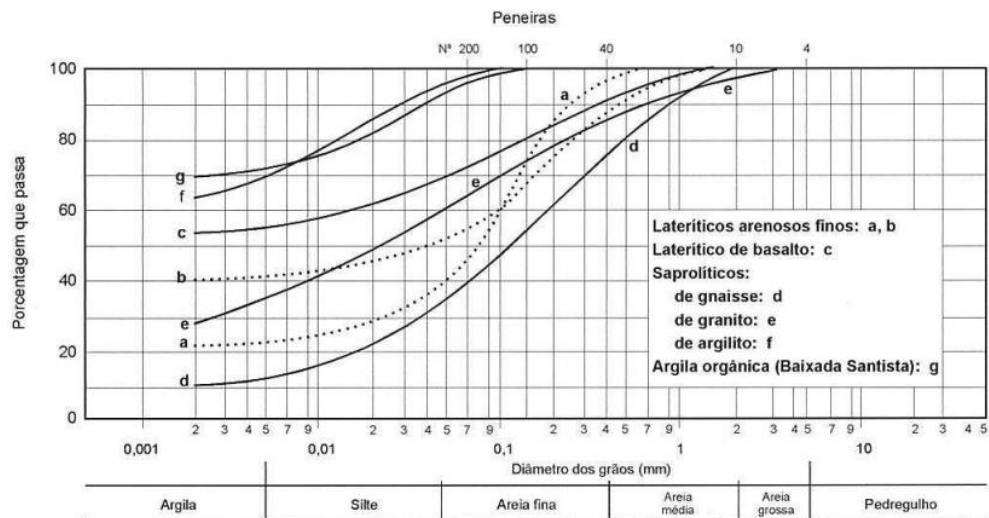
Tabela 3 – Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos.

Fração	Limites definidos pela ABNT
Matacão	de 20 cm a 1 m
Pedra	de 6,0 cm a 20 cm
Pedregulho	de 2,0 mm a 6,0 cm
Areia grossa	de 0,60 mm a 2,0 mm
Areia média	de 0,20 mm a 0,60 mm
Areia fina	de 0,06 mm a 0,20 mm
Silte	de 0,002 mm a 0,06 mm
Argila	inferior a 0,002 mm

Fonte: ABNT (2022).

Embora solos de mesma origem possuam características comuns, é frequente que apresentem alguma dispersão de constituição. A Figura 7 apresenta exemplos de curvas granulométricas de alguns solos brasileiros.

Figura 7 – Curvas granulométricas de alguns solos brasileiros.



Fonte: Pinto (2006).

2.5.3.2 *Peso específico natural*

No solo, somente uma parte do volume total é ocupado pelas partículas sólidas, que se acomodam formando uma estrutura, o restante é ocupado por água ou ar. Portanto, o solo é constituído de três fases: partículas sólidas, água e ar (PINTO, 2006).

A NBR 9813 (ABNT, 2016), trata sobre o ensaio realizado para a determinação da massa específica natural, que é determinada através da Equação (11).

$$\rho_{nat} = \frac{M_t - M_c}{V_c} \quad (11)$$

Em que,

ρ_{nat} Massa específica aparente natural do solo

M_t Massa do cilindro com a amostra úmida

M_c Massa do cilindro

V_c Volume interno do cilindro

Conforme observado, o resultado obtido a partir da Equação (11) é em unidade de massa (g/cm^3), para a obtenção do resultado do peso específico natural, deve-se multiplicar o resultado obtido pelo valor da gravidade (aproximadamente 10 m/s^2).

2.5.3.3 Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento de uma massa de solo é a resistência interna por área específica que essa massa pode oferecer para resistir a rupturas e a deslizamentos. Mohr apresentou a teoria de ruptura afirmando que um material se rompe devido à combinação de força normal e força de cisalhamento. Portanto, a relação entre a força de cisalhamento e a força normal é dada pela Equação (12) (DAS, 2014).

$$\tau = f(\sigma) \quad (12)$$

De acordo com Cruz (1996), a resistência ao cisalhamento pode ser expressa pela Equação (13).

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (13)$$

Em que,

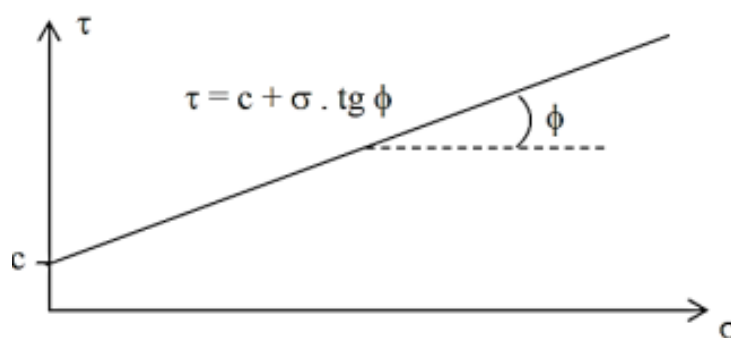
c' Coesão efetiva do solo

ϕ Ângulo de atrito

σ' Tensão normal efetiva na superfície potencial de ruptura

O ângulo de atrito é obtido através do gráfico de Mohr-Coloumb, entre a relação da tensão normal (σ) e o cisalhamento (τ), conforme exposto na Figura 8.

Figura 8 – Gráfico Tensão Normal x Cisalhamento.



Fonte: Listo (2015).

2.5.4 Métodos determinísticos de estabilidade

Existem dois tipos de abordagem para a determinação do fator de segurança do ponto de vista determinístico: teoria do equilíbrio limite e análise de tensões. Sendo o método mais utilizado o equilíbrio limite, seu mecanismo de análise procura a resistência máxima suportada pelo talude antes de sua ruptura (RODRIGUES, 2014).

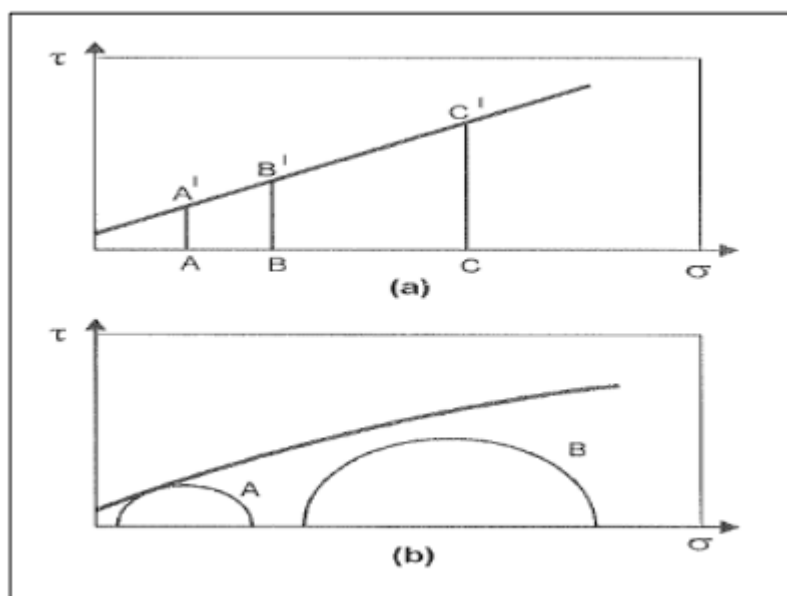
No método de equilíbrio limite, existem algumas premissas para satisfazer o equilíbrio de forças e momentos, tais como (RODRIGUES, 2014):

- a) A superfície potencial de ruptura é previamente conhecida ou arbitrada;
- b) A massa de solo encontra-se em condições iminentes de ruptura generalizada;
- c) O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é satisfeito ao longo de toda a superfície de ruptura;
- d) O FS é único ao longo da superfície potencial de ruptura.

De acordo com Pinto (2006), o critério de Mohr (Figura 9 b) é, basicamente, quando não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado das tensões se encontrar no interior de uma curva. O círculo B representa um estado de tensões onde não há ruptura e o círculo A indica um estado de tensões na ruptura. Já o critério de Coulomb (Figura 9 a) é quando não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão $c + f \times \sigma$.

Ao desenhar uma reta, como a envoltória de Mohr, seu critério de resistência fica análogo ao de Coulomb, justificando a expressão “critério de Mohr-Coulomb” (PINTO, 2006).

Figura 9 – Representação dos critérios de ruptura: (a) de Coulomb e (b) de Mohr.



Fonte: Pinto (2006).

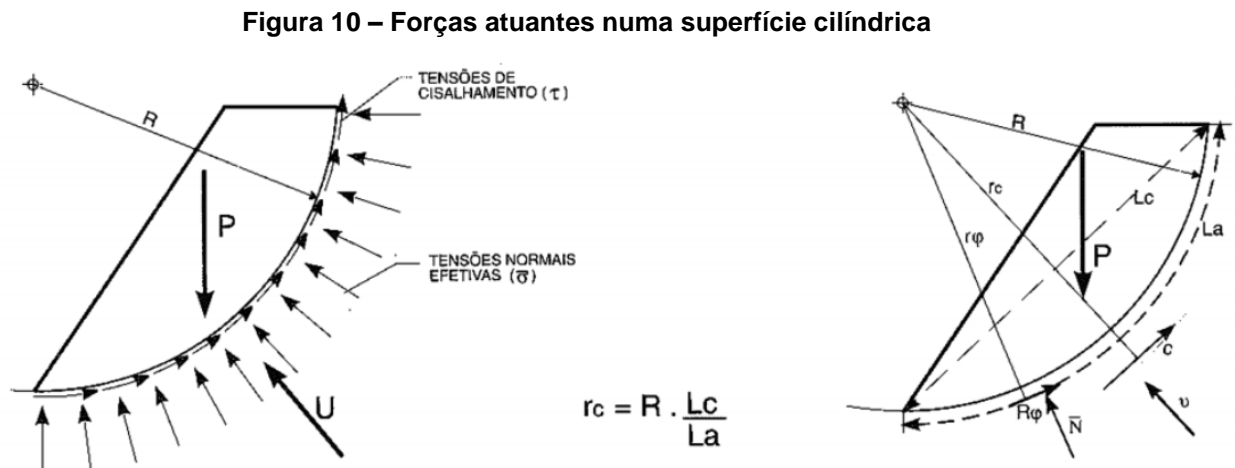
De acordo com o exposto pela Eletrobrás (2003), existem diversos métodos de equilíbrio limite que consideram a divisão da massa de solo em fatias, variando as hipóteses básicas sobre os esforços entre lamelas. A escolha do método a ser utilizado é de acordo com a forma de ruptura esperada.

Partindo-se do conhecimento das forças atuantes, são determinadas as tensões de cisalhamento induzidas, através de equações de equilíbrio. Por fim, é realizada uma comparação entre essas tensões com a resistência ao cisalhamento do solo (RIBEIRO, 2015).

Segundo Cruz (1996), as forças atuantes na cunha de solo (Figura 10) são:

- a) Peso próprio da cunha (P);
- b) Pressões neutras distribuídas ao longo da superfície de escorregamento, desenvolvidas durante o próprio processo construtivo ou resultantes de um regime de percolação de água qualquer (U);

- c) Uma pressão normal efetiva (σ) distribuída ao longo da superfície de escorregamento;
- d) Tensões de cisalhamento (τ) distribuídas também ao longo da superfície de escorregamento.



Fonte: Whitman (1963) *apud* Cruz (1996).

O método das fatias não apresenta restrições quanto a homogeneidade do solo, geometria do talude e considerações de tensões. Desse modo, permite que a heterogeneidade do solo e a irregularidade da superfície possa ser considerada. Nesse critério, o número de incógnitas é superior ao número de equações, e o problema é estaticamente indeterminado (GERSCOVICH, 2009).

São vários os métodos de cálculo que visam reduzir o número de incógnitas, de modo a tornar o problema estaticamente possível. Dessa maneira, o Quadro 2 apresenta um resumo dos principais métodos de equilíbrio limite, suas hipóteses e tipo de superfície de ruptura.

Quadro 2 - Características dos métodos das fatias

Método	Hipóteses	Tipo de Superfície de Ruptura
Fellenius Fatias	Não considera forças entre fatias	(Circular)
Bishop Simplificado Fatias	Resultante das forças entre fatias é horizontal	(Circular) – FS é determinado a partir da consideração de equilíbrio de momentos.
Janbu Simplificado Fatias	Resultante das forças entre fatias é horizontal. Um fator f_0 é usado para levar em conta os efeitos das forças tangenciais	(Qualquer) – FS é determinado a partir do equilíbrio de forças.
Janbu Generalizado Fatias	Localização da força normal entre fatias definida por uma linha de empuxo arbitrária	(Qualquer) – FS determinado a partir do equilíbrio de forças e de momentos.
Morgenstern-Price Fatias	Direção das forças entre fatias definidas usando uma função arbitrária $f(x)$. A parcela de $f(x)$ necessária para satisfazer o equilíbrio de forças e de momentos é calculada.	(Qualquer) – Fatias são de espessura infinitesimal
Spencer Fatias	Resultante das forças entre fatias têm inclinações constantes através da massa do solo.	(Qualquer) – método semelhante ao de Morgenstern-Price com $f(x)=1$

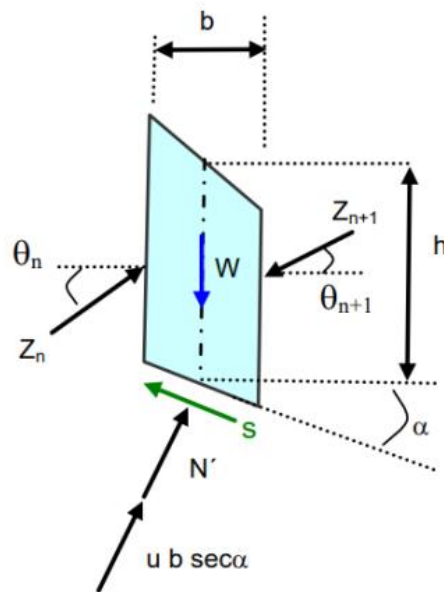
Fonte: Adaptado de De Campos (1985).

As análises de estabilidade do trabalho em questão seguiram a metodologia de Spencer, por tratar-se de um método conservador e usualmente utilizado, descrita com maior especificidade no item 2.5.4.1.

2.5.4.1 Método Spencer

O método de Spencer é desenvolvido para aplicação em superfícies de ruptura circulares, mas que pode ser adaptado para superfícies não circulares, contendo um centro de rotação fictício (NASH, 1987). Segundo Telles (2015), é considerado um método rigoroso visto que satisfaz as três equações de equilíbrio para um sistema bidimensional. Os esforços considerados nesse método estão expostos na Figura 11.

Figura 11 – Esforços na fatia – Método de Spencer



Fonte: Gerscovich (2009).

A força entre as fatias X e E podem ser representadas por suas resultantes Z_n e Z_{n-1} , cuja soma é dada pela resultante Q de inclinação θ . A partir das equações de equilíbrio, é possível calcular a resultante Q , conforme exposto na Equação (14). Assume-se um valor de θ a fim de calcular o valor de Q para cada fatia, mantendo-se o FS como incógnita (GERSCOVICH, 2016).

$$Q = \frac{\frac{c'b}{FS} \sec \alpha + \frac{\tan \phi'}{FS} (W \cos \alpha - \mu B \sec \alpha) - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left\{ 1 + \frac{\tan \phi'}{FS} \tan(\alpha - \theta) \right\}} \quad (14)$$

Depois disso, calcula-se o valor de F pela equação do equilíbrio de forças (Equação (15)) e de momentos (Equação (16)), substituindo o valor de Q em ambas. Logo, para os diferentes valores de inclinação assumidos comparam-se os FS's até que sejam iguais.

$$\Sigma Q \cos \theta = \Sigma Q \sin \theta = \Sigma Q = 0 \quad (15)$$

$$\Sigma [Q \cos(\alpha - \theta)] = 0 \quad (16)$$

2.5.5 Métodos probabilísticos de estabilidade

De acordo com Chok (2006), a análise probabilística é a abordagem mais realista da estabilidade de um talude, pois são levadas em consideração a incerteza e a variabilidade. Enquanto as análises determinísticas são baseadas em valores característicos, que são extrapolados para toda a superfície.

Numa análise probabilística é de extrema importância que se tenha em mãos os valores da média (μ_x) e do desvio padrão (s_x) de uma variável aleatória qualquer (X). Com esses dados calcula-se a probabilidade de ruptura de um talude calculando a variabilidade do fator de segurança, que será dependente da variabilidade dos parâmetros do solo (JESUS, 2015).

Os principais métodos probabilísticos utilizados na geotecnia são: Método de primeira-ordem segundo momento (FOSM); Método das estimativas pontuais (PEM) e o Método de Monte Carlo.

As análises de estabilidade do trabalho em questão seguiram o método de Monte Carlo, por se tratar do método mais comumente utilizado nesse tipo de análise, e será descrito com maior especificidade no item 2.5.5.1.

2.5.5.1 Método de Monte Carlo

Conforme citado por Silva (2015), a simulação de Monte Carlo se caracteriza pela geração de uma sequência de números aleatórios uniformes de acordo com a função de densidade de probabilidade da variável.

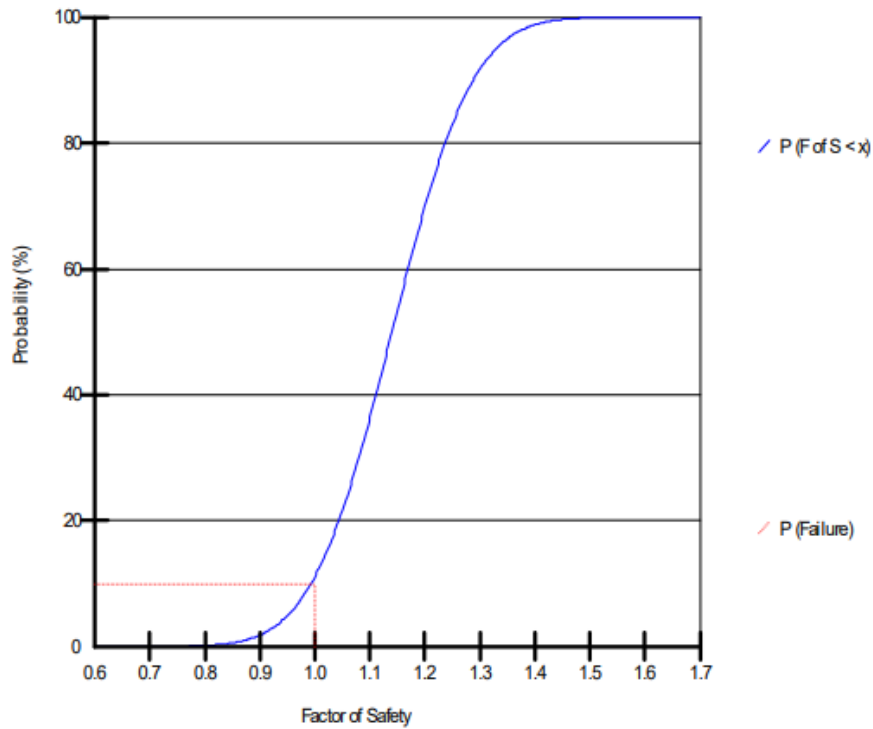
No método de Monte Carlo, cria-se um número elevado de conjuntos de valores gerados aleatoriamente para os parâmetros incertos e calcula-se a função de desempenho para cada conjunto. As estatísticas do conjunto resultante da função podem ser computadas e o índice de confiabilidade (β) e a probabilidade de falha (P_f) calculados diretamente (BAECHER E CHRISTIAN, 2003).

Em conformidade com Laranja e Brito (2003), para a obtenção da estimativa da probabilidade de falha associada a um estado limite definido por uma função, a simulação deverá seguir a seguinte metodologia:

- a) Geração de valores para as variáveis básicas de entrada de acordo com as respectivas funções de distribuição;
- b) Realização da análise determinística do modelo do sistema e verificação da eventual ocorrência ou violação do estado limite ($g(X) \leq 0$);
- c) Repetição de a) e b) N vezes e contagem do número de experiências em que é atingido ou ultrapassado o estado limite ($N[g(X) \leq 0]$).

A probabilidade de falha é a probabilidade de se obter um fator de segurança menor do que 1,0, conforme Figura 12. Ela é determinada contabilizando a quantidade de fatores de segurança abaixo de 1,0 e em seguida, tomando esse número como uma porcentagem do número total de tentativas de Monte Carlo convergentes (GEO-STUDIO, 2020).

Figura 12 – Fator de Segurança



Fonte: GEO-STUDIO (2020).

Considerando as premissas básicas expostas, a estimativa da probabilidade de falha é apresentada pela Equação (17).

$$\bar{P}_f = \frac{N[g(X) \leq 0]}{n} \quad (17)$$

O índice de confiabilidade é uma indicação do número de desvios padrão que separam o fator de segurança médio do fator de segurança crítico. Também pode ser considerado como uma forma de normalizar o fator de segurança em relação à sua incerteza (GEO-STUDIO, 2020).

Para a distribuição normal, é utilizada a seguinte equação.

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (18)$$

Em que,

β Índice de confiabilidade

μ_{FS} Média do fator de segurança

σ_{FS} Desvio padrão do fator de segurança

O Quadro 3 apresenta a classificação de desempenho de segurança da barragem com base nos valores de índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura obtidos através das análises de estabilidade com as simulações de Monte Carlo.

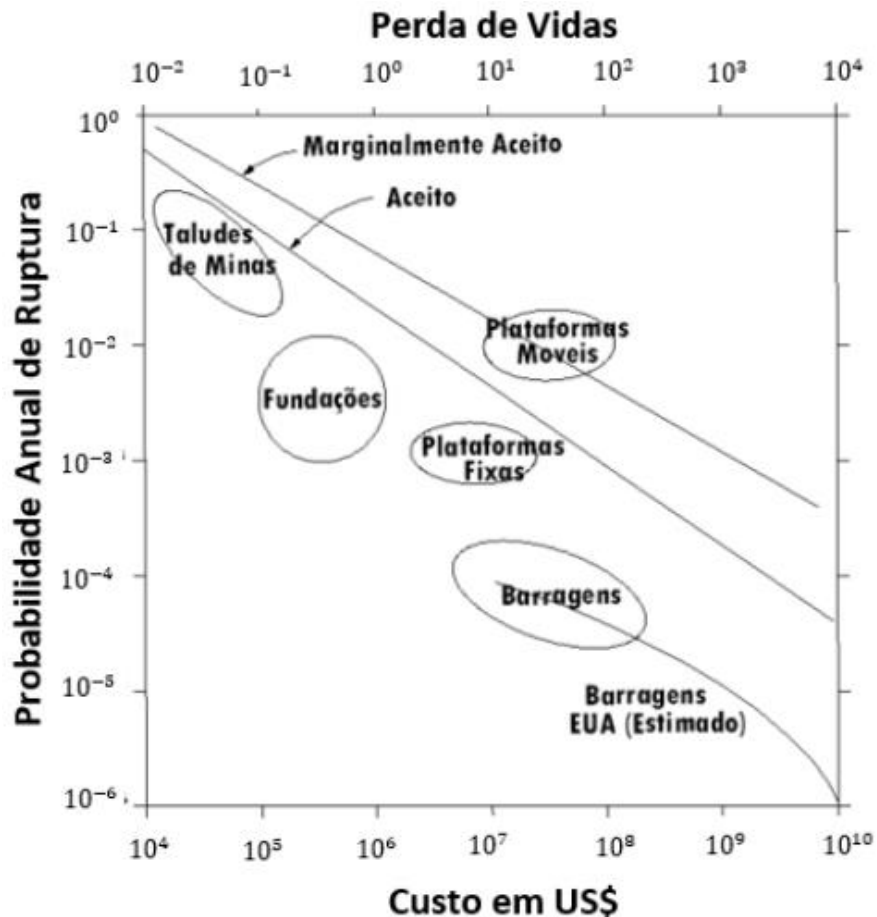
Quadro 3 - Classificação de valores de IC e Probabilidade de Ruptura.

Nível de desempenho	Índice de confiabilidade	Probabilidade de ruptura (%)
Alto	5,0	$3,0 \times 10^{-7}$
Bom	4,0	$3,0 \times 10^{-5}$
Acima da média	3,0	$1,3 \times 10^{-3}$
Abaixo da média	2,5	$6,0 \times 10^{-3}$
Pobre	2,0	0,023
Insatisfatório	1,5	0,07
Perigoso	1,0	0,16

Fonte: Adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (1997).

Baecher (1982b, apud FLORES, 2008) apresenta diferentes probabilidades de ruptura aceitáveis, de acordo com Figura 13. Sendo que, para barragens é aceitável uma probabilidade de ruptura inferior a 10^{-4} .

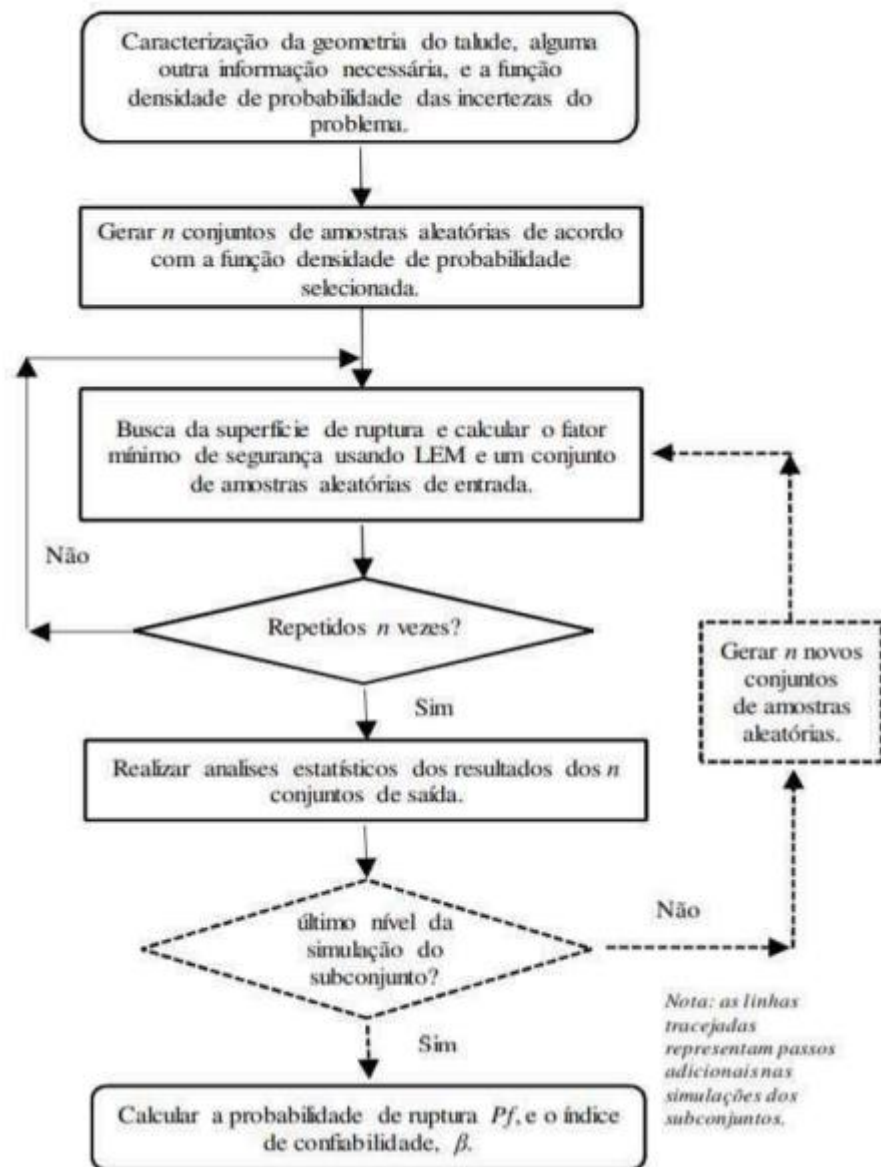
Figura 13 – Probabilidades de ruptura aceitáveis



Fonte: Baecher (1982b, apud FLORES, 2008).

A análise de estabilidade de taludes probabilística utilizando o método de Monte Carlo depende diretamente do número de simulações realizadas no estudo. No entanto, é um método que apresenta uma facilidade de entendimento e alta adaptação a diferentes casos, oferecendo resultados precisos. O método pode ser resumido através do fluxograma apresentado na Figura 14 (CRESTANI, 2018).

Figura 14 - Fluxograma – Método de Monte Carlo



Fonte: Wang (2010).

De acordo com o estudo realizado por Netto (2019), onde foram realizadas análises de estabilidade através de métodos determinísticos e probabilísticos em uma barragem de terra zonada, os fatores de segurança obtidos através do método probabilístico de Monte Carlo, foram superiores aos fatores de segurança obtidos pelo método determinístico. Os FS obtidos pela abordagem probabilística foram de 2,8% a 4,1% superiores aos obtidos pelo método determinístico.

3 ESTUDO DE CASO

Nos tópicos seguintes são apresentadas as principais características do estudo de caso, objeto do presente trabalho, cuja localidade e identificação não serão informadas a pedido da empresa concedente.

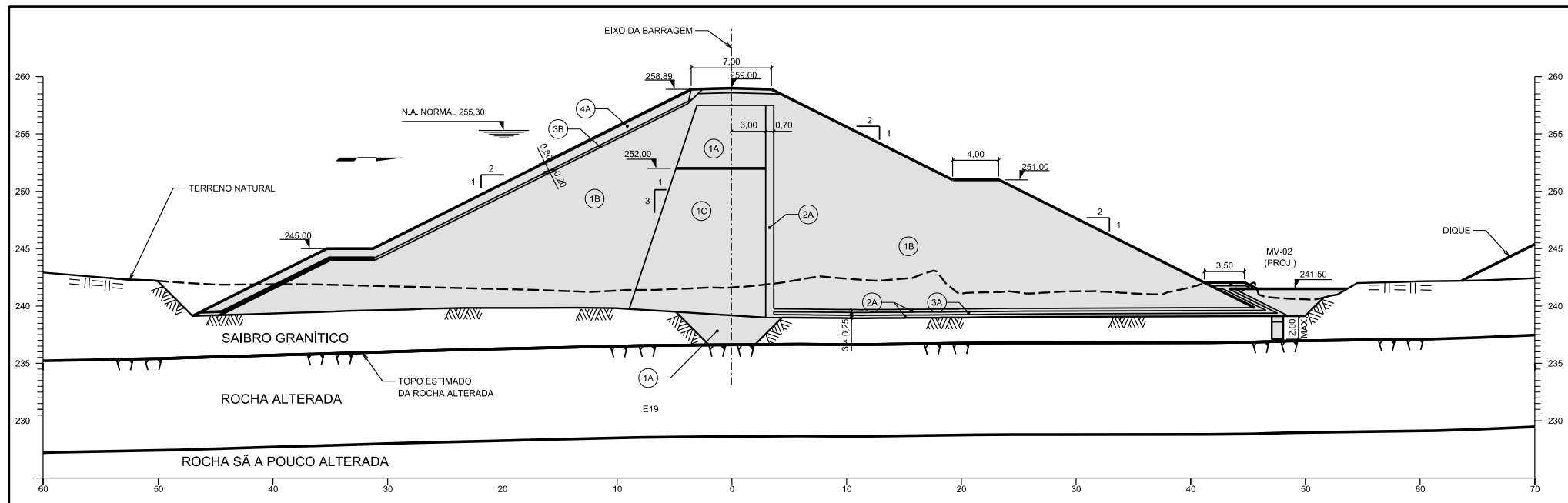
As informações foram cedidas através da empresa responsável pela revisão e complementação do projeto executivo desta barragem de terra. Os materiais recebidos tratam-se, basicamente, dos resultados do programa de investigações geológico-geotécnicas, especificações técnicas dos serviços de campo e análises preliminares de percolação e estabilidade.

3.1 Características da barragem

O objeto de análise do presente trabalho é uma barragem de terra zonada, sendo o núcleo composto por solo argiloso e os espaldares em solo mais arenoso, com taludes de montante e jusante com inclinação de 1V:2H. Possui uma altura máxima de 20,0 m e cerca de 1695,0 m de extensão. No talude de montante existe uma berma de 4,0 m na elevação 245,0 m e no talude de jusante há uma berma de 4,0 m na elevação 251,0 m, conforme exposto na Figura 15. Conforme matriz de classificação, exposta no Quadro 1, a empresa concedente classificou a barragem “B”, ou seja, categoria de risco médio e dano potencial associado médio.

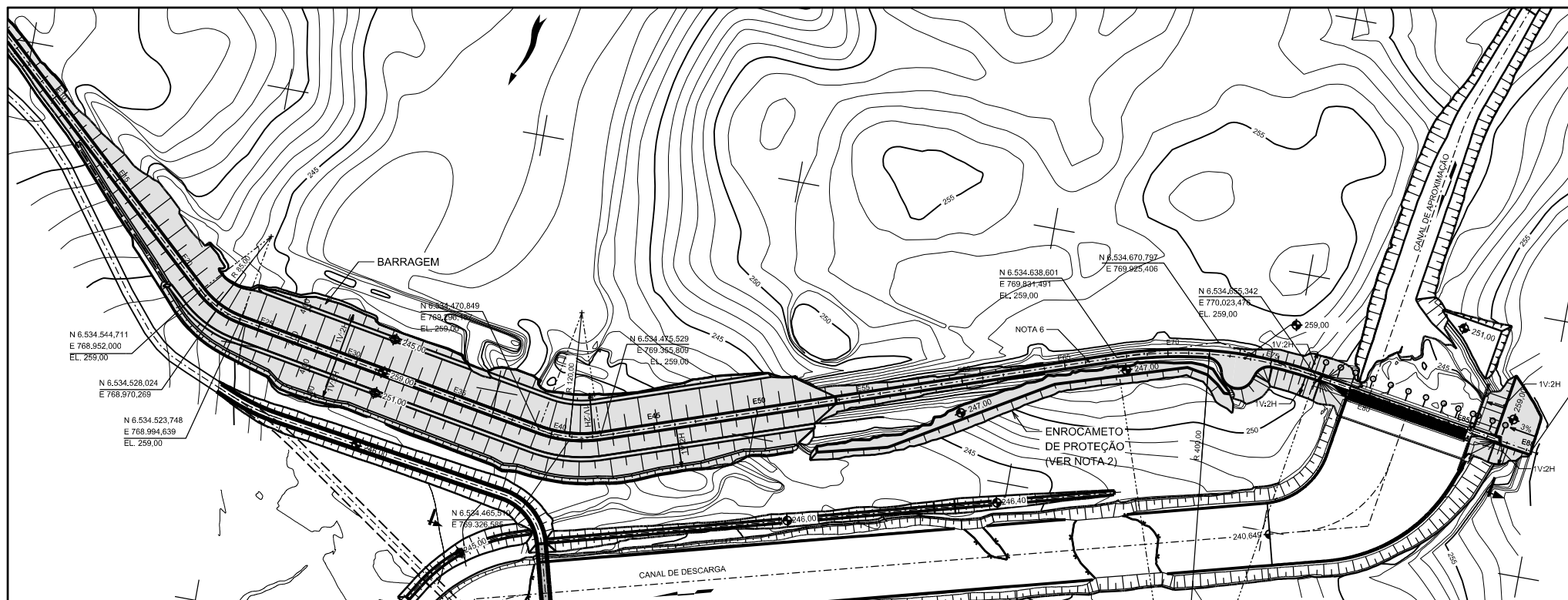
O nível d'água máximo normal de operação da barragem é na elevação 255,3 m e o nível d'água máximo *maximorum* é na elevação 257,93 m, prevendo uma borda livre de 3,7 m para a condição normal e 1,17 m para a condição excepcional de uma cheia decamilenar. A Figura 16 apresenta a planta baixa da barragem e a Figura 17 a seção típica, considerada a mais crítica, que será utilizada nos estudos.

Figura 15 – Seção típica da barragem de terra (Estaca 26+00).



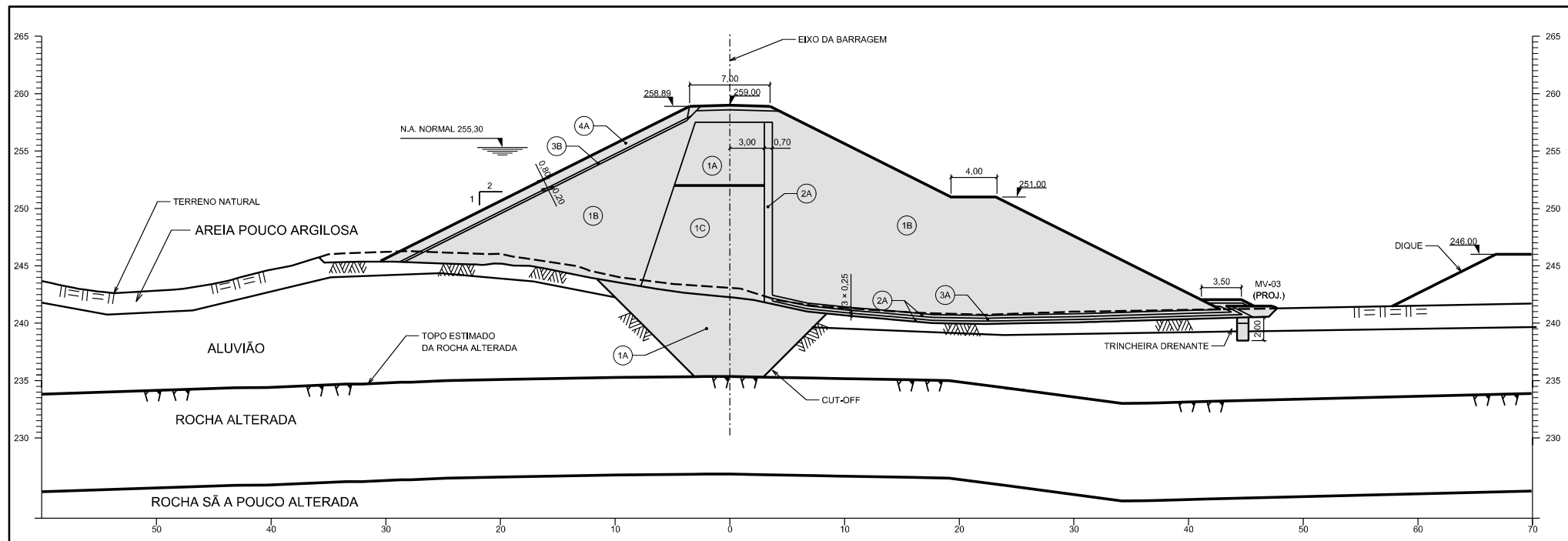
Fonte: Projeto executivo (2018).

Figura 16 – Planta baixa da barragem de terra.



Fonte: Projeto executivo (2018).

Figura 17 – Seção de análise (Estaca 39+10).



Fonte: Projeto executivo (2018).

A barragem também conta com um dreno de pé e trincheira drenante em areia, que servem para captar as vazões dos drenos internos e parte da fundação, com o objetivo de disciplinar a saída do fluxo, melhorar as condições de estabilidade do paramento de jusante e conter os materiais granulares do dreno horizontal.

3.2 Investigações geológico-geotécnicas executadas

Na região da barragem, foram executadas investigações geológico-geotécnicas, que compreenderam basicamente sondagens mistas para a caracterização do maciço de fundação das obras e investigação/identificação de pedreiras e a pesquisa de materiais naturais de construção envolvendo a execução de investigações de campo e de laboratório para identificação e caracterização dos materiais das áreas de empréstimo de solo, jazidas de areia, estoques de material pétreo e jazidas comerciais de areia e agregados.

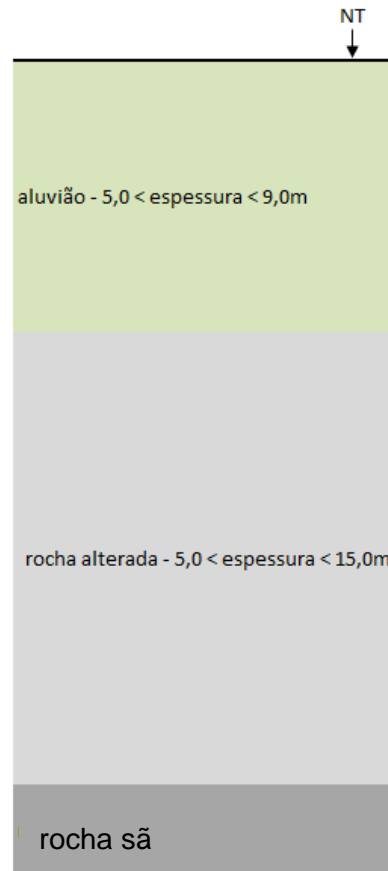
3.2.1 Parâmetros geotécnicos da fundação da barragem

A seção que será utilizada na análise desse trabalho, se caracteriza por apresentar um acamamento de solos transportados (aluviões) por vezes descritos táctil-visualmente como sendo areias médias/grossas com eventuais pedregulhos ou como argilas siltosas, por vezes arenosas, com consistência mole de coloração cinza. O acamamento apresenta espessura variando de 5,0 m a 9,0 m.

Sob essa capa de solo de deposição identifica-se uma camada de rocha alterada de granito/gnaiss (coloração amarelada) e espessura variando de a 5,0 m e 15,0 m. Ainda, e sob esse, se identifica uma camada de rocha granito/gnaiss sã com coloração variando de rosa a cinza.

Na Figura 18 é apresentado um perfil geológico-geotécnico para o trecho de fundação da barragem em questão.

Figura 18 – Perfil de solo da seção em questão.



Fonte: Projeto executivo (2018).

Conforme exposto no perfil típico, são identificados três substratos, sendo eles: solo aluvionar, rocha granítica alterada e rocha granítica sã. Para efeito de modelo de estabilidade a superfície de topo rochoso é um limitante para os possíveis círculos de ruptura. Dessa forma não são indicados parâmetros de resistência para o maciço rochoso.

Dito isto, os parâmetros de fundação que subsidiam as análises de estabilidade e fluxo, definidos conforme ensaios realizados e em referências bibliográficas, são sumariados no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 - Parâmetros dos materiais de fundação.

Material	Peso Específico (kN/m ³)	Parâmetros de Resistência		Permeabilidade	
		Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	(cm/s)	(m/s)
Aluvião	18,0	15,0	30,0	1,00E-03	1,00E-05
Rocha granítica alterada	Impenetrável	Impenetrável	Impenetrável	1,00E-04	1,00E-06
Rocha granítica sã	Impenetrável	Impenetrável	Impenetrável	1,00E-05	1,00E-07

Fonte: Projeto executivo (2018).

3.2.2 Parâmetros geotécnicos dos materiais naturais de construção

Os parâmetros dos materiais naturais de construção foram definidos tomando como base nas campanhas de investigações executadas ao longo do desenvolvimento do Projeto de Revisão e Otimização do Projeto Executivo e em etapas anteriores do projeto.

A denominação de cada um dos materiais de construção que serão utilizados no maciço da barragem são:

- Solo compactado - núcleo (residual de arenito/granito): 1A;
- Solo compactado - espaldar (residual de granito): 1B;
- Solo compactado - núcleo (residual de siltito): 1C;
- Filtro - areia natural: 2A;
- Filtro - brita graduada: 3A;
- Transição: 3B;
- Enrocamento: 4A;
- Enrocamento: 4B.

Os parâmetros que subsidiam as análises de estabilidade e fluxo, definidos conforme ensaios realizados e em referências bibliográficas, são sumariados no Quadro 5, a seguir.

Quadro 5 - Parâmetros dos materiais naturais de construção.

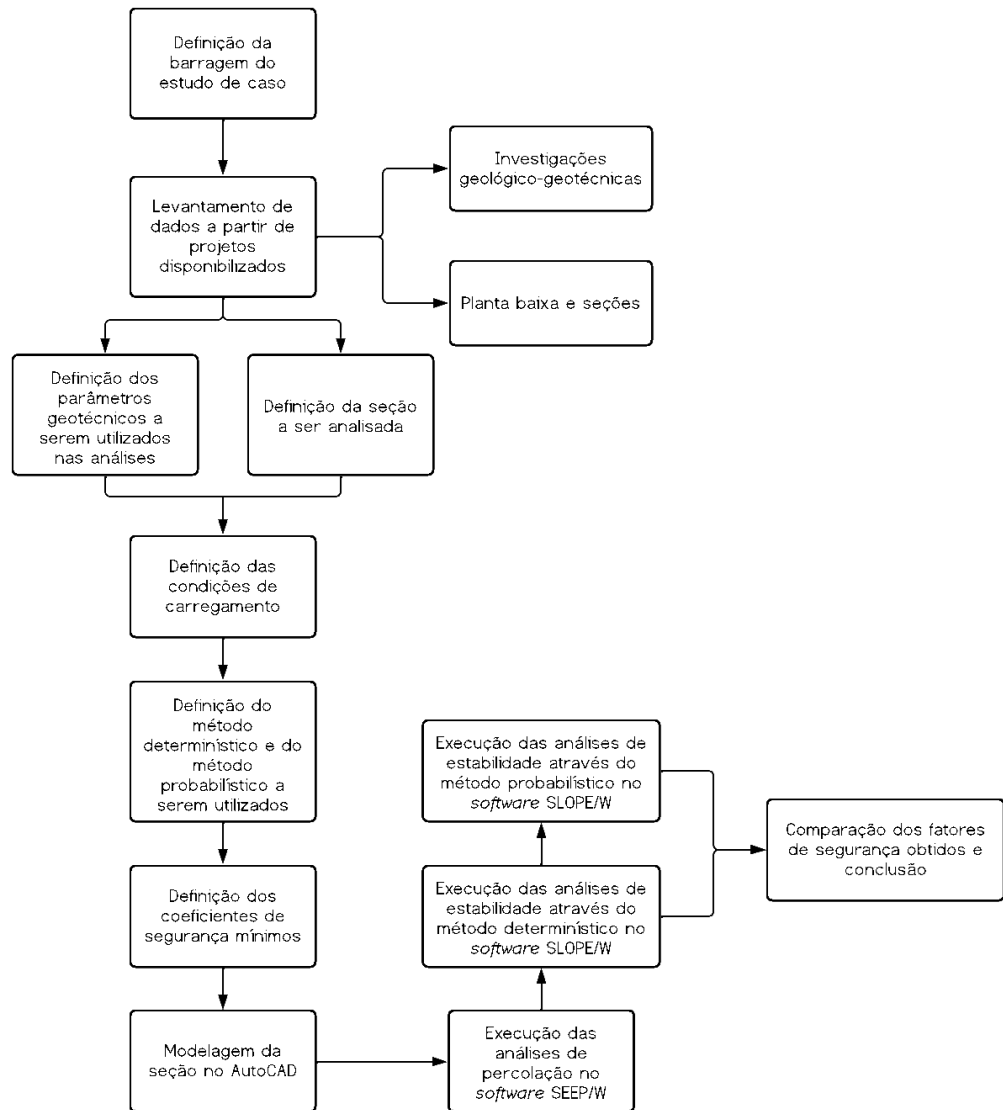
Material	Peso Específico (kN/m ³)	Parâmetros de Resistência		Permeabilidade	
		Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	(cm/s)	(m/s)
1A/1C – núcleo e “cut-off”	17,0	20,0	25,0	5,00E-07	5,00E-09
1B – espaldar	17,0	15,0	30,0	5,00E-05	5,00E-07
2A – filtro de areia	17,0	0,0	33,0	1,00E-02	1,00E-04
3A – filtro de brita	20,0	0,0	35,0	1,00E+00	1,00E-02
3B – transição	20,0	0,0	35,0	1,00E+00	1,00E-02
4A/4B - enrocamento	20,0	0,0	40,0	1,00E+01	1,00E-01

Fonte: Projeto executivo (2018).

4 METODOLOGIA

Esta seção visa apresentar as etapas e procedimentos efetuados para alcançar o objetivo geral do presente trabalho, bem como ferramentas e dados utilizados. Serão compilados os parâmetros de projeto utilizados nas análises, as premissas de cálculo, condições de contorno e demais informações utilizadas. Dito isto, a metodologia deste trabalho é entendida pelas atividades elencadas no fluxograma apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma da metodologia executada.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Conforme exposto, neste trabalho realizou-se um estudo do perfil típico de uma barragem de terra – estudo de caso, sob os diferentes cenários de carregamento: operação normal; operação com sismo; rebaixamento rápido do reservatório e elevação da linha freática. A fim de se comparar os resultados dos coeficientes de segurança, obtidos através de uma abordagem determinística e de uma abordagem probabilística.

Inicialmente, coletou-se dados pertinentes de projeto, utilizados para a definição dos parâmetros geotécnicos a serem utilizados nas análises e da seção

crítica a ser analisada, já apresentados e discutidos no item 3. Posteriormente, foram definidas as condições de carregamento e os métodos de análise, junto aos coeficientes de segurança mínimos a serem considerados para cada caso analisado. Assim, com os parâmetros definidos, foram realizadas as análises de percolação, tendo como base o método dos elementos finitos, com o auxílio do *software* SEEP/W, versão 2018, desenvolvido e distribuído pela empresa GeoStudio *International Ltda.*, licença de teste com acesso pleno a todas as ferramentas e de forma gratuita. Tendo as análises de percolação realizadas, realizou-se as análises de estabilidade.

Tratando-se da abordagem determinística, os cálculos são regidos pelo Método de Spencer, conforme recomendações da Eletrobrás (2003) e tratando-se da abordagem probabilística, empregou-se também o Método de Spencer, adicionado ao Método de Simulação de Monte Carlo, utilizado para a variação dos parâmetros geotécnicos.

Efetua-se as análises de estabilidade através da modelagem computacional, com o *software* SLOPE/W, versão 2018, desenvolvido e distribuído pela empresa GeoStudio *International Ltda.*, licença de teste com acesso pleno a todas as ferramentas e de forma gratuita. Concomitantemente, adiciona-se as variáveis aleatórias dos parâmetros geotécnicos envolvidos para a obtenção dos resultados da abordagem probabilística. Com os fatores de segurança obtidos, através dos dois métodos, foi feita uma compilação dos dados a fim de realizar a comparação entre eles.

4.1 Análises de percolação

As análises de percolação são efetuadas a fim de determinar a linha freática para os diferentes cenários de carregamento considerados neste estudo. Para isto, utiliza-se o programa computacional SEEP/W, licença de teste com acesso pleno a todas as ferramentas e de forma gratuita. Os procedimentos básicos na modelagem das análises são:

1. Importação da seção típica da barragem a ser analisada.
2. Determinação dos dados de entrada:
 - a. Geometria do maciço (definição da rede de elementos finitos);

- b. Propriedades e características dos materiais;
 - c. Condições de contorno às quais estão submetidas as faces de montante e jusante do maciço.
3. Cálculos executados através do software SEEP/W:
- a. Montagem da matriz de fluxo para cada elemento;
 - b. Montagem da matriz de fluxo total;
 - c. Introdução das condições de contorno;
 - d. Fornecimento das linhas de fluxo e das equipotenciais;
 - e. Determinação da posição da linha freática.

Os níveis do reservatório para os diferentes cenários de carregamento foram predeterminados no projeto básico, após a realização de estudos hídricos/hidráulicos, tais quais:

- a) Nível máximo normal de operação: para a **condição de operação em regime permanente e para a elevação da linha freática**, portanto considera-se o nível d'água máximo normal, na cota 255,30 m.
- b) Nível máximo *maximorum*: para a **condição de rebaixamento rápido do reservatório**, portanto considera-se o nível d'água máximo *maximorum*, na cota 257,93 m.

4.1.1 Seção de análise modelada

A modelagem da seção de análise foi realizada com base em uma das seções críticas do Projeto Executivo, conforme exposto anteriormente na Figura 17. Além disso, a modelagem teve como base o perfil geológico-geotécnico da fundação, apresentado no item 3.2.1. Os parâmetros utilizados na análise de percolação para a fundação e para o aterro da barragem foram definidos nos itens 3.2.1 e 3.2.2, respectivamente, e estão expostos no Quadro 6 a seguir.

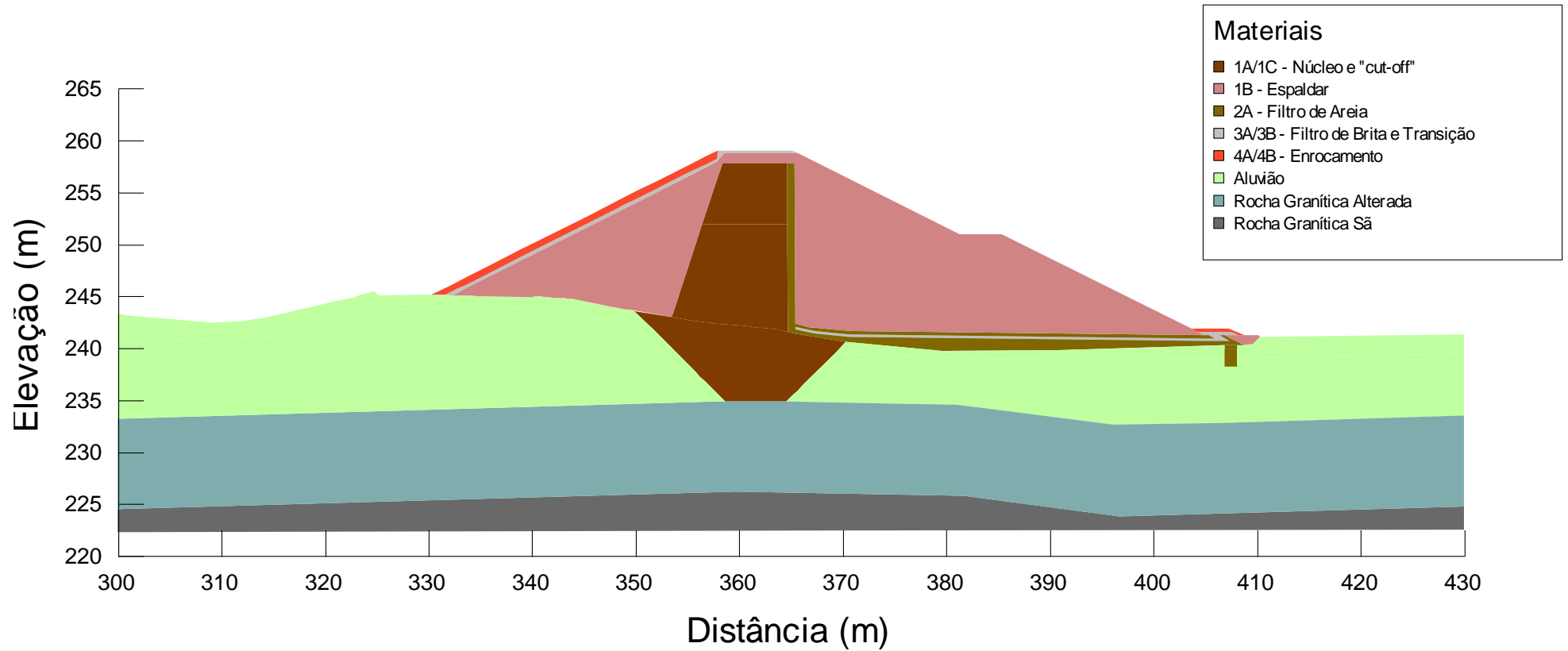
Quadro 6 – Permeabilidades adotadas nas análises de percolação.

Material	Permeabilidade (m/s)
Aluvião	1,00E-05
Rocha granítica alterada	1,00E-06
Rocha granítica sã	1,00E-07
1A/1C – núcleo e "cut-off"	5,00E-09
1B – espaldar	5,00E-07
2A – filtro de areia	1,00E-04
3A/3B – filtro de brita e transição	1,00E-02
4A/4B - enrocamento	1,00E-01

Fonte: Projeto executivo (2018).

Diante do exposto, a seção transversal foi modelada através do *software* gráfico AutoCAD 2022, versão de estudante, utilizando como referência as cotas de elevação da barragem. Posteriormente, elaborou-se o zoneamento dos materiais, a fim de delimitar as regiões dos diferentes materiais componentes da barragem. Diante disto, a seção foi exportada para o *software* SEEP/W e pode ser visualizada na Figura 20.

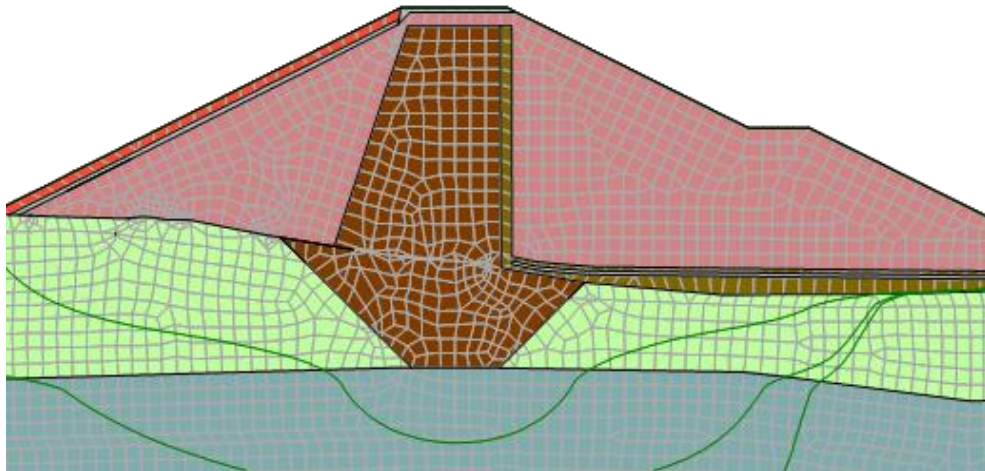
Figura 20 – Modelagem no software SEEP/W – Análise de Percolação



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Além da definição das propriedades dos materiais constituintes da barragem, a análise numérica, realizada através do método dos elementos finitos exige que seja considerada uma malha global. Neste caso, foi considerada uma malha global de elementos quadriláteros, com espaçamento constante igual a 1,0 m, a fim de trazer maior precisão às análises, conforme exposto na Figura 21.

Figura 21 – Refinamento da malha de elementos finitos



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.1.2 Análises em regime permanente

As análises em regime permanente possibilitaram verificar a segurança do barramento nas condições normais de operação, operação com sismos e elevação da linha freática. Com relação às condições de contorno aplicadas, considerou-se duas condições para executar as análises numéricas, sendo elas expostas na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de Percolação - Regime Permanente - Condições de Contorno.

Condição de Contorno	Carga (m.c.a)	Local
Carga da Pressão de água a Montante	255,30	Talude de Montante
Carga de Pressão de água a Jusante	238,21	Região a Jusante

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

A carga de pressão d'água a montante na El. 255,30 m representa o nível operacional do reservatório, e a carga de pressão de água a jusante representa o nível do lençol freático, que foi definida como na El. 238,21 m por conta da trincheira drenante existente.

Para a verificação do barramento nas condições de operação com sismos, as análises são as mesmas realizadas para o caso de operação normal do reservatório, no entanto, se considera o efeito de terremotos, com aplicação de acelerações, diretamente no *software* SLOPE/W, da ordem de 0,05 g na direção horizontal e 0,03 g na direção vertical, conforme critério estabelecido pela ELETROBRÁS (2003).

Tratando-se da condição de carregamento da elevação da linha freática, neste caso, considera-se a perda do funcionamento do sistema de drenagem, esta situação ocorre quando a drenagem interna da barragem se encontra colmatada. Dito isto, as condições expostas na Tabela 4 se mantêm nas análises, porém, o material do filtro vertical e do tapete drenante são substituídos pelo mesmo material do maciço da barragem, a fim de representar a colmatação dos dispositivos.

4.1.3 Análises em regime transiente

As análises de percolação em regime transiente permitem avaliar a situação da barragem na situação de rebaixamento rápido do reservatório, no entanto, é necessária a existência de uma análise de percolação em regime permanente.

No caso deste trabalho, a análise em regime transiente considera-se o rebaixamento do reservatório do Nível Máximo *Maximorum* EL. 257,93 m para o Nível Máximo Normal EL. 255,30 m, a análise considerou uma duração de 1 dia para que ocorra o rebaixamento total até o N.A. Máximo Normal, com resultados obtidos a cada 12 horas, conforme Figura 22.

Figura 22 – Regime Transiente - Informações

Tempo Inicial:

Duração:

Número de Etapas.:

Técnica Incremental:

Linear

Exponencial

Incremento de Tempo:

Salvar a Cada etapas

Discretização (etapas E/ou Tempos):

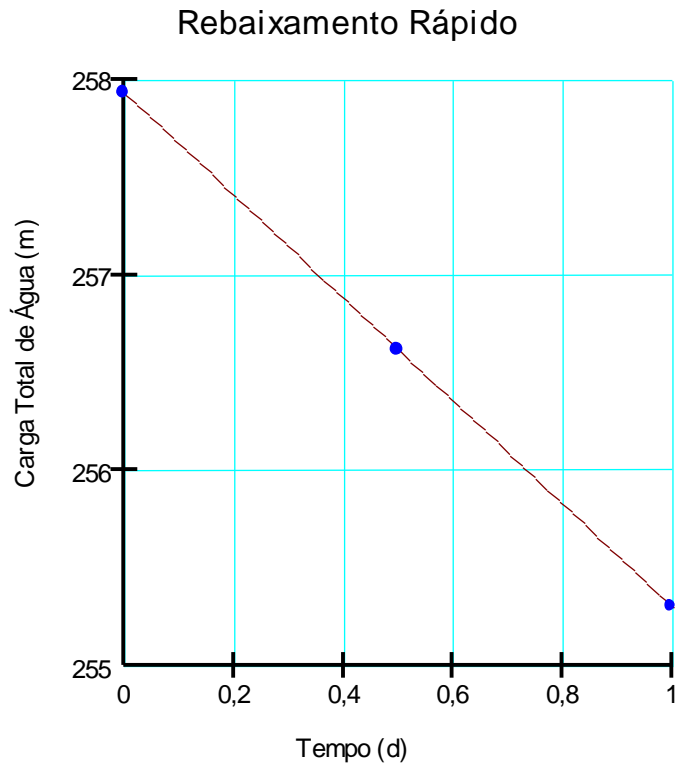
#	Incremento (d)	Decorrido (d)	Decorrido	Sal...
1	0,5	0,5	12 h	Sal...
2	0,5	1	1 Dias	Sal...

Tempos específicos (separar por ponto e vírgula).: d

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tratando-se das condições de contorno correspondente à Carga Total de Montante, foi substituída pela condição de rebaixamento do reservatório. Dito isto, aplicou-se uma função linear com um incremento de 1,315 m a cada 12 h, conforme Figura 23.

Figura 23 – Regime Transiente – Rebaixamento Rápido – Carga Total a Montante



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2 Análises de estabilidade

As análises de estabilidade foram realizadas através do Método de Spencer, com o auxílio do *software* SLOPE/W. O programa executa os cálculos de estabilidade baseados na teoria do equilíbrio limite, determinando o coeficiente de segurança dos taludes analisados. Nos estudos de estabilidade, foram consideradas as linhas freáticas obtidas em cada seção através das análises de percolação, realizadas inicialmente.

4.2.1 Condições de carregamento

A seção analisada é a mesma apresentada no estudo de percolação, conforme Figura 20. No entanto, nas análises de estabilidade, os parâmetros

necessários são os de resistência ao cisalhamento – coesão e ângulo de atrito – e peso específico.

As condições de carregamento analisadas, tanto para o método determinístico quanto para o método probabilístico, estão dispostas nos itens a seguir.

- a) Operação Normal (regime permanente): A condição de Operação Normal considera o nível de água de montante na elevação 255,30 m (N.A Máx. Normal), desconsiderando o N.A. a jusante. Para este caso, foram analisados os taludes de jusante e montante.
- b) Operação Normal com sismo (condição excepcional): Mesmas condições da análise da operação normal, porém considera-se a ação de sismo de 0,05 g horizontal e 0,03 g vertical. Para este caso, foram analisados os taludes de jusante e montante.
- c) Rebaixamento Rápido do Reservatório: Esta análise considera o rebaixamento do reservatório desde o N.A máximo *maximorum* do reservatório, para o N.A máximo normal. Para este caso, analisou-se apenas o talude de montante, pois com o rebaixamento rápido do reservatório apenas esse paramento fica numa situação crítica.
- d) Operação Excepcional – Elevação da Linha Freática: corresponde à análise em regime permanente, porém considera o mal funcionamento do sistema de drenagem interna, com uma possível colmatação dos drenos e filtros. Para este caso, analisou-se apenas o talude de jusante, pois apenas esse paramento fica numa situação crítica.

4.2.2 Coeficientes de segurança mínimos

Os coeficientes de segurança mínimos adotados, a fim de garantir a estabilidade dos taludes, foram aqueles indicados pela ELETROBRÁS (2003) e ANA (2016), conforme apresentados no item 2.5.2. A Tabela 5 apresenta os coeficientes mínimos para cada condição de carregamento analisada.

Tabela 5 – Fatores de Segurança Mínimos Adotados

Caso	Fator de Segurança
Operação Normal	1,5
Rebaixamento Rápido	1,3
Análise Sísmica	1,1
Elevação da Linha Freática	1,1

Fonte: Elaborado pela autora com base em ELETROBRÁS (2003) e ANA (2016).

4.2.3 Análise de estabilidade determinística

Nas análises de estabilidade de taludes através da abordagem determinística, os dados de entradas utilizados no *software* são os parâmetros de resistência e peso específico já definidos no item 3.2. Esses parâmetros foram compilados na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 – Parâmetros de Resistência e Peso Específico

Material	Peso Específico (kN/m³)	Parâmetros de Resistência	
		Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
Aluvião	18,0	15,0	30,0
Rocha granítica alterada	Impenetrável	Impenetrável	Impenetrável
Rocha granítica sã	Impenetrável	Impenetrável	Impenetrável
1A/1C – núcleo e "cut-off"	17,0	20,0	25,0
1B – espaldar	17,0	15,0	30,0
2A – filtro de areia	17,0	0,0	33,0
3A/3B– filtro de brita e transição	20,0	0,0	35,0
4A/4B - enrocamento	20,0	0,0	40,0

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.4 Análise de estabilidade probabilística

Para a análise de estabilidade de taludes, utilizando a abordagem probabilística, é necessário conhecer a média e o desvio padrão dos parâmetros geotécnicos das litologias analisadas na seção, para que se possa estimar a distribuição estatística destas variáveis (SILVA, 2015).

Nesse estudo, considera-se os parâmetros que apresentam uma maior variabilidade dos dados, que são os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) em maior grau, e o peso específico, em menor grau de variação. Quando se tem mais de um ensaio laboratorial para a determinação desses parâmetros, é possível calcular diretamente a média e o desvio padrão. O ideal seria um número suficiente de amostras por litotipo e classe de maciço que representasse a variabilidade dos parâmetros, mas como essa variabilidade é muito alta, torna-se inviável a realização de muitos ensaios laboratoriais (SILVA, 2015). Diante disso, os dados existentes das variáveis desse estudo são assumidos como a média, e a partir destes valores faz-se o uso da variância padrão universal para estimar os valores do desvio padrão dos parâmetros geotécnicos em questão.

A variância padrão universal definida para os principais parâmetros geotécnicos vem sendo observada por diversos pesquisadores desde meados de 1970, tais como Harr - 1984, Hidalgo - 2013 e Assis *et al.* - 2012. Através de bancos de dados de diversas localidades definiu-se coeficientes de variação padrão para os principais parâmetros geotécnicos de resistência (coesão e ângulo de atrito) e peso específico. Essa metodologia é comumente utilizada na estimativa do desvio padrão dos parâmetros quando existe uma indisponibilidade de ensaios (SILVA, 2015).

A Tabela 7 apresenta o coeficiente de variação padrão dos parâmetros de resistência e peso específico utilizados para o cálculo do desvio padrão. Ou seja, para a análise de estabilidade probabilística, utiliza-se os parâmetros geotécnicos já predefinidos anteriormente no item 3.2 e expostos na Tabela 8, considerados nesse caso como os valores médios, e aplica-se a equação (19), a fim de se conhecer o desvio padrão dos materiais.

Tabela 7 - Valores típicos do coeficiente de variação dos principais parâmetros geotécnicos.

Parâmetro	Varição	Coeficiente Adotado
Peso Específico	02 a 08	03
Coesão	20 a 80	40
Ângulo de Atrito	04 a 20	10

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

Tabela 8 – Parâmetros geotécnicos médios utilizados na abordagem de Monte Carlo.

Material	Peso Específico (kN/m ³)	Parâmetros de Resistência		Permeabilidade (m/s)
		Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	
1A/1C – núcleo e “cut-off”	17,0	20,0	25,0	5,00E-09
1B – espaldar	17,0	15,0	30,0	5,00E-07
2A – filtro de areia	17,0	0,0	33,0	1,00E-04
3A – filtro de brita	20,0	0,0	35,0	1,00E-02
3B – transição	20,0	0,0	35,0	1,00E-02
4A/4B - enrocamento	20,0	0,0	40,0	1,00E-01

Fonte: Projeto executivo (2018).

Calcula-se o desvio padrão considerando a fórmula do coeficiente de variação, dada por:

$$CV = \left(\frac{s}{\bar{X}} \right) \times 100\% \quad (19)$$

Em que,

CV Coeficiente de variação em %

s Desvio padrão amostral

\bar{X} Média aritmética

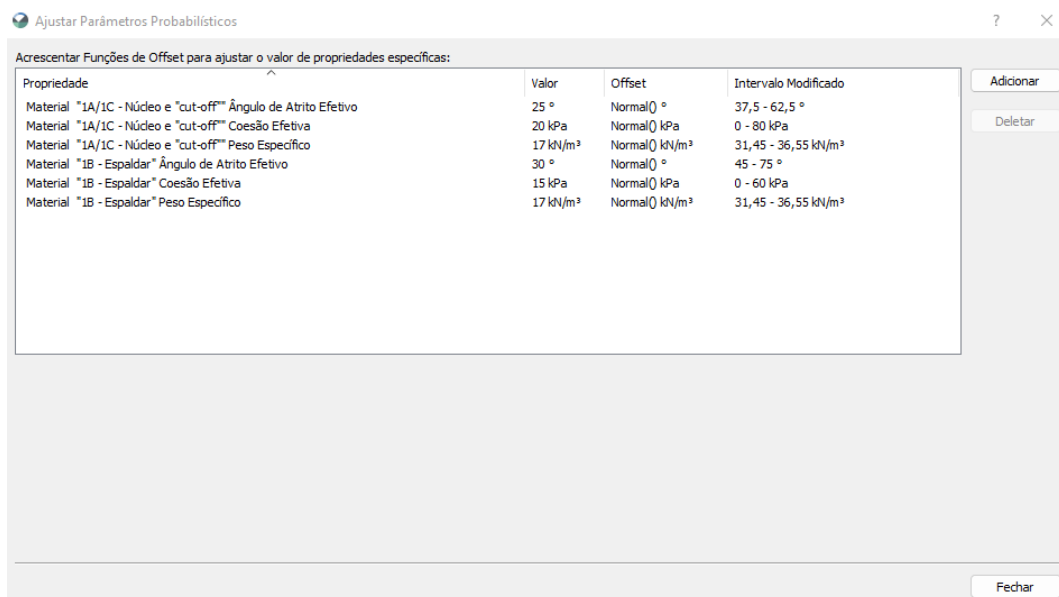
Realizando as substituições na fórmula supracitada, obtêm-se o desvio padrão dos materiais do aterro da barragem, apresentados na Tabela 9. Na abordagem probabilística, os dados de entrada no programa computacional SLOPE/W são, além dos parâmetros de resistência e peso específico, o desvio padrão desses materiais, conforme Figura 24.

Tabela 9 - Desvio padrão dos parâmetros analisados na seção a partir da covariância padrão.

Material	Peso Específico [kN/m ³]	Coesão [kPa]	Ângulo de Atrito [°]
1A/1C – núcleo e "cut-off"	±0,51	±8,00	±2,50
1B – espaldar	±0,51	±6,00	±3,00
2A – filtro de areia	±0,51	-	±3,30
3A/3B – filtro de brita e transição	±0,60	-	±3,50
4A/4B - enrocamento	±0,60	-	±4,00

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Figura 24 - Parâmetros Probabilísticos



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

No método de Monte Carlo, a distribuição probabilística da variável dependente (fator de segurança), pode ser obtida pelas distribuições estatísticas das variáveis aleatórias independentes, permitindo o cálculo da probabilidade de falha (SILVA, 2015).

Neste caso, realizou-se a análise probabilística pelo método de Monte Carlo, com o auxílio do *software* SLOPE/W, configurado com a distribuição probabilística dos parâmetros. A premissa de cálculo adotada para as análises foi a de Spencer, a fim de comparar com os resultados obtidos a partir da análise determinística.

No *software*, além dos parâmetros geotécnicos e desvio padrão dos materiais, é necessário também adicionar o número de simulações de Monte Carlo. O número de simulações de Monte Carlo é a quantidade de vezes necessárias para que a distribuição de probabilidade da variável dependente esteja estabilizada. Segundo Harr (1987), o número de simulações requerida pelo método depende do nível de confiança admitido para o estudo, e é dado pela Equação (20).

$$N = \left(\frac{h_{\partial/2}^2}{4(1 - \varepsilon)^2} \right)^m \quad (20)$$

Em que,

- N Número de tentativas requeridas pelo método
- $h_{\partial/2}$ Desvio padrão normal correspondente ao nível de confiança
- ε Nível de confiança desejado
- m Número de variáveis aleatórias de entrada

Tabela 10 - Coeficiente de confiança para a distribuição normal.

Nível de confiança (%)	$h_{\partial/2}$
85	1,44

Nível de confiança (%)	$h_{\alpha/2}$
90	1,64
95	1,96
95,45	2,00
98	2,33
99	2,58
99,5	2,81
99,73	3,00
99,9	3,29
99,99	3,89
99,994	4,00

Fonte: Modificado de Harr (1987).

Substituindo os valores, e considerando um nível de confiança de 85%, têm-se:

$$N = \left(\frac{1,44}{4(1 - 0,85)^2} \right)^6 \cong 150.000.000,00$$

Conforme observado na Tabela 9, somente os solos residuais apresentam um desvio padrão para a coesão, visto que os outros materiais são considerados não coesivos. Como esses materiais são constituintes de filtros, enrocamentos e transições, nesse estudo considera-se apenas a variação dos materiais de construção da barragem em si (solo residual de arenito/siltito e solo residual de granito), passando assim o número de variáveis aleatórias (m) para 2. Recalcula-se então o número de interações de Monte Carlo:

$$N = \left(\frac{1,44}{4(1 - 0,85)^2} \right)^2 \cong 530.000,00$$

No entanto, de acordo com GEO-STUDIO (2020), para um nível confiável de 100% seria necessário um número infinito de tentativas. Na maioria dos casos, a solução dada pelo programa não é muito sensível ao entrar na casa de milhares de tentativas executadas. Dito isso, neste estudo foram considerados na aplicação do *software* um número de tentativas igual a 1.000. Destaca-se que, a diminuição não interfere tanto com os resultados nesse caso, visto que o *software* perde a sensibilidade ao usar um número superior.

Outra justificativa para a diminuição do número de tentativas é o tempo para o cálculo de cada cenário de carregamento. Para a realização de cada cenário, o tempo total de cálculo pelo programa SLOPE/W foi de cerca de 8 horas, considerando este número de tentativas.

As condições de carregamento consideradas nas análises probabilísticas foram as mesmas consideradas nas análises determinísticas, e expostas no item 4.2.1.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

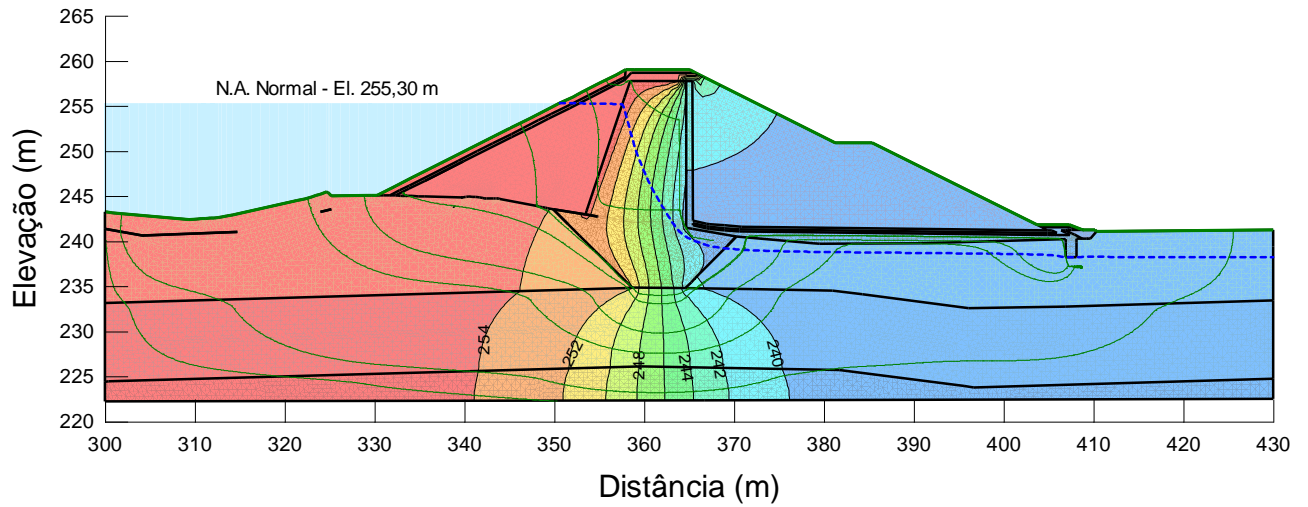
Esta seção apresenta os resultados obtidos para as análises determinísticas e probabilísticas da barragem estudada, conforme metodologia exposta no item 4.

5.1 Análises de percolação

Com base nas premissas detalhadas no item 4.1.2, apresenta-se a seguir os resultados obtidos nas análises de percolação para os diferentes cenários de carregamento, com o auxílio do *software* SEEP/W.

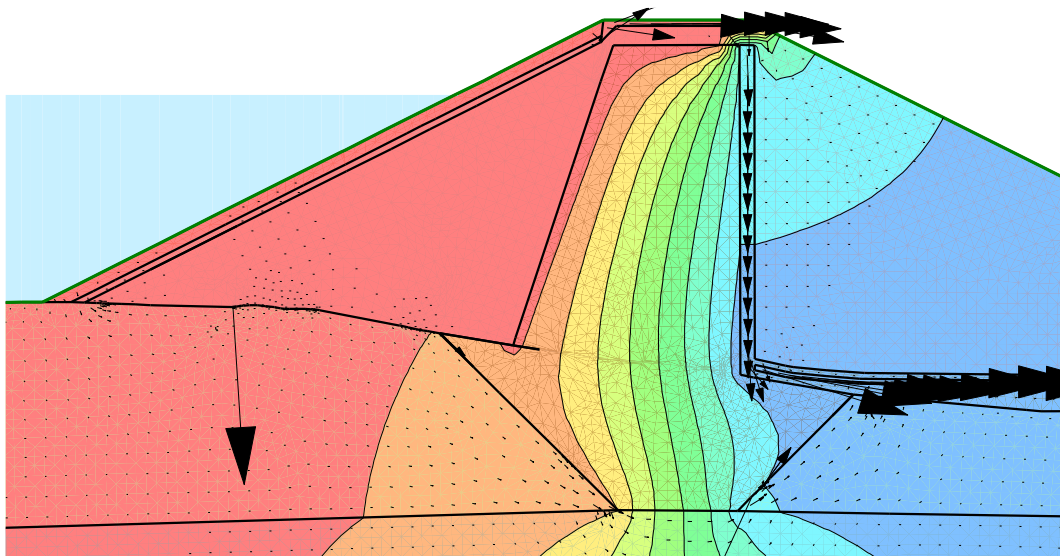
Na Figura 25 é apresentado o resultado para a análise de percolação considerando a operação normal do reservatório, na El. 255,30 m. São apresentadas as linhas de fluxo para o modelo gerado, as isolinhas estão representadas em verde e a linha freática no interior do maciço em linha azul tracejada. Além disso, as linhas equipotenciais (em preto) com a identificação da cota piezométrica. A Figura 26 mostra o fluxo de água pela fundação da barragem, na região abaixo do *cut-off* e pelo filtro vertical.

Figura 25 - Análise de Percolação – Operação Normal – N.A Normal



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 26 - Análise de Percolação – Fluxo de água

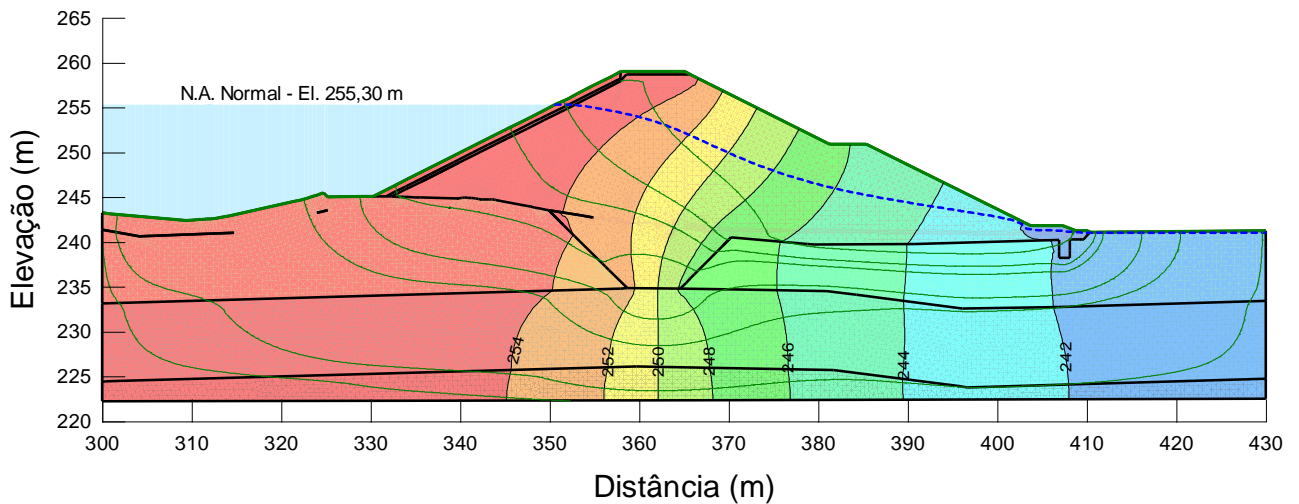


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Pode-se observar na Figura 25, a diminuição da linha freática no núcleo da barragem, conforme esperado. Além disso, as linhas de fluxo no interior da barragem percorrem paralelamente ao sistema de drenagem interna da barragem, em direção a trincheira drenante, indicando um sistema de drenagem eficiente.

Com relação à condição de carregamento correspondente a elevação da linha freática, ocasionada pela colmatação dos dispositivos de drenagem, o resultado da análise encontra-se na Figura 27.

Figura 27 - Análise de Percolação – Operação Excepcional – Elevação da Linha Freática

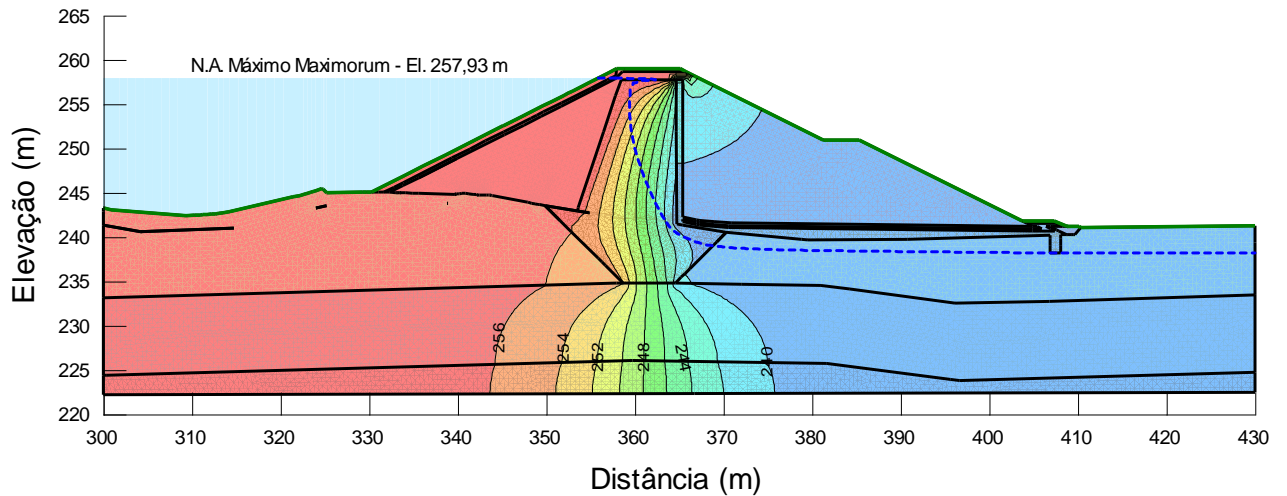


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Neste caso, sem a atuação dos dispositivos de drenagem da barragem, nota-se a elevação da linha freática no interior do maciço, com aumento das poropressões atuantes.

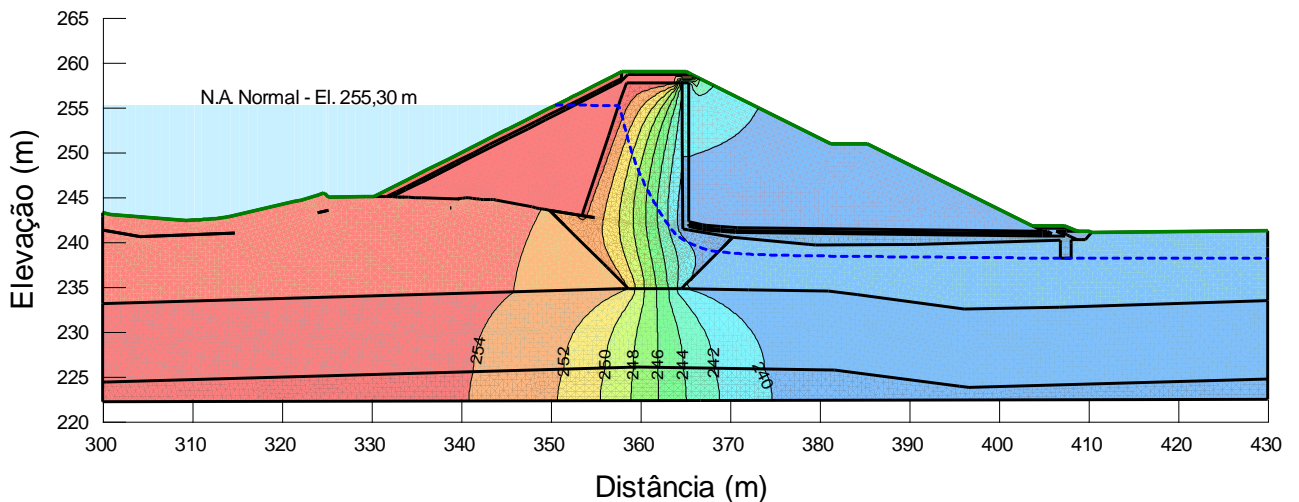
As análises transientes efetuadas permitiram observar a variação da linha freática conforme ocorre o esvaziamento do reservatório. A Figura 28 e a Figura 29 apresentam a situação de percolação após decorridos 0 (zero) horas e 24 (vinte e quatro) horas, respectivamente.

Figura 28 - Análise de Percolação – Regime Transiente – 0 horas



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 29 - Análise de Percolação – Regime Transiente – 24 horas



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Conforme resultados apresentados, o rebaixamento rápido do reservatório nesta situação causa uma redução da linha freática no maciço da barragem e, conseqüentemente, a diminuição da linha piezométrica conforme a redução do reservatório. Como o rebaixamento simulado é de baixa magnitude, apesar de o considerar em apenas 24 horas, a maior diferença notada, além da mudança da linha freática (linha tracejada em azul) é na linha equipotencial (em preto) 254,0 m, onde no

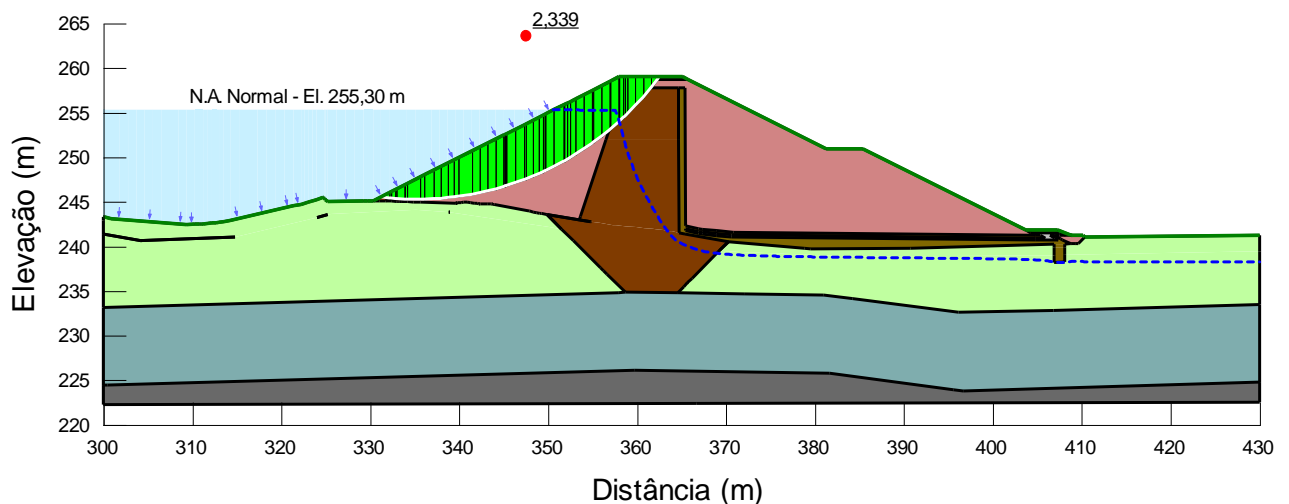
início do rebaixamento rápido encontrava-se mais a jusante, na distância de aproximadamente 342,0 m e ao passar das 24 horas encontra-se na distância de aproximadamente 340,0 m.

5.2 Análises de estabilidade determinísticas

Neste item serão expostos os resultados, para cada cenário de carregamento, das análises de estabilidade pela abordagem determinística, realizadas conforme premissas expostas no item 4.2.3

Tratando-se do reservatório em sua operação normal, foi analisado o talude de montante (Figura 30) e o talude de jusante (Figura 31). Analisando-se o talude de montante em operação normal do reservatório, o fator de segurança obtido foi de 2,339 e quanto ao talude de jusante, o fator de segurança obtido foi igual a 2,027. Considerando o fator de segurança mínimo estabelecido no item 4.2.2, na condição de operação normal de operação o barramento está seguro.

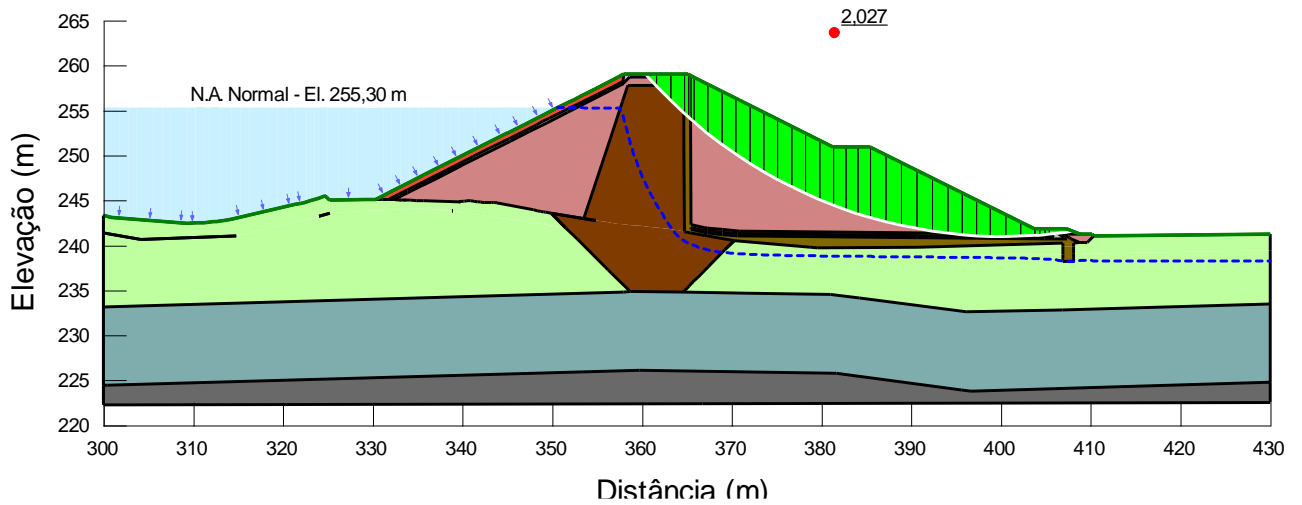
Figura 30 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Operação Normal



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Analisando a cunha de ruptura crítica obtida nessa análise, exposta na Figura 30, nota-se que ela ocupa boa parte da extensão da crista do barramento, nesta seção, passando pelo núcleo e espaldar da barragem, não adentrando a fundação e nem o sistema de drenagem interna.

Figura 31 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Operação Normal

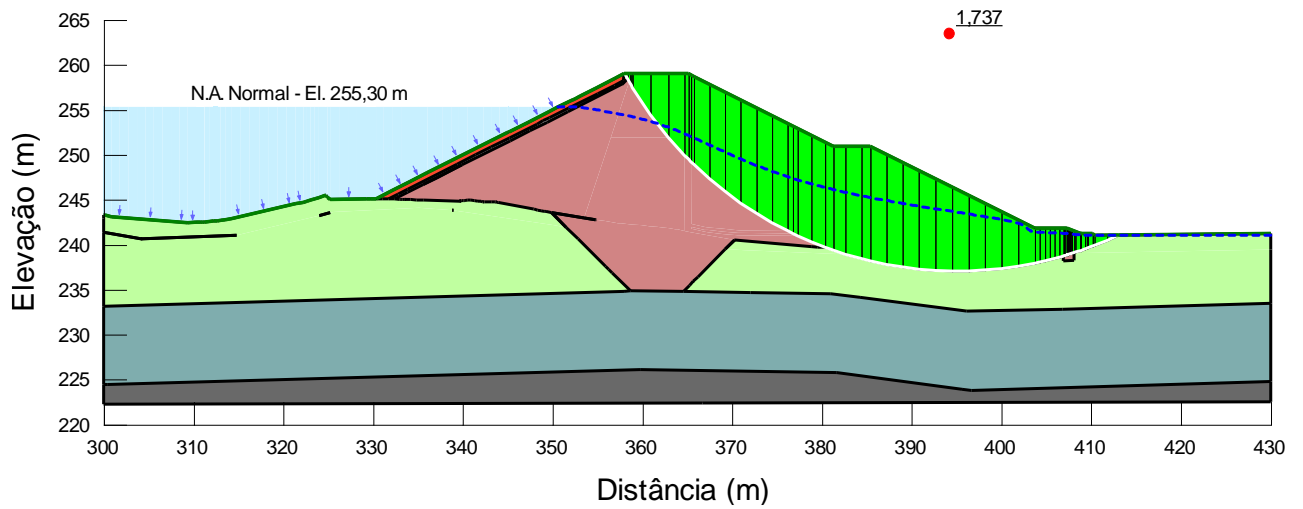


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Analisando a cunha de ruptura crítica obtida no talude de jusante na operação normal, exposta na Figura 31, nota-se que ela possui uma extensão similar à obtida no talude de montante, passando pelo núcleo e espaldar da barragem e não atingindo a fundação. No entanto, neste caso, atinge uma pequena extensão da drenagem interna.

Considerando uma condição excepcional, onde simula-se a colmatagem do sistema de drenagem da barragem, causando uma elevação da linha freática, analisou-se o talude de montante, o resultado está exposto na Figura 32. O fator de segurança obtido nesse caso é igual a 1,737, satisfazendo o F.S. mínimo exigido para a condição excepcional de 1,100.

Figura 32 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Elevação da Linha Freática

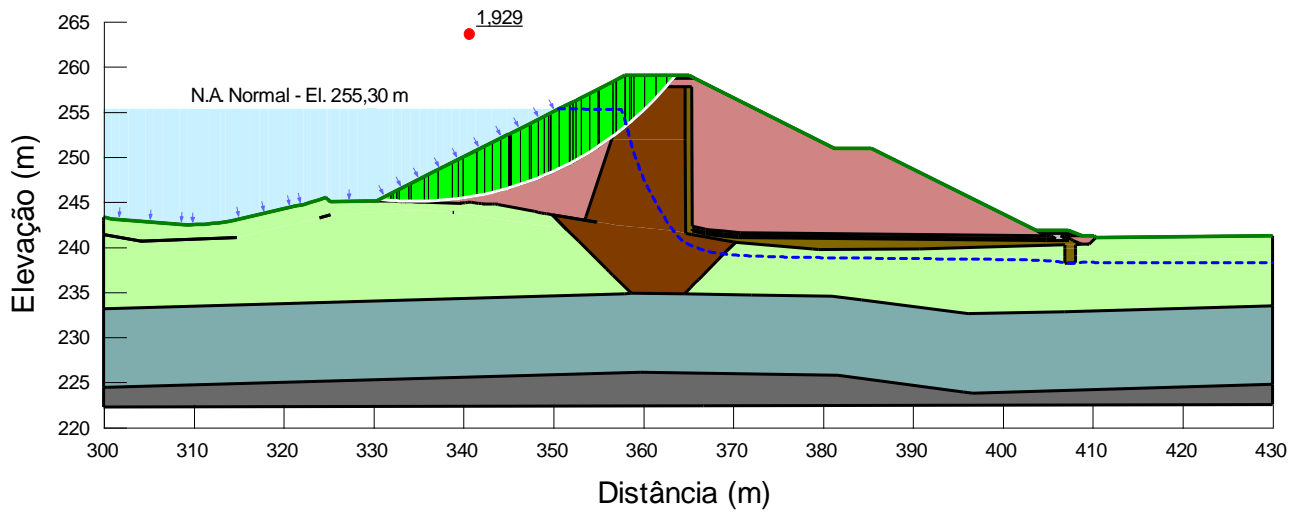


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

A cunha crítica de ruptura obtida através do cenário hipotético de elevação da linha freática, Figura 32, nota-se que a extensão é relativamente maior do que a obtida na Figura 31. Neste caso a cunha atinge toda a extensão da crista da barragem, nesta seção, além disso, atinge uma extensão da primeira camada da fundação, no material aluvião.

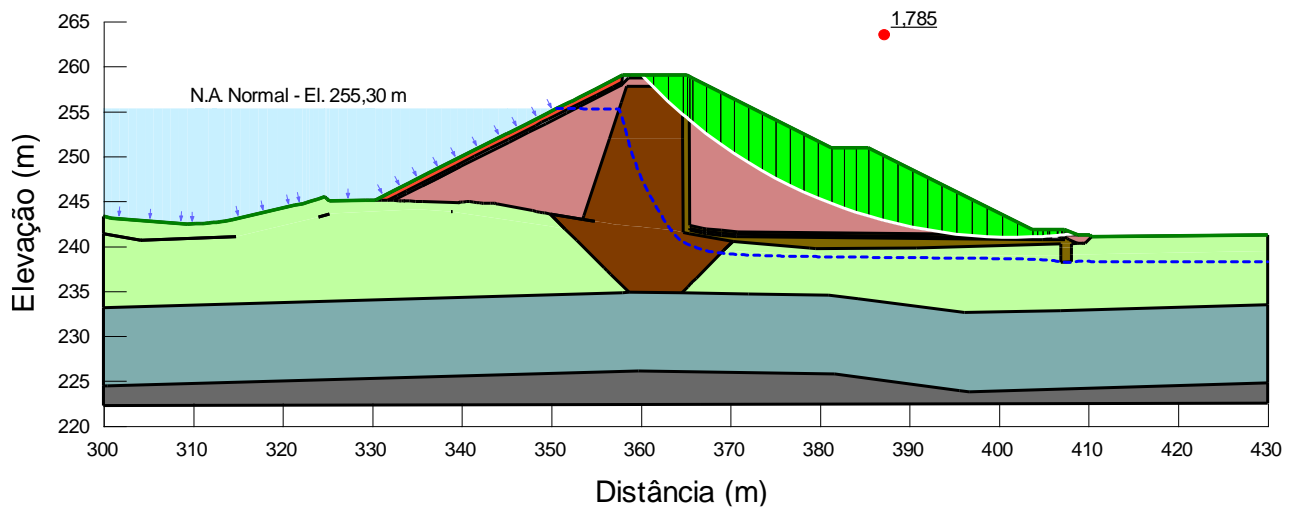
Para avaliar a segurança da barragem considerando a ocorrência de sismos, analisou-se o talude de montante e o talude de jusante, Figura 33 e Figura 34, respectivamente. Como o F.S mínimo exigido nessa condição é de 1,000, o barramento é considerado seguro.

Figura 33 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Análise Sísmica



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 34 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Análise Sísmica



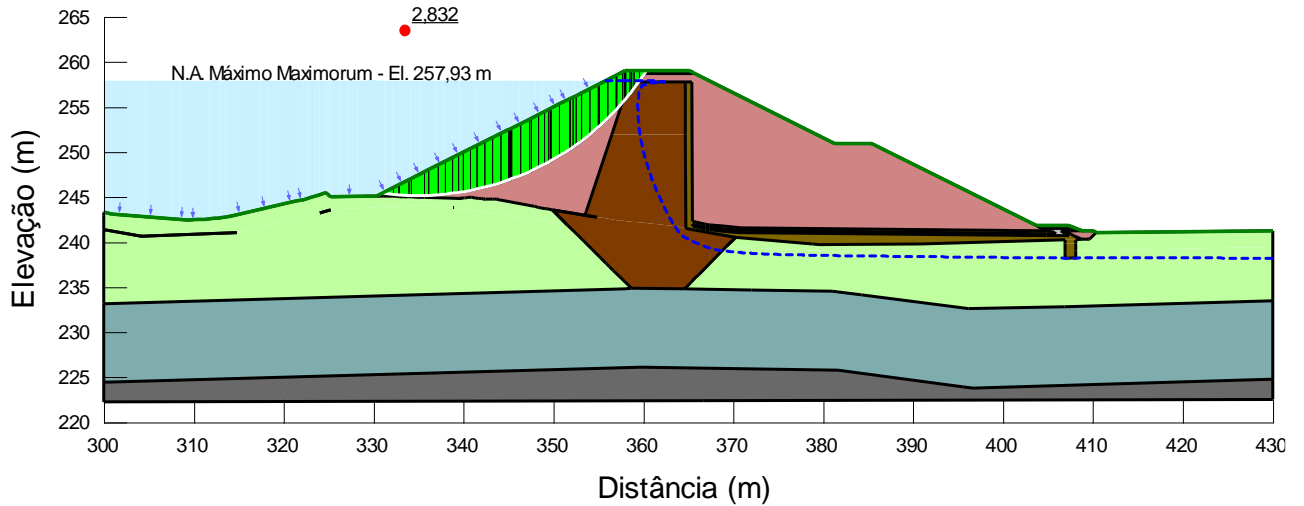
Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

A cunha de ruptura crítica obtida na simulação sísmica para o talude de montante (Figura 33) e para o talude de jusante (Figura 34) possuem extensão similares. Ambas atingem o núcleo e espaldar da barragem, sem atingir o material de fundação.

Considerando o rebaixamento rápido do reservatório em 24 horas, analisou-se o talude de montante, a Figura 35 contém o resultado para 0 (zero) horas

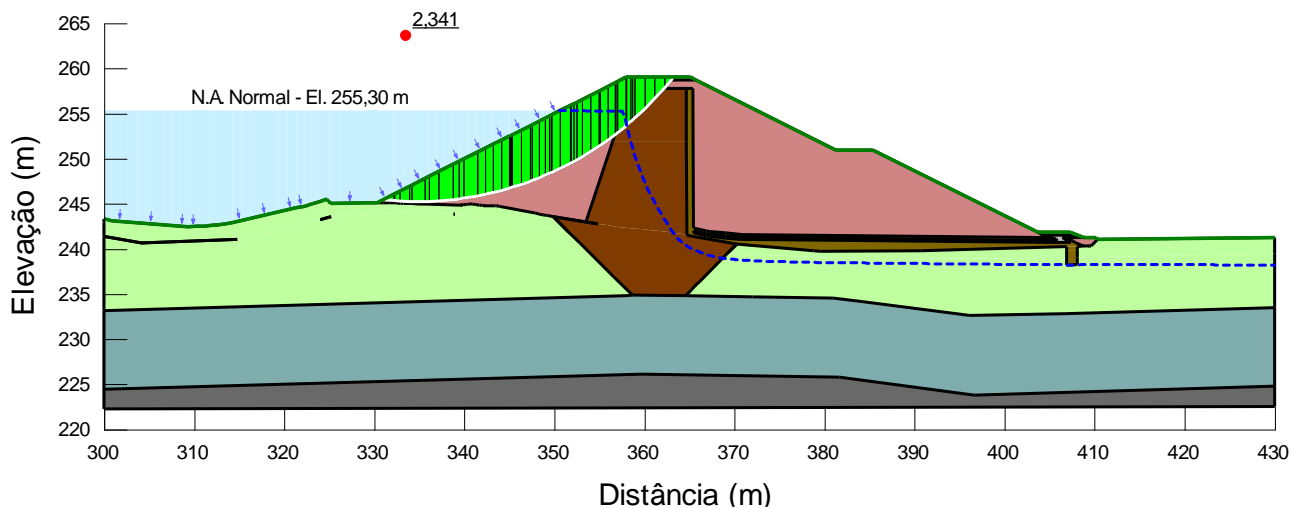
e a Figura 36 para o final do rebaixamento. Observa-se a diminuição do fator de segurança conforme o reservatório vai rebaixando. No entanto, os três fatores de segurança obtidos estão dentro da normalidade.

Figura 35 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 0 horas



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 36 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 24 horas



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Ao observar as cunhas de rupturas obtidas no início (Figura 35) e final do rebaixamento rápido (Figura 36) nota-se a similaridade entre ambas. Nos dois casos a cunha atinge uma pequena proporção do núcleo da barragem, espaldar e não atinge a fundação.

Todos os fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade determinística estão expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Compilação dos Fatores de Segurança - Análises Determinísticas

Condição de Carregamento	Talude	F.S Mínimo	F.S. Resultante
Operação Normal	Montante	1,500	2,339
	Jusante		2,027
Elevação da Linha Freática	Jusante	1,100	1,737
Análise Sísmica	Montante	1,100	1,929
	Jusante		1,785
Rebaixamento Rápido	Montante (0 horas)	1,300	2,832
	Montante (24 horas)		2,341

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

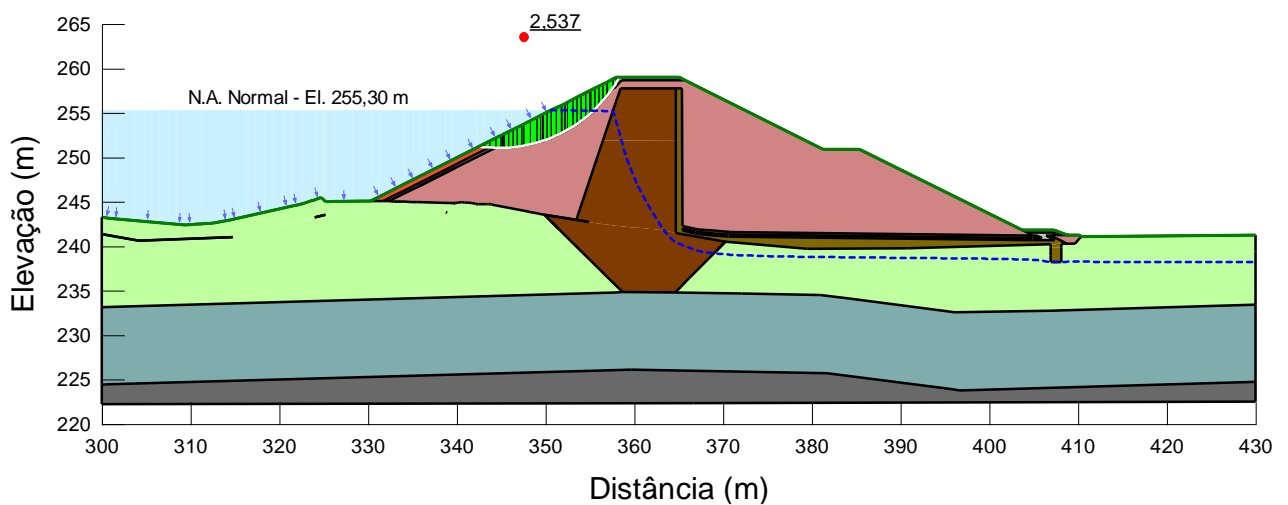
Analisando os dados expostos na Tabela 11, conclui-se que a barragem em estudo é considerada segura para todas as condições de carregamento. No entanto, como uma abordagem determinística não traz informações referentes a confiabilidade dos dados e nem considera a possível variabilidade dos parâmetros geotécnicos componentes da barragem, opta-se pela segunda verificação de segurança através da abordagem probabilística.

5.3 Análises de estabilidade probabilísticas

Neste item serão expostos os resultados, para cada cenário de carregamento, das análises de estabilidade pela abordagem probabilística, realizadas conforme premissas expostas no item 4.2.4.

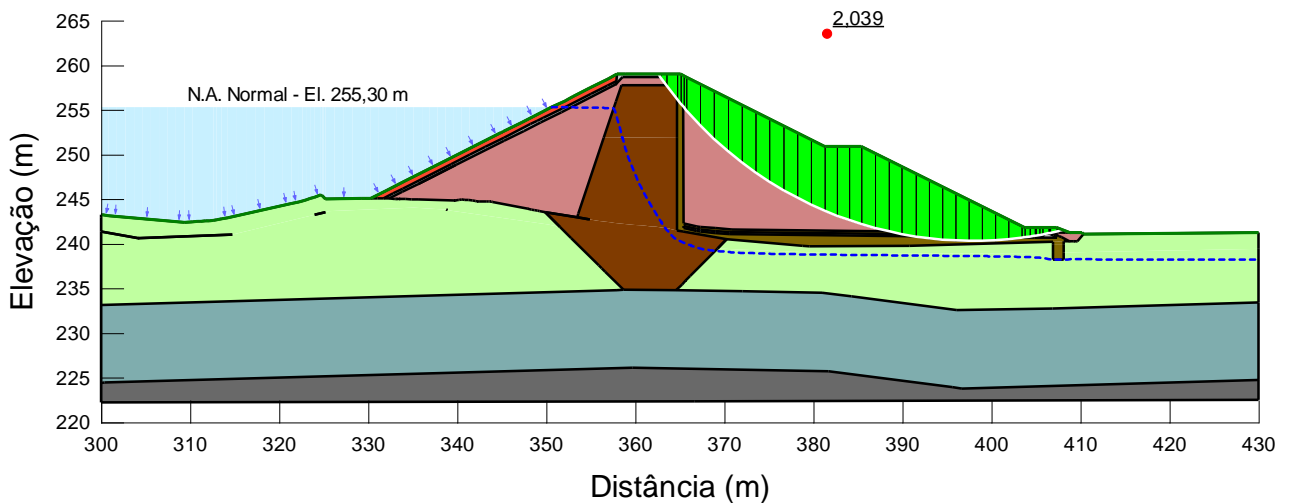
Tratando-se do reservatório em sua operação normal, analisou-se o talude de montante (Figura 30) e o talude de jusante (Figura 31). Analisando o talude de montante em operação normal do reservatório, o fator de segurança obtido foi de 2,537 e quanto ao talude de jusante, o fator de segurança obtido foi igual a 2,039. Considerando o fator de segurança mínimo estabelecido no item 4.2.2, na condição de operação normal de operação o barramento está seguro.

Figura 37 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Operação Normal



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 38 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Jusante – Operação Normal

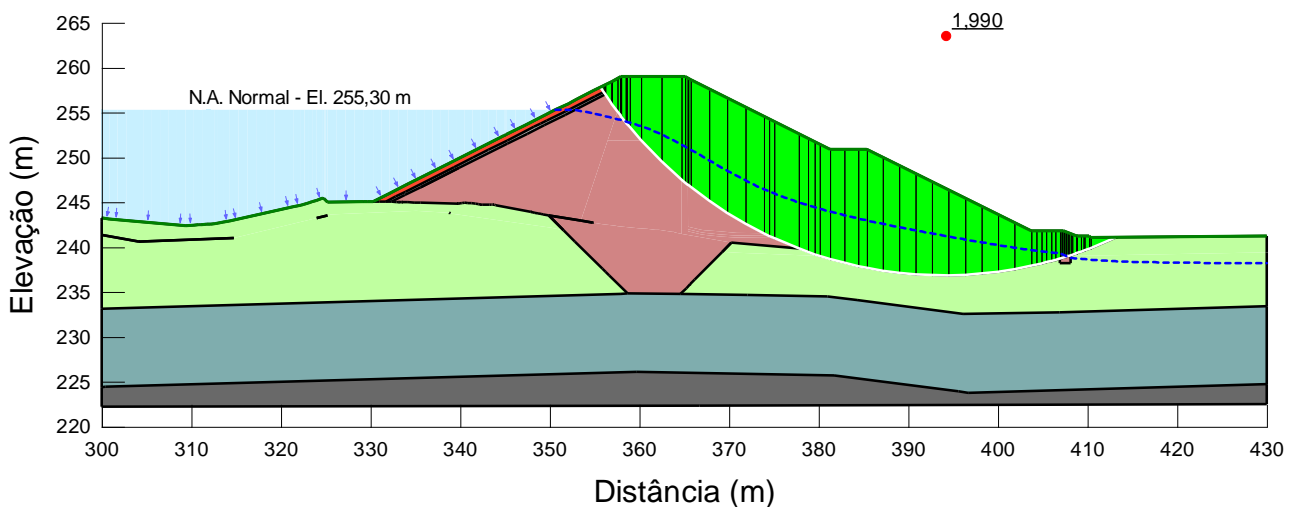


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

A cunha de ruptura obtida na análise probabilística para a operação normal no talude de jusante difere-se da obtida através da análise determinística. Observa-se que o raio resultante é relativamente menor e a cunha não atinge o núcleo do barramento, além disso, a crista não é atingida, apenas o material de proteção. Já a cunha obtida para o talude de montante é similar ao obtido na análise determinística, abrangendo o núcleo e espaldar da barragem, sem atingir a fundação.

Considerando uma condição excepcional, onde simula-se a colmatagem do sistema de drenagem da barragem, causando uma elevação da linha freática, analisou-se o talude de montante, o resultado está exposto na Figura 32. O fator de segurança obtido nesse caso é igual a 1,990, satisfazendo o F.S. mínimo exigido pela Eletrobrás (2003) para a condição excepcional de 1,100.

Figura 39 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Jusante – Elevação da Linha Freática

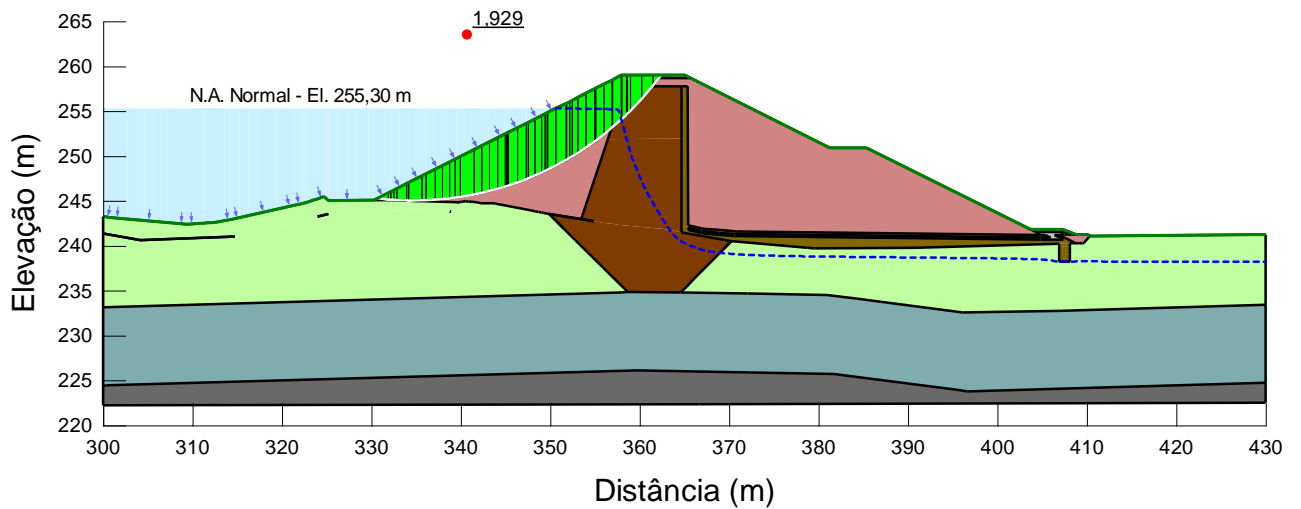


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Na condição de elevação da linha freática, conforme observado na Figura 39, a cunha de ruptura obtida atinge uma grande proporção do barramento. Todo o talude de montante seria afetado, inclusive uma parte da camada de aluvião da fundação. Além disso, uma parte do talude de jusante também foi contabilizado na geração da cunha de ruptura.

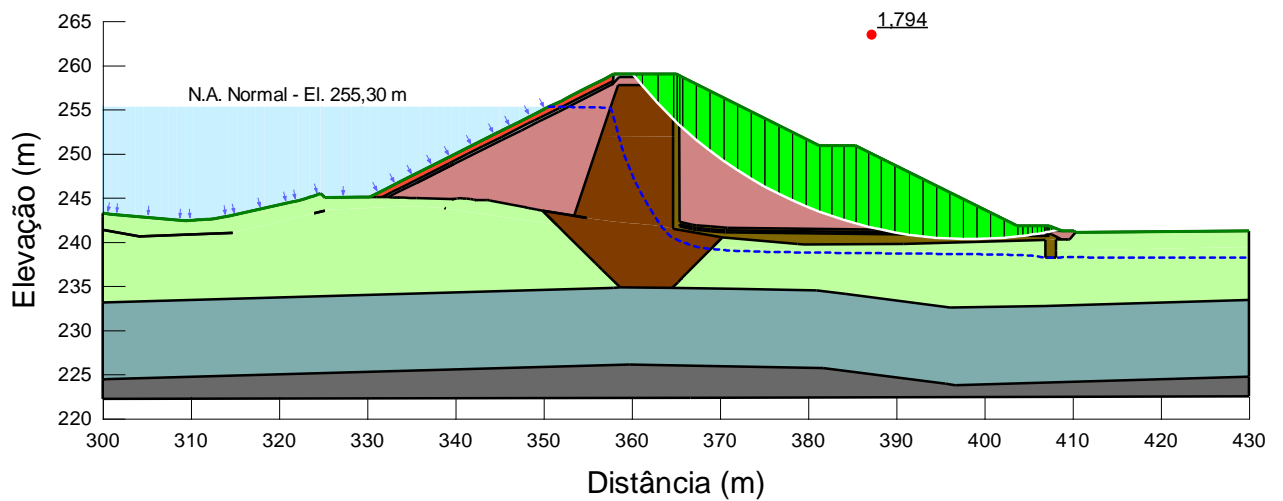
Para avaliar a segurança da barragem considerando a ocorrência de sismos, analisou-se o talude de montante e o talude de jusante, Figura 33 e Figura 34, respectivamente. Como o F.S mínimo exigido pela Eletrobrás (2003) nessa condição é de 1,000, o barramento é considerado seguro, visto que os FS resultantes foram de 1,929 e 1,794.

Figura 40 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Análise Sísmica



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 41 - Análise de Estabilidade Determinística – Talude de Jusante – Análise Sísmica

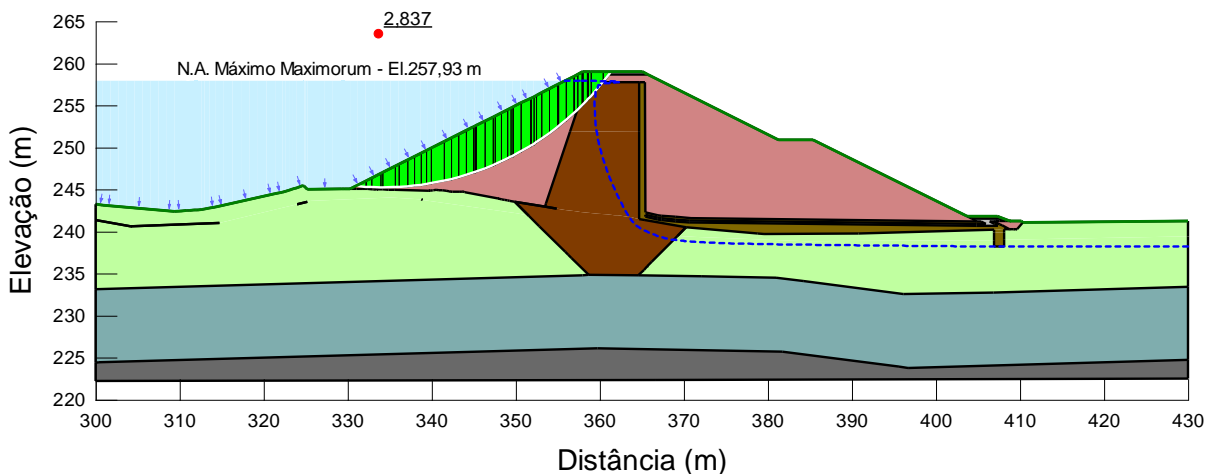


Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

As cunhas críticas de ruptura obtidas nas análises sísmicas probabilísticas foram similares as obtidas nas análises determinísticas. Em ambos os taludes, conforme observado na Figura 40 e Figura 41, a cunha atinge o material do núcleo e espaldar da barragem, além das proteções existentes no talude de jusante, sem atingir a fundação.

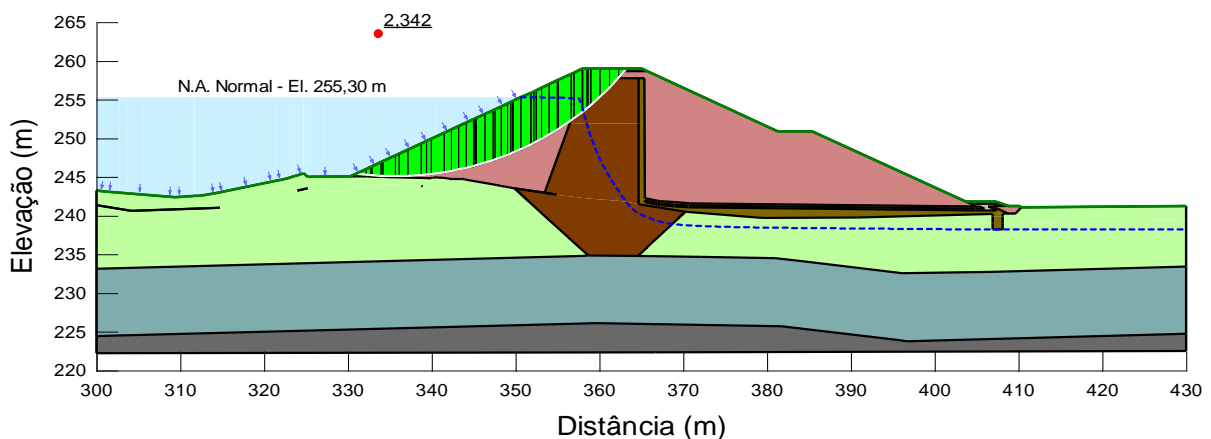
Considerando o rebaixamento rápido do reservatório em 24 horas, analisou-se o talude de montante, a Figura 35 contém o resultado para 0 (zero) horas e a Figura 36 para o final do rebaixamento. Observa-se a diminuição do fator de segurança conforme o reservatório vai rebaixando. No entanto, os três fatores de segurança obtidos estão dentro da normalidade.

Figura 42 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 0 horas



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Figura 43 - Análise de Estabilidade Probabilística – Talude de Montante – Rebaixamento Rápido – 24 horas



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Os materiais presentes nas cunhas de ruptura obtidas no início e no final do rebaixamento rápido são os mesmos: núcleo, espaldar e proteção do talude de jusante, sem atingir a fundação.

Todos os fatores de segurança, índices de confiabilidade e probabilidade de ruptura obtidos nas análises de estabilidade probabilística estão expostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Compilação dos Fatores de Segurança - Análises Probabilísticas

Condição de Carregamento	Talude	F.S. Mínimo	F.S. Resultante	Índice de Confiabilidade	Probabilidade de Ruptura
Operação Normal	Montante	1,500	2,537	7,999	0
	Jusante		2,039	7,996	0
Elevação da Linha Freática	Jusante	1,100	1,990	9,072	0
Análise Sísmica	Montante	1,100	1,929	7,935	0
	Jusante		1,794	7,5466	0
Rebaixamento Rápido	Montante (0 horas)	1,300	2,837	8,062	0
	Montante (24 horas)		2,342	8,437	0

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Conforme observado na Tabela 12, todos os fatores de segurança deram acima do valor mínimo estabelecido. A probabilidade de falha em todos os cenários de carregamento foi nula. Este valor é considerado 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} . Isso significa que a probabilidade de o fator de segurança menor do que 1,0 é muito baixa.

De acordo com U.S. Army Corps of Engineers (1997), exposto no Quadro 3, o nível de desempenho de segurança do barramento é considerado alto, para todos os cenários analisados nesse estudo, visto que o índice de confiabilidade maior do que 5,0 em todos os resultados obtidos.

5.4 Comparação dos resultados

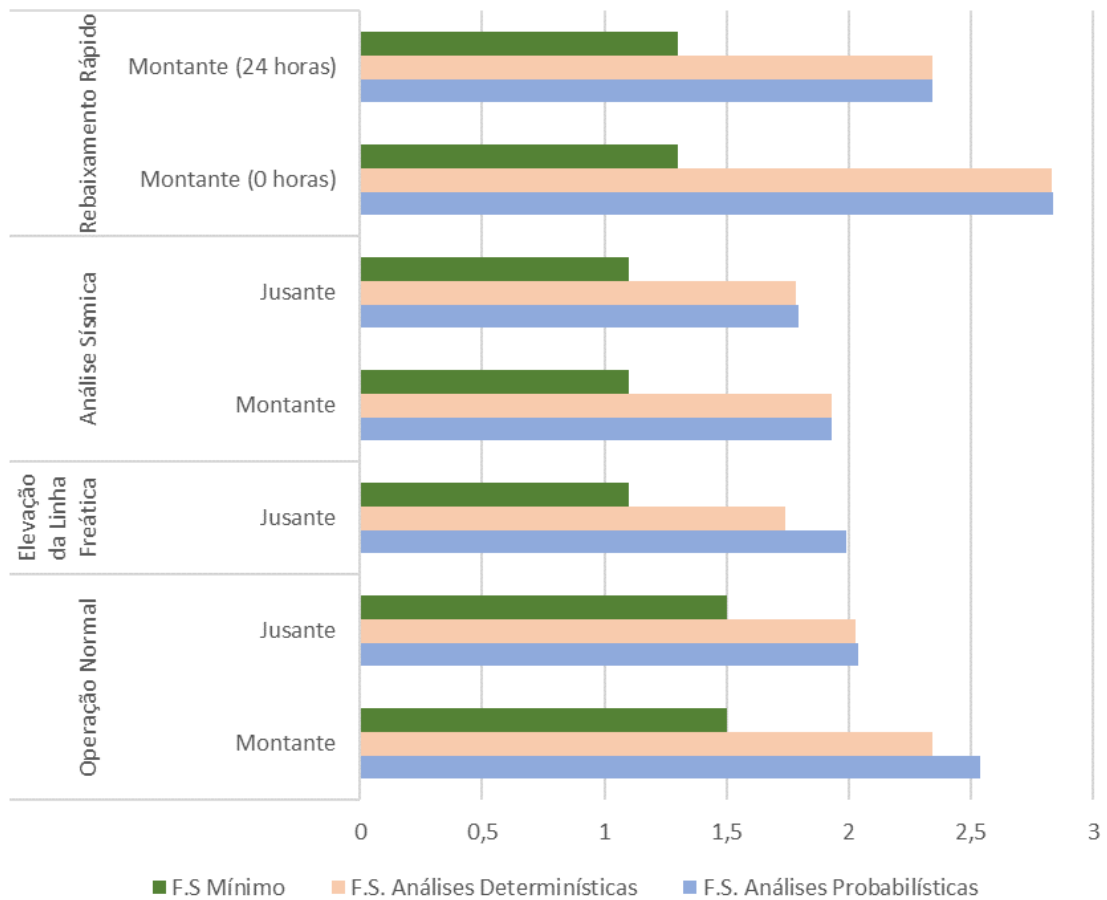
Comparando-se os resultados obtidos nas superfícies potenciais de ruptura, a partir das análises determinísticas com o método de Spencer e probabilísticas com o método de Monte Carlo, se observa que as combinações de variáveis nos parâmetros geotécnicos geraram fatores de segurança superiores ao obtidos através da abordagem determinística, onde não se considerou a variabilidade, conforme resumido na Tabela 13 e ilustrado no Gráfico 01.

Tabela 13 - Compilação dos Fatores de Segurança

Condição de Carregamento	Talude	F.S. Mínimo	F.S. Análises Determinísticas	F.S. Análises Probabilísticas
Operação Normal	Montante	1,500	2,339	2,537
	Jusante		2,027	2,039
Elevação da Linha Freática	Jusante	1,100	1,737	1,990
Análise Sísmica	Montante	1,100	1,929	1,929
	Jusante		1,785	1,794
Rebaixamento Rápido	Montante (0 horas)	1,300	2,832	2,837
	Montante (24 horas)		2,341	2,342

Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Gráfico 1 - Comparação dos FS's



Fonte: Elaborado pela Autora (2023).

Todas as análises realizadas resultaram em fatores de segurança superiores ao mínimo requerido, em termos dessas análises e critérios estabelecidos pela Eletrobrás (2003), o barramento em questão se encontra seguro para os cenários analisados.

Ressalta-se que o fato do fator de segurança ter dado superior no caso da elevação da linha freática e no rebaixamento rápido do reservatório, sendo essas análises consideradas críticas, diz respeito apenas a probabilidade aplicada.

As cunhas críticas de ruptura obtidas nas análises determinísticas e as obtidas nas análises probabilísticas de mesmas condições de carregamento foram similares, atingindo as mesmas camadas de materiais, diferenciando-se entre si apenas por pequenas diferenças no raio da cunha.

No entanto, é importante ressaltar que os resultados obtidos nas análises probabilísticas foram provenientes de uma variação dos parâmetros geotécnicos definidos pela literatura, que em determinadas situações gerou um intervalo de variação muito grande, como por exemplo a coesão efetiva do material 1A/1B, que foi de 0 kPa a 80 kPa.

Com a realização de uma quantidade suficiente de ensaios, a fim de determinar com propriedade o desvio padrão dos materiais, esse intervalo de variação seria menor e mais condizente com a realidade.

Além disso, seguindo a Equação 20, utilizada para definir o número de simulações de Monte Carlo, a quantidade real de simulações seria cerca de 530.000, quantidade de simulações inviável de ser realizada no *software* em questão, necessitando de ferramentas de programação para alcançar o número de simulações necessárias e com nível de confiabilidade maior.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo a avaliação da estabilidade de uma barragem de terra através de métodos determinísticos e probabilísticos.

Os critérios de análises adotados foram definidos conforme recomendações da Eletrobrás (2003), sendo eles: operação normal; operação com sismo; rebaixamento rápido do reservatório e elevação da linha freática.

Inicialmente, foram realizadas três análises de percolação, a fim de subsidiar as análises de estabilidade, sendo elas: operação normal; elevação da linha freática e rebaixamento rápido do reservatório.

A partir das análises de percolação realizadas, vinculou-se as análises de estabilidade para a obtenção dos fatores de segurança. Todas as análises de estabilidade realizadas apresentaram resultados de fatores de segurança superiores ao mínimo recomendado, além disso, o método probabilístico apresentou a menor probabilidade de ruptura segundo U.S. Army Corps of Engineers (1997), com valor igual a 3×10^{-7} em todas as análises. Dito isto, pode-se concluir que a barragem em questão é estável e não apresenta risco de ruptura.

No que diz respeito as condições de carregamento realizadas em ambas as abordagens, a situação em que o fator de segurança resultante foi o mais baixo foi na análise do talude de jusante sob a condição excepcional de sismos, seguida da elevação da linha freática com a possível colmatação da drenagem interna. No entanto, mesmo nessas situações, o fator de segurança obtido foi maior do que 1,10, que é o mínimo estabelecido pela Eletrobrás (2003), favorável a segurança do barramento.

A abordagem determinística e a abordagem probabilística foram realizadas matematicamente com base no Método de Spencer, a fim de comparar-se os resultados obtidos. O que difere uma abordagem da outra é que na abordagem determinística o Método de Monte Carlo adiciona a variação dos parâmetros geotécnicos.

Quanto as análises probabilísticas, a Equação 20, que determina o número de simulações de Monte Carlo a serem realizadas com base no nível de precisão e quantidade de parâmetros variáveis, não foi viável para este trabalho. Recomenda-se a realização das análises probabilísticas em *software* que seja eficiente na realização de milhares de simulações. Além disso, como o desvio padrão dos materiais foram arbitrados conforme valores de literatura, para maior veracidade é necessário a realização de ensaios geotécnicos.

No que se refere à comparação dos métodos determinísticos e probabilísticos, conclui-se que os fatores de segurança obtidos nas análises probabilísticas são levemente superiores aos obtidos nas análises determinísticas. Ou seja, a variabilidade dos parâmetros geotécnicos resultou num possível aumento da segurança do barramento.

Além disso, as análises probabilísticas resultam em maiores informações, que auxiliam na precisão e qualidade do resultado. Como a probabilidade de ruptura, o índice de confiabilidade e a distribuição de probabilidade gerada pelo resultado do FS.

Pode-se concluir que a complementação da análise determinística com a realização de análises probabilísticas traz uma maior confiabilidade aos dados obtidos, pois quanto maior o número de informações, maior é a correlação entre o modelo computacional e a real situação em campo.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

A autora sugere os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Realizar comparações entre os fatores de segurança obtidos através de diferentes abordagens probabilísticas e de diferentes abordagens probabilísticas.
- Realizar ensaios nos materiais constituintes do barramento, quando este não for homogêneo, a fim de verificar o real desvio padrão dos parâmetros geotécnicos e utilizá-lo para realização de análise de estabilidade pela abordagem probabilística.
- Realizar a análise probabilística através de *softwares* de programação, a fim de utilizar o real número de simulações de Monte Carlo.

REFERÊNCIAS

ANA Agência Nacional de Águas. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Guia de Orientação e Formulários para a Inspeção de Segurança de Barragem**. Brasília: ANA, 2016.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens: Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens**. Brasília: ANA, 2016.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de Segurança de Barragens 2021**. Brasília: ANA, 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Resolução Normativa nº 236**, de 07 de fevereiro 2017. Brasília, DF.

APAZA, Marco Aurélio Florez; BARROS, José Maria de Camargo. **Análise probabilística de estabilidade de taludes pelo método Monte Carlo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 17., 2014, Goiânia. Anais. 8 p.
1º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE JOVENS GEOTÉCNICOS GEO-JOVEM, 2004, São Carlos. Estudos Geotécnicos na Barragem de Terra de Curuá-Una [...]. [S. l.: s. n.], 2004. Disponível em: <<http://www.eng.uerj.br/deptos/professor/123/geojovem2004.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181. Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502. Solos e Rochas - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9813. Solo – Determinação da Massa Específica Aparente in situ, com Emprego de Cilindro de Cravação**. Rio de Janeiro, 2016.

BAECHER, Gregory; CHRISTIAN, John. **Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering**. The Atrium: John Wiley & Sons Ltd, 2012.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm>. Acesso em 03 out. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Lei/L14066.htm#art2>. Acesso em 03 out. 2022.

CAETANO, Helmer Murra. **Análise de riscos em uma barragem de rejeito com o uso de diversas técnicas de estabilidade de taludes – Estudo de caso**. 2022.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

CHOK, Y. H. **Modelling the effects of soil variability and vegetation on the stability of natural slopes**. Adelaide, Australia: School of Civil, Environmental and Mining Engineering, The University of Adelaide, 2006.

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, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

CRESTANI, Bruno. **Análise probabilística do fator de segurança de taludes através do método de Monte Carlo**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.

DAS, Braja M.. **Fundamentos da engenharia geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cenpage Learning, 2014. 612 p.

DE CAMPOS, T. M. P. **Análise de Estabilidade: Métodos, Parâmetros e Pressões Neutras. Relatório Técnico**. Departamento de Engenharia Civil, PUC/RJ, Rio de Janeiro. 1985.

ELETROBRAS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro. Centrais Elétricas S.A., 2003.

EL-RAMLY, H; MORGENSTERN, N. R; CRUDEN, D. M. **Probabilistic slope stability analysis for practice**. **Canadian Geotechnical Journal**, Canadá, v. 39, n. 3, p.665683, 2002.

FABRÍCIO, J. V. F. **Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções**. 2006. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

FERREIRA. João Luís Ferrás. **Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Janbu e Spencer**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2012.

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.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GEO-SLOPE International Ltda. **Stability Modeling with SLOPE/W**. Manual Técnico. Alberta, Canadá, 2020.

GERSCOVICH, D. M. S. **Apostila estabilidade de taludes**. Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GERSCOVICH, Denise M. S.. **Estabilidade de Taludes: 2ª edição com exercícios resolvidos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 192 p.

GRIFFITHS, D. & FENTON, G. A. **Probabilistic slope stability analysis by finite elements**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004.

HARR, M.E. (1987). **Reliability – Based Design in Civil Engineering**. McGraw-Hill Publishing Company, New York, USA, 291p

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). General Synthesis: Dam Types. 2019. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/GB/world_register/general_synthesis.asp>. Acesso em 03 out. 2022.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Worlds's Highest Dams: Classification By Type**. 2019. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/classification-by-type>. Acesso em 03 out. 2022.

JESUS, Luiz Gustavo de Souza. **Análise probabilística de estabilidade de taludes de barragem de terra**. 2015. xi, 56 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

LARANJA, R. BRITO, J. **Verificação Probabilística da Segurança das Estruturas**. Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2003.

LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito. **Propriedades Geotécnicas dos Solos e Modelagem Matemática de Previsão a Escorregamentos Translacionais Rasos**. Tese de Doutorado. USP. São Paulo, 2015.

MASSAD, Faíçal. **Obras de Terra: curso básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

MARANGON, Márcio. **Hidráulica dos Solos**. In: MARANGON, Márcio. Mecânica dos Solos. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2018. p. 1-199.

NASH, D. F. T. **A comparative review of limit equilibrium methods of slope stability**. In *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology*, Anderson MG, Richards KS (eds). Wiley: Chichester; 11–75, 1987.

NETTO, A. S. **Análise de Estabilidade de uma Barragem de Terra: Abordagens Determinísticas e Probabilísticas**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, p. 89. 2019.

OLIVEIRA, Antonio Gilberto Simões. **Análise da Eficácia dos Dispositivos de Vedação e Drenagem Utilizados em Fundações Permeáveis de Barragens de Terra**. 2008. 182 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

POSSAN, Edna. **Curso de segurança de barragens, Módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais, Unidade 1: Barragens de Concreto**, Brasília, 2015.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 359 p.

RODRIGUES, Carla Joana Barbosa. **Análise de fiabilidade de taludes em solo**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Estruturas e Geotecnia) - Universidade do Minho, [S. I.], 2014.

RIBEIRO, Charles Roger. **Análise de Estabilidade Global de Barragens de Terra e Enrocamento Estudo de Caso: PCH Xavantina-SC**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

SILVA, Clíscia Cerceau da. **Análise de estabilidade de um talude da cava de alegria utilizando abordagem probabilística**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - programa de pós-graduação em geotecnia da UFOP, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <[https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6375/1/DISSERTA%
c3%87%c3%83O_An%
c3%a1liseEstabilidadeTalude.pdf](https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/6375/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_An%c3%a1liseEstabilidadeTalude.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2022.

SILVA, Danielle de Lima da. **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.

STRAUSS, Marcos. **Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da Zona Norte de Porto Alegre**. 1998. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

TELLES, Ana Cláudia de Mattos. **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.

WANG, Y., Cao, Z. & Au, S.-K.. **Efficient Monte Carlo simulation of parameter sensitivity in probabilistic slope stability analysis**. Computers and Geotechnics, 2010.

YOKOZAWA, Stéphanie Yumi; DE ASSIS, André Pacheco; DA ROCHA, Jéssica Soares. **Métodos probabilísticos aplicada a avaliação do risco em barragens**.

GEOCENTRO, Brasília, 2019. GEOCENTRO 2019, Brasília/DF, Brasil. Disponível em: <<https://qe.iweventos.com.br/upload/trabalhos/t1arquivo/asORjQc6kAfdRX1x99uU7ufXKwX3.pdf>>. Acesso em 03 out. 2022.