

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**HELENA CRISTINA DOS REIS BRAGA  
MAURO MAURÍCIO BRANDÃO DIAS SILVA**

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO RIO DOS  
BOIS EM LEOPOLDO DE BULHÕES-GO PELOS MÉTODOS  
DE FELLENIOUS E BISHOP**

**ANÁPOLIS / GO  
2019**

**HELENA CRISTINA DOS REIS BRAGA  
MAURO MAURÍCIO BRANDÃO DIAS SILVA**

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO RIO DOS  
BOIS EM LEOPOLDO DE BULHÕES-GO PELOS MÉTODOS  
DE FELLENIOUS E BISHOP**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADORA: VANESSA HONORATO DOMINGOS**

**ANÁPOLIS / GO: 2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

BRAGA, HELENA CRISTINA DOS REIS/ SILVA, MAURO MAURÍCIO BRANDÃO DIAS

Estudo da estabilidade da barragem do Rio dos Bois em Leopoldo de Bulhões-GO pelos métodos de Fellenius e Bishop

06/12/2019 (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2019).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| 1. Barragens de terra | 2. Segurança de barragens |
| 3. Causas de ruptura  | 4. Métodos de Equilíbrio  |
| I. ENC/UNI            | II. Título (Série)        |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BRAGA, Helena Cristina dos Reis; SILVA, Mauro Maurício Brandão Dias. Barragens de terra: TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica. Anápolis, GO, 2019.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Helena Cristina dos Reis Braga

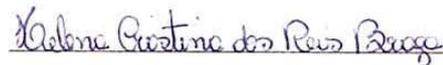
Mauro Maurício Brandão Dias Silva

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:  
Estudo da estabilidade da barragem do Rio dos Bois em Leopoldo de Bulhões-GO pelos métodos de Fellenius e Bishop

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

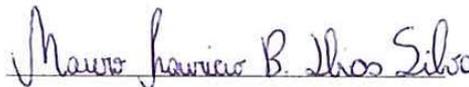
ANO: 2019

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



Helena Cristina dos Reis Braga

E-mail: [helenarcis20@hotmail.com](mailto:helenarcis20@hotmail.com)



Mauro Maurício Brandão Dias Silva

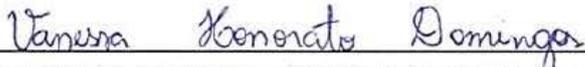
E-mail: [mauriciodias168@gmail.com](mailto:mauriciodias168@gmail.com)

**HELENA CRISTINA DOS REIS BRAGA  
MAURO MAURÍCIO BRANDÃO DIAS SILVA**

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DA BARRAGEM DO RIO DOS  
BOIS EM LEOPOLDO DE BULHÕES-GO PELOS MÉTODOS  
DE FELLENIOUS E BISHOP**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

**APROVADO POR:**

  
VANESSA HONORATO DOMINGOS, mestra (UniEvangélica)  
(ORIENTADORA)

  
RODOLFO RODRIGUES DE SOUSA BORGES, especialista (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)

  
LEANDRO DANIEL PORFIRO, doutor (UniEvangélica)  
(EXAMINADOR INTERNO)

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 06 de dezembro de 2019.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo da minha vida, não somente nos anos de vida universitária, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

Aos meus pais, Antônio e Vânia, pelo incentivo e apoio em minha vida acadêmica sempre dizendo que a melhor forma de alcançar nossos objetivos é através do estudo.

Ao meu noivo Willian pelo companheirismo, paciência e compreensão pela minha ausência nas horas dedicadas ao estudo sempre entendendo que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Aos meus cachorros Bob, Marley, Dyllan, Lupe, Iron e Tomtom por todo o amor retribuído e alegrias que me proporcionam diariamente.

Ao meu amigo Mauro Maurício, companheiro de TCC e de vários outros trabalhos durante a graduação, que sempre compartilhou seu conhecimento e colaborou na realização de todas as atividades.

A professora orientadora Vanessa Honorato, pelo empenho dedicado, apoio e incentivos na elaboração deste trabalho.

Helena Cristina dos Reis Braga

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por ser minha maior força, por me conduzir sempre com amor e bondade, me ensinando a ter fé e coragem para lutar e alcançar meus sonhos.

Sou imensamente grato aos meus pais e meus familiares por ser o meu alicerce, sempre acreditando em mim, por terem me ajudado e por nunca deixarem de me amparar nas situações mais difíceis, protegendo e me fazendo sentir seguro e ensinando coisas magníficas.

Com carinho a todos os meus amigos, pela paciência e compreensão, principalmente pelo apoio e por eu poder sempre contar com vocês nos momentos felizes e adversos.

Aos meus colegas e amigos de turma pela amizade, sofrimento, aprendizado, confiança e carinho que tivemos todo esse período juntos, vocês são incríveis.

Agradeço aos meus mestres que durante anos compartilharam seus conhecimentos comigo, contribuindo para o meu crescimento profissional e ético, meu muito obrigado por tudo que acrescentou em nosso conhecimento.

Agradeço principalmente a nossa orientadora Vanessa Honorato que sempre se dispôs de maneira excepcional em orientar, ensinar e pela pessoa incrível que és. É minha parceira e amiga Helena Cristina, por toda caminhada juntos, dedicação, companheirismo e sua sabedoria. Sem vocês não seria possível a realização dessa dissertação.

Enfim, um agradecimento a todos que acreditaram e contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse sonho possível, meus sinceros agradecimentos.

Mauro Maurício Brandão Dias Silva

*“O sucesso não consiste em não errar, mas em não cometermos os mesmos equívocos mais de uma vez”  
(George Bernard Shaw).*

## RESUMO

A barragem de terra é uma estrutura construída com a finalidade de elevação do curso d'água em regiões com ondulatorias, sendo que, essas construções são de extrema importância no desenvolvimento de diversas atividades a sociedade. A linha de pesquisa é apresentada através do estudo de caso da ruptura da barragem do Rio dos Bois em Leopoldo de Bulhões–GO e visa estudar o comportamento da barragem, verificando sua estabilidade à ruptura e analisando a previsão de percolação, considerando a influência das propriedades geomecânicas e hidráulicas. O mecanismo reúne informações relacionadas acerca de segurança de barragens, métodos de equilíbrio e ênfase em estados limites de ruptura. Para a análise da estabilidade foram realizadas três simulações chamadas de Caso A (sem sistema de drenagem), Caso B (dreno de pé) e Caso C (dreno chaminé), onde o fluxo de drenagem relativo à infiltração expressa comportamento específico em cada caso devido ao sistema de drenagem que foi aplicado. Com as simulações realizadas no software GeoStudio foi possível verificar as melhores condições de estabilidade, analisando a percolação da água. Os fatores de segurança são gradativos aos casos: Caso A, Caso B e Caso C, ou seja, quanto melhor a tecnologia de drenagem empregada mais seguro e estável a estrutura deverá ser. O motivo da ruptura da barragem do lago Roberto Caetano não foi devido ao tipo de sistema de drenagem no maciço e aparentemente não apresenta problemas futuros.

**Palavras-chave:** Barragens de terra, Fator de Segurança, Estabilidade, Percolação.

## ABSTRACT

The earth dam is a structure built with the purpose of elevating the watercourse in regions with undulatory and these constructions are extremely important in the development of various activities in society. The research line is presented through the case study of the Rio dos Bois dam rupture in Leopoldo de Bulhões – GO and the objective is study the dam behavior, verifying the rupture stability and analyzing the percolation prediction, considering the influence of geomechanical and hydraulic properties. The mechanism gathers information about dam safety, equilibrium methods and emphasis on state limit of failure. For the stability analysis three simulations were did called Case A (without drainage system), Case B (foot drain) and Case C (chimney drain) where the drainage flow related to the infiltration expresses specific behavior in each case due to the drainage system that was applied. The simulations did in GeoStudio software were possible verify the best stability conditions, analyzing the water percolation. The safety factors are gradual to the cases: Case A, Case B and Case C, when the best drainage technology is employed safer and more stable the structure should be. The reason for the rupture on the dam of Roberto Caetano Lake was not caused to the type of drainage system in the massif and apparently does not present future problems.

**Keywords:** Earth dams, Safety Factor, Stability, Percolation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura1-Rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG no ano de 2015 .....	14
Figura2-Rompimento da barragem do Córrego do Feijão em Brumdinho-MG.....	14
Figura 3-Pequena barragem de terra.....	19
Figura 4-Barragem homogênea .....	20
Figura 5-Barragem de terra zoneada .....	21
Figura 6-Representação esquemática dos elementos hidráulicos.....	22
Figura 7-Seção do sistema da barragem.....	23
Figura 8-Barragem São Francisco- Mirafé.....	28
Figura 9-Evolução da brecha.....	29
Figura 10-Esquema de infiltração em uma barragem.....	30
Figura 11-Esquemas de drenagem comum para barragens .....	31
Figura 12-Barragens de terra homogênea com tapete drenante .....	32
Figura 13- Trincheira drenante simples.....	33
Figura 14- Dreno de pé.....	33
Figura 15- Corte com sistema de drenagem .....	34
Figura 16- Evolução do fenômeno de piping na barragem de Teton (EUA) .....	34
Figura 17- Talude a montante protegido por rip-rap .....	35
Figura 18- Talude a jusante protegido por gramíneas .....	36
Figura 19- Colapso por recalque diferencial .....	37
Figura 20- Simulação de adensamento do solo .....	38
Figura 21- Adensamento de barragem de terra .....	39
Figura 22- Drenos verticais e colchão de areia.....	39
Figura 23- Bermas de Equilíbrio .....	40
Figura 24- Grau de risco de barragens cadastradas no sistema .....	42
Figura 25- Talude da barragem Casa de Pedra em Congonhas-MG .....	44
Figura 26- Escorregamento cunha.....	46
Figura 27- Escorregamentos circulares (Rotacionais).....	46
Figura 28- Escorregamento planar (Translacionais) .....	47
Figura 29- Forças atuantes em uma fatia.....	48
Figura 30- Geometria de superfícies de ruptura críticas.....	49
Figura 31- Ângulo das lamelas.....	50
Figura 32- Fatia genérica e polígono de forças no método de Bishop .....	51

Figura 33 - Espaço geográfico do lago Roberto Caetano .....	53
Figura 34- Localidade do Lago Roberto Caetano .....	54
Figura 35- Localização geográfica .....	54
Figura 36- Relatório de sondagem de solo SPT .....	55
Figura 37- Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bois .....	56
Figura 38 – Corte esquemático da barragem de terra (Caso A) .....	59
Figura 39 - Corte esquemático da barragem de terra com dreno de pé (Caso B).....	59
Figura 40 – Corte esquemático da barragem de terra com dreno chaminé (Caso C).....	60
Figura 41 – Simulações iniciais.....	62
Figura 42 – Infiltração de água.....	63
Figura 43 – Fator de segurança – Bishop (Caso A).....	65
Figura 44 – Fator de segurança – Fellenius (Caso A) .....	66
Figura 45 – Fator de segurança – Bishop (Caso B).....	66
Figura 46 – Fator de segurança – Fellenius (Caso B).....	67
Figura 47 – Fator de segurança – Bishop (Caso C).....	67
Figura 48 – Fator de segurança – Fellenius (Caso C).....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais causas de rupturas de barragens de terra .....	28
Tabela 2- Análise da percentagem de adensamento.....	38
Tabela 3- Fatores mínimos de segurança .....	45
Tabela 4- Vazões alocáveis da Bacia Rio dos Bois.....	57
Tabela 5 – Casos analisados e tipos de drenagem.....	58
Tabela 6 – Coordenadas da fundação.....	60
Tabela 7 – Coordenadas do talude.....	60
Tabela 8 – Coordenadas do dreno de pé.....	61
Tabela 9 – Coordenadas do dreno chaminé.....	61
Tabela 10 - Valores utilizados nas simulações.....	62
Tabela 11 – Resumo de valores de Fatores de Segurança do talude da barragem .....	69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CTAP	Câmara Técnica de Análise de Projeto
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
NBR	Norma Técnica
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SECIMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
SPT	Standart Penetration Test

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	15
1.2	OBJETIVOS .....	16
1.2.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
1.2.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
1.3	METODOLOGIA.....	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>BARRAGENS DE TERRA.....</b>	<b>19</b>
2.1	DEFINIÇÃO.....	19
2.2	ELEMENTOS DE UMA BARRAGEM.....	21
2.3	DIRETRIZES PARA O DIMENSIONAMENTO DE BARRAGENS.....	24
2.4	SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	25
2.4.1	<b>Generalidades .....</b>	<b>25</b>
2.4.2	<b>Causas de rupturas em barragens de terra.....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>ESTABILIDADE DE TALUDES .....</b>	<b>44</b>
3.1	MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE.....	47
3.1.1	<b>Fellenius.....</b>	<b>47</b>
3.1.2	<b>Bishop .....</b>	<b>50</b>
<b>4.</b>	<b>BARRAGEM DE TERRA DO RIO DOS BOIS .....</b>	<b>53</b>
4.1	VAZÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA .....	56
<b>5.</b>	<b>UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA GEOSTUDIO .....</b>	<b>58</b>
5.1.	ANÁLISE DOS DADOS POR MEIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL .....	60
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As barragens de terra são uma das mais antigas construções realizadas pelo homem e foram fundamentais para o desenvolvimento das civilizações antigas. Utilizadas há mais de 5.000 anos por diversos países como Egito, Pérsia, Índia e Babilônia, as barragens eram simplesmente barreiras de terra feitas ao longo de curso d'água construídas com materiais rudimentares e com isso as estruturas eram facilmente destruídas (JANSEN, 1983).

No Brasil a barragem mais antiga que se tem informação foi construída onde hoje é a cidade de Recife – PE. Conhecida hoje como açude Apipucos aparece em um mapa holandês do ano de 1577. A primeira barragem registrada que se tem notícia foi feita em 1833 e era utilizado para aproveitamento hidroelétrico, chamada Ribeirão do Inferno - MG (CBDB, 2011). Entretanto, foi na década de 70 que grandes obras de barragens foram realizadas, voltadas para hidroelétricas, abastecimento e irrigação. Essas obras eram carentes de recursos técnicos e financeiros e desde 1977 (Decreto Lei nº 10.752/77 SP) existiram tentativas de implementar uma lei para auditorias técnicas na construção de barragens.

Em 2003 o projeto de lei nº 1181/2003 foi elaborado pelo Grupo Técnico de Segurança de Barragens, criado na Câmara Técnica de Estudos e Projetos (CTAP) do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), demorou sete anos para ser aprovado e sancionado pelo Presidente da República resultando na Lei nº 12.334/2010 que definiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e aplica-se a barragens destinadas à acumulação de água, disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. No decorrer desses sete anos graves acidentes envolvendo barragens aconteceram (SAMPAIO, 2014).

O desastre mais recente envolvendo barragens foi o rompimento da barragem da mina do córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho – MG (Figura 2), administrada pela Vale S.A. em janeiro de 2019. O rompimento matou centenas de pessoas além de destruir grande parte da vegetação local e causou a morte de diversos animais. A lama da barragem também atingiu o rio Paraopeba o que tornou a água imprópria para o consumo. Outra tragédia já havia acontecido no Brasil em 2015, o rompimento da barragem de Fundão (Figura 1), no distrito de Bento Rodrigues em Minas Gerais. O

rompimento também causou grande destruição e foi considerado o maior desastre ambiental do Brasil.

Figura1-Rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG no ano de 2015



Fonte: SANTOS, 2019

Figura2-Rompimento da barragem do Córrego do Feijão em Brumdinho-MG



Fonte: AMBIENTE BRASIL, 2019

Além desses grandes desastres causados pelos rompimentos de barragens de terra contendo rejeitos minerais, todos os anos acontecem rompimentos de barragens em todo o país. De acordo com a Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos, Infraestrutura, Cidade e Assuntos Metropolitanos do Estado de Goiás (SECIMA), entre

2009 e 2016 aconteceram 13 rompimentos de barragem de acumulação de água no Estado de Goiás. Um desses rompimentos ocorreu na zona rural de Itaberaí/GO, no ano de 2016, a água invadiu a rodovia GO-070 e destruiu parte da estrada.

A partir disso, visa-se entender o comportamento de uma barragem de terra pequena na cidade de Leopoldo de Bulhões - GO, que rompeu no 1º de abril do ano de 2000, verificando sua estabilidade de ruptura e analisando a previsão de recalque considerando as influências das propriedades geomecânicas e hidráulicas.

O município de Leopoldo de Bulhões está localizado na região central do Estado de Goiás e fica aproximadamente a 64 km da capital, Goiânia. Possui o número estimado de 7.647 habitantes (2019) e sua economia é baseada na produção agrícola e pecuária.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Grandes perdas ambientais, custos e recursos humanos vêm ocorrendo no decorrer dos anos informados por veículos de circulação nacional, provocadas por incertezas na veracidade do sistema de construção, monitoramento, segurança e fiscalização de barragens como verificado na cidade de Mariana - MG (2015) e Brumadinho - MG (2019), caracterizados pela saturação da estrutura em consequência o seu rompimento.

A primeira análise de possíveis dados estruturais de uma barragem deve ser a verificação na relação solo – estrutura na fase inicial do planejamento do projeto, analisando e investigando possíveis danos ocasionais em sua vida útil de utilização. Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002) “as barragens devem ser submetidas periodicamente a uma reavaliação de suas condições de segurança, segundo sua classificação quanto às consequências de ruptura”.

Dessa forma, dispor o aprimoramento da análise dos estados limites de estabilidade de barragens de terra, com base na verificação das propriedades geomecânicas, hidráulicas e estruturais, através de softwares aplicando e realizando simulações. Condicionando a favorecer a segurança de barragens, copilação e reduzindo possíveis danos de qualquer natureza, viabilizando o sistema construção e garantindo segurança a sociedade.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento de uma barragem de terra, verificando sua estabilidade à ruptura e analisando a previsão de percolação, considerando a influência das propriedades geomecânicas e hidráulicas.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos tem-se:

- Conceituar os elementos de uma barragem de terra, apresentando os principais fatores que influenciam na perda de estabilidade dos taludes e que ocasionam no rompimento da barragem;
- Apresentar os principais métodos utilizados no cálculo de Fator de Segurança em taludes de barragens adotando métodos de Equilíbrio Limite;
- Averiguar o levantamento de dados qualitativos e quantitativos da barragem de terra no Rio dos Bois localizado na cidade de Leopoldo de Bulhões – GO que rompeu no ano de 2000;
- Realizar o estudo da percolação de água no maciço de terra, através da análise da linha freática pelo software GeoStudio (Flux);
- Fazer o estudo de caso da estabilidade dos taludes do barramento pelo método de Fellenius e Bishop com uso do software GeoStudio (Slope);

## 1.3 METODOLOGIA

O presente sujeito de pesquisa será constituído por uma análise qualitativa e quantitativa, na linha de pesquisa exploratória e/ou explicativa, de modo a fornecer informações precisas da estabilidade de taludes, para melhor investigação e determinação das causas de rupturas de barragem.

Será acentuado o reconhecimento e levantamento de dados que impermeiam na estabilidade da barragem, tais como situações de adensamento e percolação, que uma barragem de terra é submetida em sua vida útil. Utilizando esse dados para realizar a simulação com o auxílio do software GeoStudio, verificando os estados limites de

ruptura com parametrização pelo Método de Fellenius e Bishop, a fim de mediar e controlar possíveis problemas construtivos e garantir a segurança de barragens. Todo procedimento deverá ser realizado com base na barragem de terra do Rio dos Bois, localizada na cidade de Leopoldo de Bulhões – GO, por meio do estudo de caso das condições de estabilidade e segurança devido ao seu rompimento no ano de 2000. Hoje a barragem encontra-se reconstruída e tem como fim a utilização para lazer e turismo.

As informações apresentadas nesse estudo serão situadas por meio de fundamentação teórica, tais como: livros, artigos científicos, dissertações, monografias de teses mestrado, normativas e resoluções que serão necessários para o traçado da linha de pesquisa e problematização.

Será realizado o levantamento de dados da barragem de estudo, averiguando e analisando as possíveis causas de rompimento anterior, por meio de documentos como: projeto de construção, planta baixa, memorial descritivo, laudos técnicos, dados geológicos e hidráulicos da estrutura, além de simulações de estado limite de ruptura da barragem.

Com bases nos dados coletados serão realizadas três simulações verificando a barragem nas seguintes condições de estabilidade: sem sistema de drenagem (Caso A) dreno de pé (Caso B), filtro chaminé (Caso C). Será efetuada a investigação dos fatores que comprometem a segurança da barragem e a determinação do fator de segurança traçando parâmetros comportamentais de vulnerabilidade ao rompimento de natureza de projeto, execução, geologia ou fatores adversos não verificados. Reavaliando as formas de construção, monitoramento e fiscalização de barragens para seu perfeito funcionamento.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho de conclusão de curso será composto por seis capítulos principais, lista de bibliografias consultadas e dos anexos relacionados ao tema.

No primeiro capítulo é apresentada a introdução, que consta as justificativas para a realização do trabalho, os objetivos geral e específicos e a metodologia utilizada para o alcance dos dados necessários, desenvolvimento e conclusão do trabalho.

O segundo capítulo descreve as definições de barragens de terra, conceituando os elementos que compõem a sua construção, apresentando as diretrizes para o seu

dimensionamento, explicando sobre segurança de barragens e demonstrando sobre as principais causas de ruptura em barragens de terra.

O terceiro capítulo aborda sobre estabilidade de taludes, definindo o assunto e conceituando os métodos de equilíbrio limite mais utilizados na análise de estabilidades de taludes e que serão utilizados no estudo de caso da barragem de terra do Rio dos Bois.

O quarto capítulo apresenta a barragem de terra do Rio dos Bois localizada na cidade de Leopoldo de Bulhões – GO, demonstrando seus dados qualitativos, quantitativos e ensaios obtidos durante a realização do trabalho e que serão utilizados no cálculo com a utilização do software GeoStudio.

O quinto capítulo infere sobre as características e ferramentas do programa GeoStudio (Slope e Flux), para utilização e apresenta as coordenadas e valores geotécnicos necessários para a verificação do fator de segurança da barragem, além de apresentar os resultados e discussões das simulações necessárias para realizar a análise da estabilidade da barragem.

Nas considerações finais, relacionadas no capítulo seis, são apresentados os resultados obtidos com o software. Analisando a percolação de água no maciço da barragem do Rio dos Bois, comparando as três simulações e seus fatores de segurança, considerando a situação de estabilidade da barragem no ano de ruptura e atualmente.

## 2 BARRAGENS DE TERRA

Neste capítulo serão apresentadas as definições de barragens de terra, os tipos de barragens de terra existentes e os elementos que a compõem.

### 2.1 DEFINIÇÃO

Barragem é uma estrutura construída transversalmente a um rio com o objetivo de elevar o nível d água ou originar um reservatório de acumulação (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2002).

Barragem é toda construção com a finalidade de armazenar água com volume superior a 500.000 m<sup>3</sup> ou altura d água superior a 1,5m, construída com terra, alvenaria, concreto simples ou armado (RIO GRANDE DO SUL, 1955).

Perini (2009) afirma que “as barragens são estruturas que se destinam a reter líquidos ou misturas de líquidos e sólidos de maneira controlável e segura, propiciando benefícios para toda a sociedade”.

Figura 3-Pequena barragem de terra



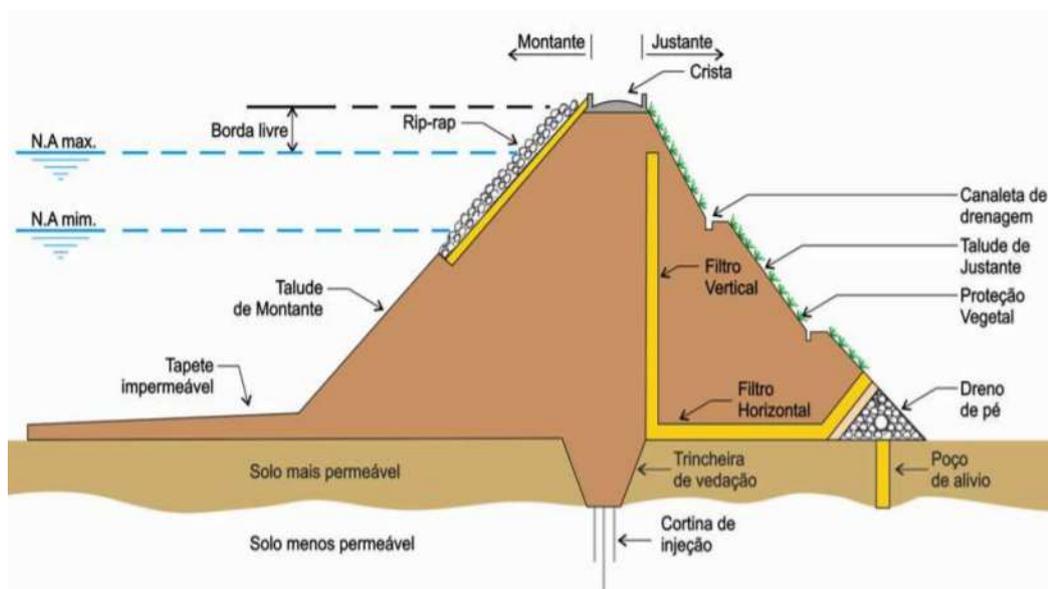
Fonte: ES BRASIL, 2017

As barragens de terra normalmente se adequam a qualquer tipo de fundação, desde rocha compactada até terrenos construídos com materiais inconsolidados (MARANGON, 2004). A adoção desse tipo de barramento é ideal para lugares onde a topografia apresenta-se suavemente ondulada, vales pouco encaixado e onde possua materiais argilosos ou arenosos suficientes para construção de um maciço compactado (ELETROBRÁS, 2000).

As barragens de terra podem ser construídas de maneira homogênea (Figura 3), quando compactado deve apresentar baixo coeficiente de permeabilidade, ou zonada (Figura 3), onde o núcleo é composto de material impermeável, geralmente núcleo argiloso, e os taludes feitos com material mais permeável (CARVALHO, 2011).

A barragem de terra homogênea (Figura 4) é composta apenas por uma espécie de material, excluindo a proteção dos taludes. O material precisa ser impermeável para formar uma barreira apropriada contra a água. Para este tipo de barragem os taludes necessitam ser relativamente suaves, para uma correta estabilidade (MARANGON, 2004). Para Meirelles (2013), as inclinações dos taludes a montante e a jusante devem ser diferentes para atenderem de maneira correta ao princípio da estabilidade.

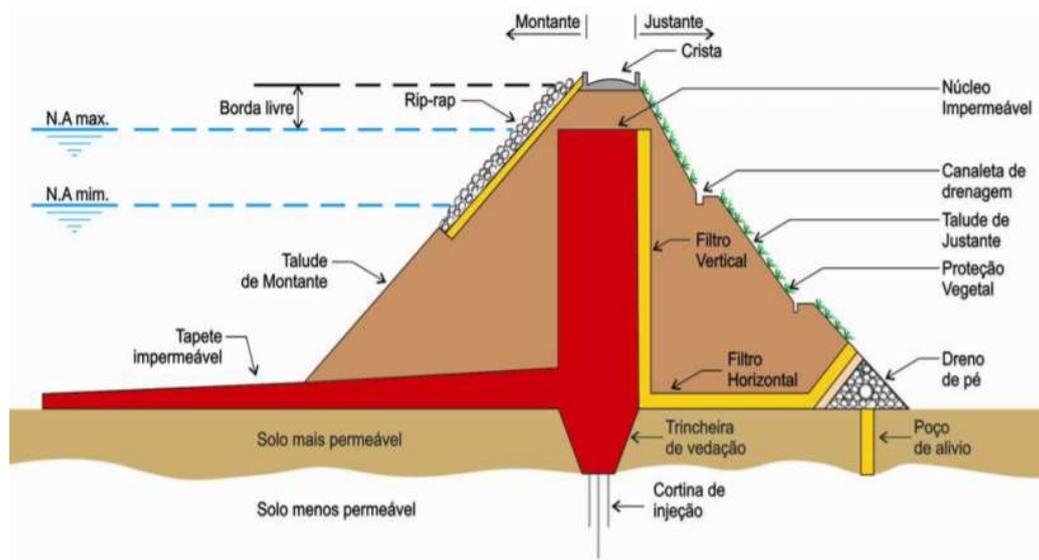
Figura 4-Barragem homogênea



Fonte: CARVALHO, 2011

As barragens zonadas (Figura 5) são compostas por um núcleo central impermeável, envolto por zonas de materiais mais permeáveis que suportam e protegem o núcleo. As zonas permeáveis são compostas por areia, cascalho ou fragmentos de rocha, ou por uma mistura desses materiais (MARANGON, 2004). Para Miranda (2016), “A zona externa de montante garante a estabilidade contra esvaziamento rápido do reservatório enquanto a de jusante assegura a estabilidade e funciona com dreno para controlar a água que infiltra através do maciço”.

Figura 5-Barragem de terra zoneada



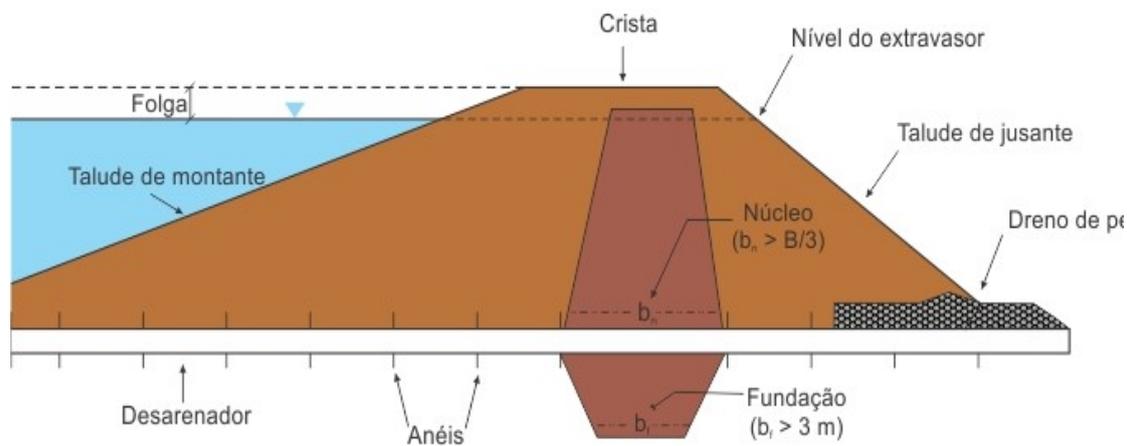
Fonte: CARVALHO, 2011

A vantagem na construção das barragens de terra se deve ao fato de serem utilizados materiais locais para sua construção, projetos simples, os requisitos para fundações são menos exigentes do que para outros tipos de barragens e resistem ao assentamento e movimentos melhor que as estruturas rígidas. As desvantagens são que esse tipo de barragem é mais fácil de ser danificada ou destruída pela água corrente, durante a construção deve ser compactada corretamente para não apresentar integridade estrutural fraca e requerem manutenção com mais frequência para evitar erosão, sedimentação e infiltração (FAO, 2011).

## 2.2 ELEMENTOS DE UMA BARRAGEM

Segundo Carvalho (2008), os principais elementos que compõem uma barragem de terra são listados e definidos abaixo conforme a Figura 6.

Figura 6-Representação esquemática dos elementos hidráulicos



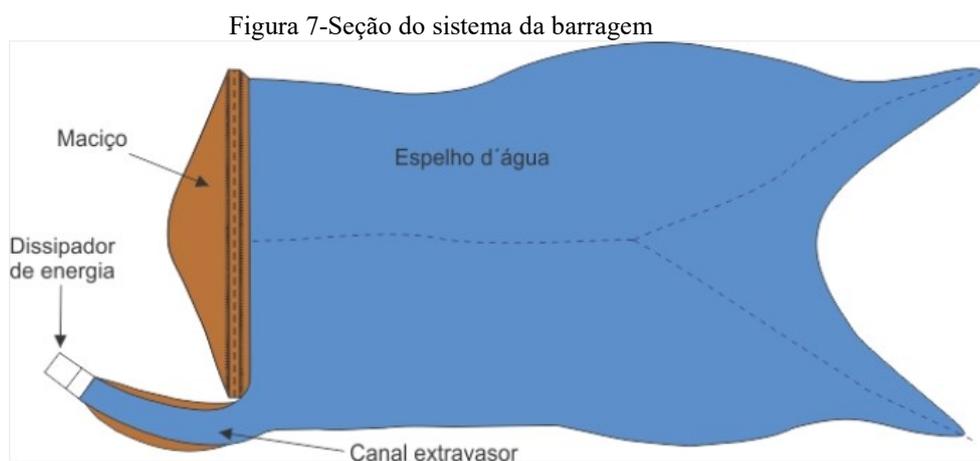
Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas, 2009.

- Aterro: é o maciço, ou seja, é a estrutura com a função de reter a água ou mistura de líquidos e sólidos;
- Altura: é a distância vertical entre a superfície do terreno até a crista;
- Borda livre ou folga: distância vertical entre o nível da água máximo e a crista do aterro, quando a represa estiver cheia;
- Taludes: são as faces laterais e inclinadas, sendo o de montante aquele que está em contato com a água, e o de jusante aquele que está do lado seco da barragem;
- Crista: é a parte superior do aterro, A largura da Crista é determinada pela vazão demandada pela barragem com a largura mínima é de 3 metros. Independente do tamanho da barragem, sendo que o mais comum são cristas com valor entre 6 e 12 metros (UNICAMP, 2011);
- Espelho d'água: superfície d'água acumulada no reservatório;
- Base ou saia do aterro: projeção dos taludes de montante e jusante;
- *Cut-off*: Conhecido também como trincheira de vedação. É um tipo de tratamento para fundações permeáveis. Consiste na escavação de uma vala sob a barragem e a sua substituição por um material pouco permeável, geralmente material argiloso, com o intuito de aumentar o caminho de percolação da água na fundação e, conseqüentemente, diminuir o gradiente de saída (MASSAD, 2003).
- Núcleo: construído no centro barragem para diminuir a percolação;
- Extravasador ou Vertedouro: estrutura com a finalidade de escoar o excesso de água da represa;

- Desarenador: também conhecido como tubulação de fundo, tem a função de controle do nível da represa e garantir o escoamento à jusante;
- Dissipador de energia: tem a função de diminuir a energia cinética da água ao voltar para o seu leito natural.

Conhecer e analisar essas características geográficas e estruturais da barragem é fundamental para evitar possíveis danos em sua vida útil de utilização (ABREU, 2015).

É fundamental realizar a problematização do sistema de vazão da barragem, para assegurar a estabilidade do maciço (Figura 7). A análise desse sistema é de extrema importância para determinar a vazão da bacia hidrográfica, sendo que não pode exceder o estado limite de forças resistentes da estrutura, caso contrário condicionará a possíveis fissuras e até mesmo a rupturas da estrutura (GOMES; TEIXEIRA, 2017).



Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas, 2009.

O Atlas Digital das Águas de Minas (2009) determina que para a realização de uma barragem com perfeito dimensionamento, deve prever a vazão máxima do extravasador e o volume de armazenamento ideal conforme a vazão de projeto, levando em consideração a bacia hidrográfica, a lâmina de água (Figura 7) e as medidas mitigadoras dos impactos ambientais. Além de aspectos regidos por lei a serem considerados na construção das barragens de terra.

### 2.3 DIRETRIZES PARA O DIMENSIONAMENTO DE BARRAGENS

As barragens independentes de seu tamanho devem assegurar a sua vida útil de projeto quanto a sua estabilidade, um estudo detalhado e realizado de forma harmoniosa, é essencial para o desenvolvimento de dimensionamentos seguros e econômicos. O não aprofundamento do estudo das características hidrológicas e hidráulicas para a averiguação da estabilidade do talude pode acarretar no superdimensionamento da construção e favorecer possíveis danos a curto e longo prazo.

Segundo Piasentin (2013) “A construção deve obedecer fielmente ao projeto e seguir as normas e especificações. As eventuais alterações de projeto existentes devem ser aprovadas pelo projetista e registradas em documentos, inviabilizando fenômenos de qualquer natureza”.

De acordo com a Eletrobrás (2000), a barragem de terra é viável para locais geograficamente que apresentam suavemente onduladas. Para dimensionar essa barragem consideram-se os aspectos estruturais, hidráulicos, operacionais e ambientais segundo o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (2016).

“O projeto, nas suas diversas etapas, deve basear-se em estudos nos quais os problemas de segurança tenham sido devidamente considerados, de acordo com o porte da barragem e com a classe de dano potencial associado que lhe for atribuída”, afirma o Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens (2016, p. 23).

Conforme estabelecido pela Agência Nacional de Águas (ANA,2019), os projetos de barragens de terra devem atender a algumas especificações mínimas:

- Levantamento planialtimétrico preponderando na verificação da área inundada do reservatório;
- Estudos hidrológicos na determinação das vazões máximas e mínimas e as considerações de precipitações e intensidade pluviométrica da bacia hidrográfica;
- Dimensionamento hidráulico feito com base no extravasador e correlacionado com as características hidrológicas da barragem.
- Verificação das propriedades do terreno de fundação por meio de sondagens, para determinar as resistências de infiltração e cisalhamento em que a fundação será submetida.

- Análise do corte e aterro do solo para verificações de condições de volume a ser compactado;
- Dimensionamento estrutural conforme layout da barragem, informando elementos básicos como: cota, borda livre, altura, dimensões do maciço e etc.
- Levantamento de medidas mitigadoras referentes a possíveis impactos ambientais, recuperação da região de empréstimo e proteção ao reservatório a qualidade da água presente.

“A autorização para construção de uma barragem de terra é obtida através de processo de licenciamento ambiental, atendendo a Resolução CONAMA nº 237/1997, que estabelece os critérios para licenciamento ambiental”. (BRASIL, 1997).

No Art. 2º da Resolução CONAMA nº 237/1997 ainda afirma que: A localização, construção, instalação, ampliação, modificação [...] sobre qualquer ação deverão possuir licenciamento do órgão ambiental competente, segundo análise de Gomese Teixeira (2017).

## 2.4 SEGURANÇA DE BARRAGENS

### 2.4.1 Generalidades

A segurança integral das barragens não pode ser garantida. Este é um fato conhecido há anos por técnicos e especialistas. Diversos acidentes históricos e catástrofes ocorridas nos séculos XIX e XX confirmam esta declaração. Porém, essa realidade não é conhecida pela população em geral e as informações nem sempre são transmitidas de maneira clara. Pelos regulamentos técnicos (recomendações ou códigos técnicos), são adotadas normas para o projeto e para o dimensionamento que correspondem a garantias de resistência e de funcionalidade com margens de “segurança” consideradas “confortáveis” pela comunidade técnico-científica e indiretamente pela sociedade (ALMEIDA, 2009).

Na atualidade a grande discussão acerca das barragens prevalece nos aspectos gerenciais: planejamento, projetos, construção e manutenção, focadas na segurança. A barragem é um risco diário para a população que fica à jusante, devido ao poder de

destruição que a massa de água tem no caso de um rompimento. A tragédia pode ser maior conforme o tamanho da barragem e do volume acumulado (SAMPAIO, 2014).

Segundo Sampaio (2014): “A segurança deve constituir o objetivo fundamental no projeto, construção e operação de barragens. Este deve ser referencial a ser buscado, uma vez que a ruptura de uma barragem pode ter consequências imensuráveis em termos de impactos socioeconômicos e ambientais”.

No Brasil, foi aprovada no ano de 2010 a Lei 12.334 que estabelece a Política Nacional de Seguranças de Barragens (PNSB), instrumento para regular o setor de barragens no país. Alguns objetivos da PNSB são (Lei 12.334/2010 - Art. 3º):

- Garantir a observância de padrões de segurança de barragens de maneira a reduzir a possibilidade de acidente e suas consequências;
- Regulamentar as ações de segurança a serem adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento e primeiro vertimento, operação, desativação e de usos futuros de barragens em todo o território nacional;
- Criar condições para que se amplie o universo de controle de barragens pelo poder público, com base na fiscalização, orientação e correção das ações de segurança;
- Fomentar a cultura de segurança de barragens e gestão de riscos.

“Uma barragem segura é aquela cujo desempenho garanta um nível aceitável de proteção contra ruptura, ou galgamento sem ruptura, conforme os critérios de segurança utilizados pelo meio técnico” (CBDB, 2001).

A segurança de uma barragem pode ser afetada por fenômenos naturais como enchentes, deslizamentos, terremotos e deteriorização do corpo da barragem e da fundação. Com o tempo a estrutura da barragem pode começar a se deteriorar devido aos anos da construção e, às vezes, pode ocorrer o aumento da pressão interna e vazamentos. Esses processos são lentos e não são percebidos de imediato por meio de exames rotineiros, por isso a importância do monitoramento contínuo do desempenho da barragem para a detecção de qualquer não conformidade no projeto ou em outro ponto da barragem que possa causar falha (ZUFFO, 2005).

A utilização de instrumentação nas barragens possibilita projetos mais elaborados, permitindo o aprimoramento da construção e execução de estruturas mais

seguras. No Brasil, a instrumentação de barragens de terra iniciou-se na década de 1950 e início de 1960. Os instrumentos utilizados na época eram medidores de recalque de placa, medidores de vazão e piezômetros no maciço e fundação. No final da década de 60, a instrumentação tornou-se mais sofisticada sendo aplicados a instalação de células piezométricas, células de pressão total, inclinômetros e medidores de recalque instalados no núcleo, caixas suecas e extensômetros. Na época também começou a utilização de programas computacionais para elaboração dos projetos de barragens com o emprego do método dos elementos finitos (SMIRDERLE, 2014).

#### **2.4.2 Causas de rupturas em barragens de terra**

As barragens devem ser estruturas estáveis, estanques ou permeáveis na medida certa. Os principais problemas de ruptura em barragens estão relacionados à estabilidade e a impermeabilidade. Além de causar problemas na própria barragem, podem influenciar em determinadas estruturas próximas, como os vertedouros e os condutos (CARDIA; KUPERMAN, 2013).

Cardia(2013) e Kuperman (2013) propõem que os problemas vistos nas barragens podem ser divididos e classificados em diferentes tipos de deterioração como:

- Deterioração Físico-Mecânica: ação mecânica do meio sobre a estrutura. Ex: Fissura e erosão;
- Deterioração Físico-Química: ação físico-química do meio sobre a estrutura. Ex.: Expansão por sulfatos e lixiviação;

As rupturas de barragens de terra são frequentes ao redor do mundo e estudos para desenvolver técnicas que tentam evitar ou minimizar os acidentes causados pelas rupturas foram feitos para avaliar quais as causas mais recorrentes. Veltrop (1991) apud Gago (2009) diz que as principais causas de rupturas de barragens são: galgamento, infiltrações e erosões. A seguir, na Tabela 1, é apresentado o resultado do estudo demonstrando as causas das rupturas e suas respectivas percentagens de ocorrências.

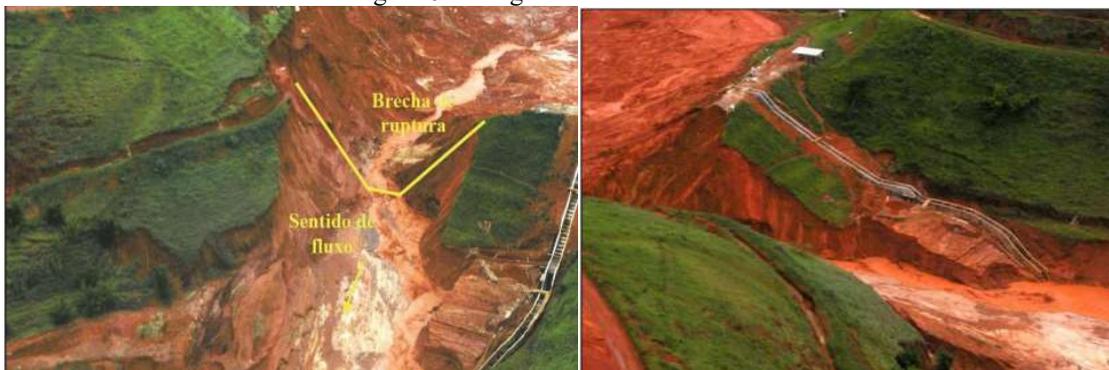
Causa	Porcentagem
Galgamento	26%
Vazamento e <i>piping</i> no aterro	22%
Vazamento e <i>piping</i> na fundação	17%
Erosão	17%
Falta de proteção dos taludes	12%
Outras	6%

Fonte: VELTROP, 1991 apud GAGO, 2009

#### 2.4.2.1 Galgamento

Galgamento é um fenômeno de ruptura que ocorre quando o vertedouro não tem capacidade adequada a situações de precipitações, como consequência a água ultrapassa a crista da barragem. Assim, se inicia a erosão do talude de jusante que pode provocar a formação de brecha de ruptura gradativamente e global, como aconteceu na Barragem de Terra de São Francisco (Figura 8) (LAURIANO et al, 2017).

Figura 8-Barragem São Francisco- Mirai



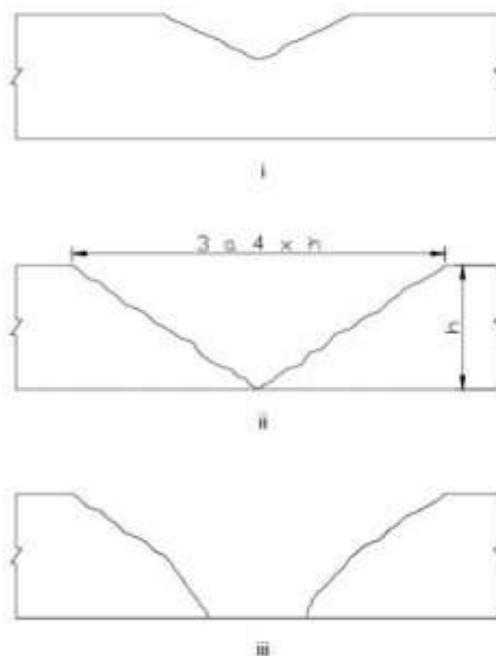
Fonte: ROCHA, 2015 apud LAURIANO, et al, 2017

Lauriano (2017) afirma que a principal causa de rupturas de barragens de terra consiste na ultrapassagem da cota do maciço da barragem. É notado pela ocorrência de sismos ou consequência de ondas que formam na represa gerando uma área frágil que se torna suscetível a erosões atingindo a base do aterro (LAURIANO et al, 2017).

A dimensão da brecha de ruptura depende da duração do galgamento, essa duração pode ocorrer em diversos estágios (Figura 9). O primeiro estágio é procedente quando a vazão do vertedouro é insuficiente sobre condições adversas não previstas em projeto, posteriormente a água ultrapassa sobre a crista da barragem ocasionando o

início de uma erosão que contribui para formação da brecha, em consequência em ritmo constante provoca a formação da ruptura global (LAURIANO et al, 2017).

Figura 9-Evolução da brecha



Fonte: LAURIANO, 2017

A probabilidade de galgamento pode ser prevista, verificada e monitorada através do julgamento de descrições verbais estabelecidos conforme Lauriano et al. (2013).

#### 2.4.2.2 Vazamento e *piping* no aterro e na fundação

*Piping*, ou também erosão regressiva, é quando a água de percolação escava um túnel ou tubo através do aterro podendo levar ao tombamento da barragem. É comum encontrar esse tipo de erosão em barragens construídas com solos de baixa qualidade e com grande permeabilidade (FAO, 2011). O *piping* é diferente da erosão superficial pois acontece internamente ao maciço e contrário ao sentido do fluxo (AZEVEDO, 2005 apud SUGIMOTO, 2014).

Nas barragens é comum à passagem de água através do maciço ou da fundação, isso se chama infiltração (Figura 10). Contudo, a infiltração torna-se perigosa para a estrutura da barragem quando os materiais do maciço ou da fundação são carregados

pela água em direção a saídas não protegidas, formando vazios (erosão interna ou *piping*) ou quando a pressão de percolação é excessiva (MIRANDA, 2016).

Caputo afirma sobre as pressões excessivas que:

Se as pressões de percolação tornaram-se excessivas, pode-se dar carregamento de partículas finas do solo no ponto onde a água emergir no corpo da barragem ou no terreno de fundação, se este for mais permeável que a própria barragem. Desse modo, vai-se formando, dentro da barragem ou na sua fundação, um orifício cada vez maior e em forma de tubo. Esse fenômeno denomina-se erosão tubular ou “*piping*” e pode comprometer a estabilidade da barragem, podendo destruí-la completamente (CAPUTO, p. 417, 1973).

Figura 10-Esquema de infiltração em uma barragem



Fonte: MIRANDA, 2016

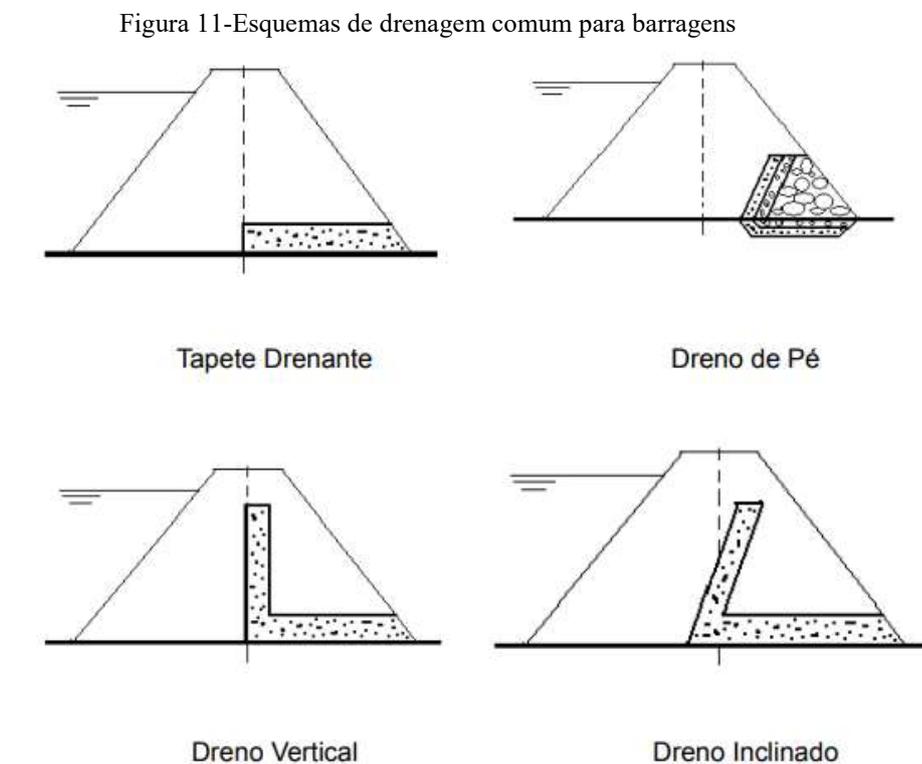
As infiltrações pelo corpo da barragem ou pela sua fundação prejudicam a estabilidade da barragem e as altas pressões de percolação devem ser observadas com cautela para garantir a segurança da construção (OLIVEIRA, 2008).

Para evitar o *piping* no corpo da barragem é necessário reduzir a velocidade de infiltração e facilitar a saída de água. No corpo da barragem, a correta instalação do sistema de drenagem interna orienta o percurso da água percolada e aumenta a segurança contra este problema (CAPUTO, 1973). Na fundação é necessário instalar um tapete drenante a montante e uma trincheira de vedação ou a construção de poços de alívio. Quando são utilizados os três métodos de prevenção em conjunto, drenagem no talude, tapete e trincheira de vedação, são mais eficazes contra a percolação (OLIVEIRA, 2008).

Para Massad (2003) a maioria dos acidentes com barragens de terra ocorreu pela falta de um sistema de drenagem eficiente. Os sistemas de drenagem interna são os responsáveis pela estabilidade das barragens de terra. Eles regularizam a saída do fluxo

da barragem e da fundação, diminuindo as pressões e controlando seu escoamento para a jusante da barragem. Para a construção de sistemas de drenagem eficiente são necessários materiais com alta permeabilidade e geralmente são utilizados areias, pedregulhos e pedras britadas (ARAUJO, 2013).

Existem diversos dispositivos de drenagem em barragens de terra e a seleção correta deve ser feita analisando os requisitos básicos que satisfaçam as condições de percolação da barragem que será construída. Os principais dispositivos de drenagem utilizados no controle de percolação através do maciço de barragens são: dreno chaminé (vertical ou inclinado), tapete drenante, trincheira drenante e dreno de pé. (ARAUJO, 2013).

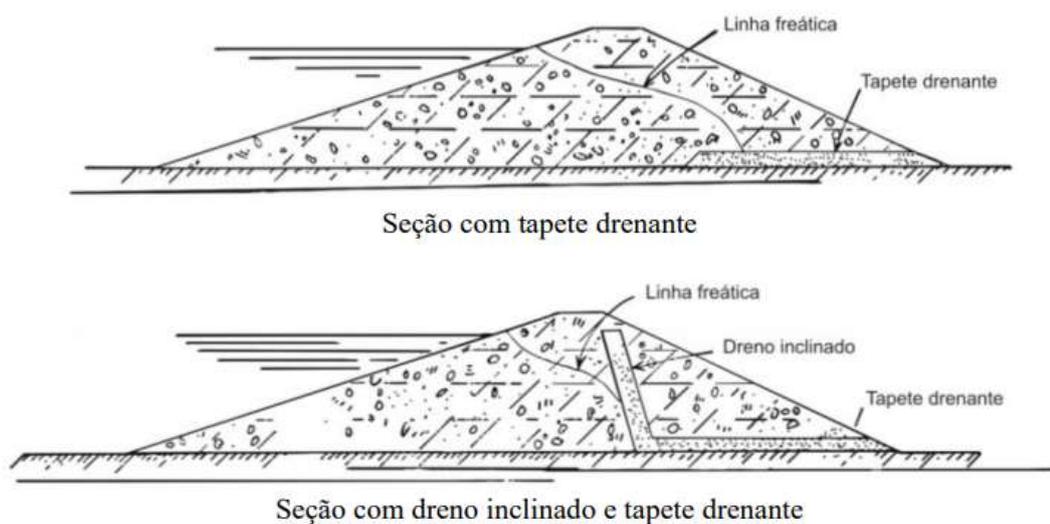


Fonte: MEIRELLES, 2013

Os tapetes drenantes (Figura 12) são os drens mais utilizados em barragens. Sua função é conduzir para o pé de jusante da barragem as águas coletadas pelo dreno chaminé (vertical) e as percoladas pela fundação com o propósito de proteger o maciço contra os efeitos da erosão interna. O dreno possui largura, altura e comprimento constantes o que permite o fluxo de escoamento uniforme (CRUZ, 1996 apud ARAUJO, 2013). Para a utilização do tapete drenante em barragens de terra é recomendado associá-lo a drens verticais. Em barragens de terra é comum a

estratificação das camadas do solo devido à diversidade de materiais utilizados no aterro. Quando ocorre a compactação da terra, as partículas de solo tendem a se alinhar horizontalmente possibilitando a ocorrência de permeabilidade horizontal diferente da vertical. Portanto, para um solo estratificado a implantação somente de tapete drenante não é suficiente para prevenir a ruptura por *piping* (CEDERGREN, 1989 apud ARAUJO, 2013).

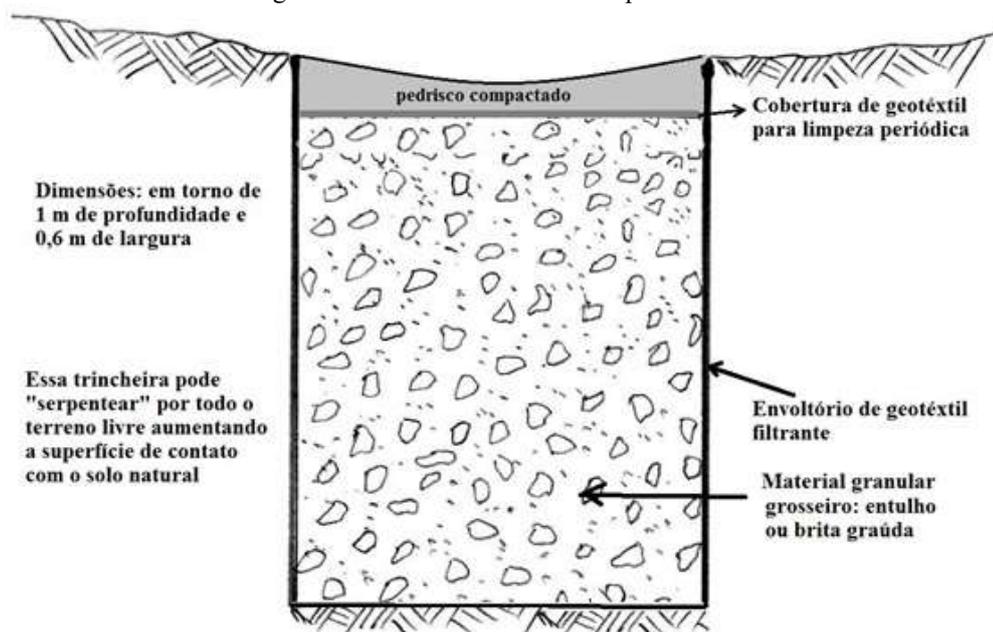
Figura 12-Barragens de terra homogênea com tapete drenante



Fonte: USBR, 2002

A função da trincheira drenante é interceptar os fluxos de água através de camadas permeáveis mais superficiais da fundação. Quando a permeabilidade vertical das camadas é baixa, é recomendada a construção da trincheira (Figura 13) para garantir o acesso da água ao tapete drenante ou ao dreno de pé. A trincheira pode ser construída a jusante da barragem para captar, reunir e escoar as águas provenientes de surgências que são diagnosticadas durante e após preencher o reservatório (TEIXEIRA, 2017).

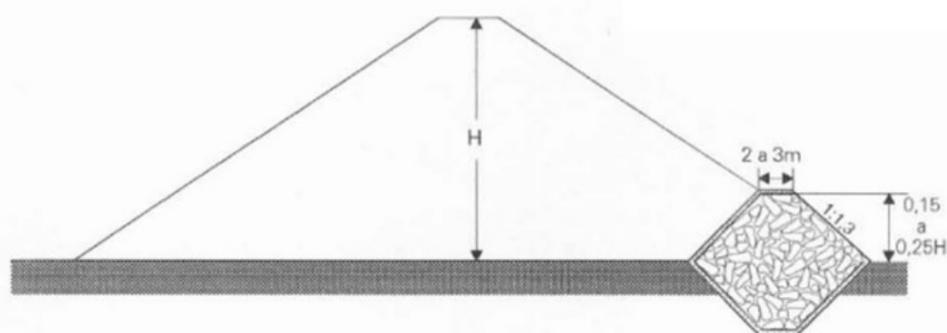
Figura 13- Trincheira drenante simples



Fonte: TEIXEIRA, 2017

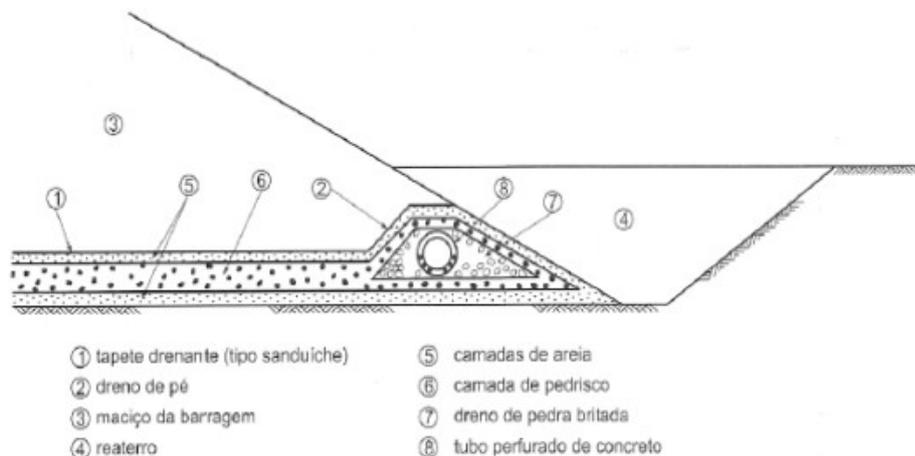
O dreno de pé (Figura 14) é uma estrutura auxiliar de drenagem e constitui em um dreno longitudinal que coleta as águas vindas do dreno chaminé ou tapete drenante e transfere para o rio à jusante da barragem. Quando a vazão nos drenos de pé é muito grande, tubos de concreto perfurados são colocados no interior, para aumentar a área de escoamento e reduzir o volume de materiais drenantes. A passagem dos materiais do tapete drenante para o dreno de pé é composto por materiais com granulometria intermediária, pois assim ocorre a correta permeabilidade e estabilidade (TEIXEIRA, 2017).

Figura 14- Dreno de pé



Fonte: TEIXEIRA, 2017

Figura 15- Corte com sistema de drenagem



Fonte: ROMANINI, 2016

Um exemplo de acidente ocasionado por *piping* foi a ruptura da barragem de terra no Rio Teton (EUA). Com a construção concluída no ano de 1975, seu enchimento ocorreu até 1976, quando aconteceu a ruptura. A barragem possuía 93 metros de altura e volume do reservatório de 356 hm<sup>3</sup> e o rompimento ocorreu pela erosão interna provocada pela percolação de água através do maciço. Não levou mais de 2 horas entre a detecção do problema e o rompimento da barragem (Figura 16) e ocasionou a morte de onze pessoas (ARTHUR, 1976 apud AGUIAR, 2014).

Figura 16- Evolução do fenômeno de piping na barragem de Teton (EUA)



Fonte: Department of Earth Science – UC Santa Barbara apud Aguiar, 2014

#### 2.4.2.3 Falta de proteção de taludes

Os taludes das barragens de terra devem estar estabilizados para evitar a ruptura e assegurar a segurança da estrutura da barragem. A NBR 11682 (ABNT, 1991) dita as exigências no estudo e no controle de taludes, além de condições para a elaboração correta do projeto, execução, controle e conservação na construção de contenção de taludes (BARBOSA, 2014).

O talude de montante deve ser protegido contra a ação das ondas e correntes que podem dar início a uma erosão. Normalmente, esse tipo de proteção é feita com revestimento de rochas, conhecido como *rip-rap* ou enrocamento de proteção (Figura17), mais comum em taludes a montante. Já os taludes de jusante podem ter a proteção revestida por vegetação ou *rip-rap*. Em barragens de terra é comum a utilização de gramíneas (Figura 18) no talude de jusante devido ao baixo custo (BARBOSA, 2014).

Figura 17- Talude a montante protegido por rip-rap



Fonte: CARVALHO, 2011

A NBR 11.682 (ABNT, 1991) recomenda que a proteção dos taludes seja feita com vegetação nativa ou que se utilize técnicas para adequar a vegetação ao ambiente. A presença de plantas aumenta a infiltração de água no solo, diminui o impacto da chuva e auxilia na prevenção de erosões (BARBOSA, 2014).

Figura 18- Talude a jusante protegido por gramíneas



Fonte: OLIVEIRA, 2008

#### 2.4.2.4 Adensamento e recalque

Recalque é um fenômeno caracterizado pelo rebaixamento vertical da estrutura devido ao adensamento do solo sob sua fundação, pode agravar a estabilidade da estrutura causando trincas e rachaduras (brechas), geradas por esforços não previstos em projeto (ALMEIDA, 2017). O recalque pode existir por três parcelas:

- Recalque imediato ( $S_i$ ) acontece por causa de compressão dos gases (solos não saturados). É verificado por meio de fórmulas empíricas e/ou Teoria da Elasticidade Linear. O  $S_i$  geralmente não provoca problemas as obras com fundações rasas (sapatas, blocos e radier);
- Recalque por adensamento primário ( $S_c$ ) exige maior atenção para solos argilosos por ocorrem no decorrer de um tempo longo, podendo ocasionar o aparecimento de esforços e solicitações na estrutura que não foi analisada e prevista. É calculado utilizando a teoria unidimensional de Terzaghi;
- Recalque por compressão secundária ( $S_s$ ) quase sempre não é considerado, e frequente ocorrer em períodos grandes de tempo de forma que o conjunto da estrutura da barragem em sua maioria consegue se adequar às novas solicitações surjam.

Os recalques podem causar diversos tipos de anomalias ao talude, o fator mais preocupante a segurança é ocorrência Recalques diferenciais (apresentam valores de recalques muito distintos). Contudo existe a possibilidade de sofrer formação de fissuras e aberturas que podem ocasionar o colapso da barragem de terra afirma Cardia (2013) e Kuperman (2013), conforme Figura 19.

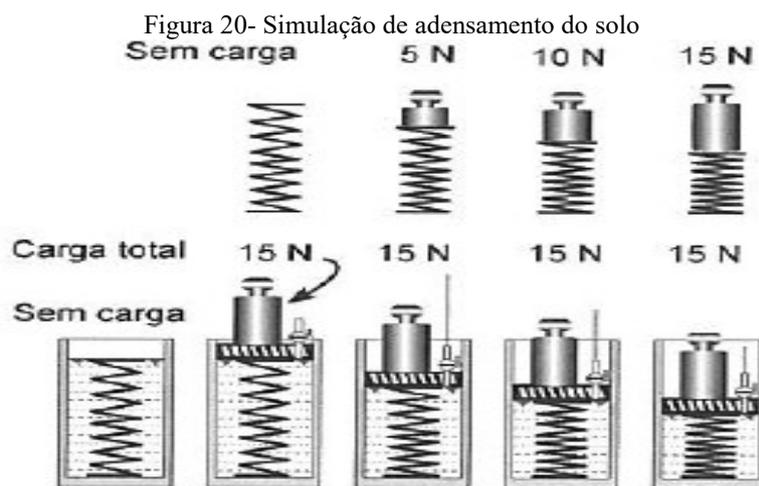
Figura 19- Colapso por recalque diferencial



Fonte: ANA, 2013

O adensamento do solo consiste na diminuição de seus vazios em função da expulsão da água presente no interior. Esse processo depende de variáveis devido carregamentos e tensões atuantes no solo no decorrer do tempo (PINTO, 2006).

O processo de adensamento pode ser compreendido pela analogia fundamentada por Terzaghi (TAYLOR, 1948) a análise o solo como semelhante a uma mola após a aplicação de cargas e a deformação gerada (Figura 20).



Fonte: PINTO, 2006

“O solo saturado seria representado por uma mola dentro de um pistão cheio de água, no êmbolo do qual existe um orifício de reduzida dimensão pela qual a água só passa lentamente a pequena dimensão representa a baixa permeabilidade do solo” afirma Pinto (2006).

Considerando a aplicação de uma carga decorrente de um adensamento é possível verificar que a carga aplicada é proporcional à deformação (Figura 20). Ao realizar a aplicação de uma carga sobre o pistão é observado que a mola não se deforma devido a ausência da saída de água que é menos compreensivo que a mola. Com a saída da água imediatamente provoca a deformação da mola a uma determinada quantidade (15 KN), explica Pinto (2006).

Com base no ensaio (Tabela 2) é possível analisar a percentagem de adensamento devido o fator carga suportada pela mola e água.

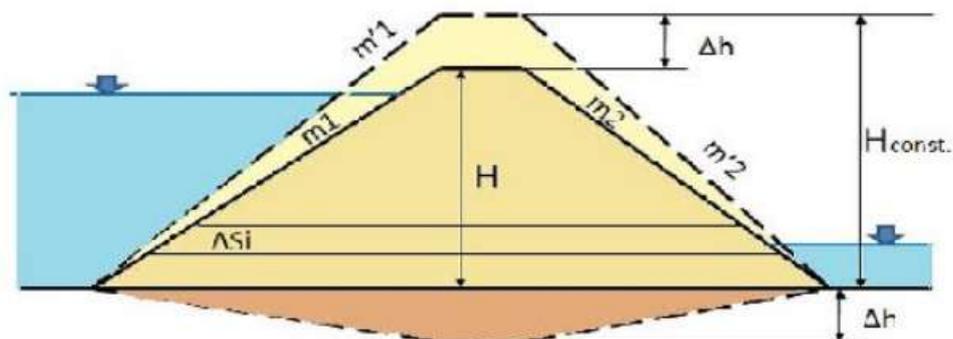
Tabela 2- Análise da percentagem de adensamento

Carga suportada pela água	0	15	10	5	0
Carga suportada pela mola	0	0	5	10	15
Percentagem de adensamento		0	33	67	100

Fonte: PINTO, 2006

A carga decorrente do tempo permitirá o rebaixamento da estrutura. Para barragem de terra é uma situação desfavorável, na qual a barragem perderá sua altura (Figura 21) ocasionando galgamento da barragem (MEIRELLES, 2013).

Figura 21- Adensamento de barragem de terra

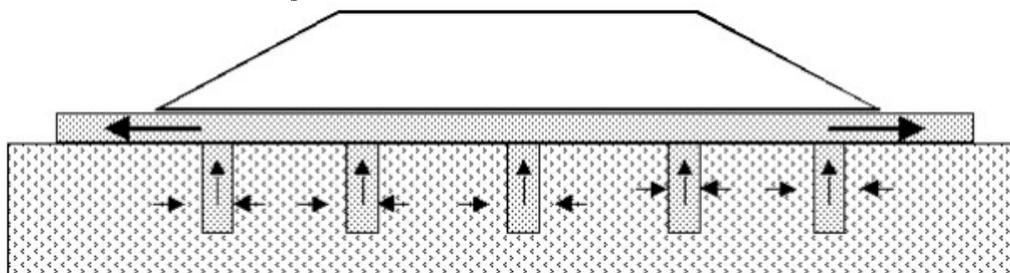


Fonte: SANDOVAL, 2011 apud MEIRELLES, 2013

A variação da altura pode ser resolvida com o adicionamento de uma altura extra em seu dimensionamento. (MEIRELLES, 2013).

A desaprovação na escolha da adição de altura de segurança é possível acelerar o adensamento com a drenagem do terreno por drenos verticais de areia com colchão de areia. Esse método é realizado em poços verticais que serão preenchidos com areia. Na cota máxima desse poço é colocada uma camada de areia, que será adensada pelo próprio aterro, permitindo assim a drenagem e adensamento da barragem, afirma Meirelles (2013) como apresentado na Figura 22.

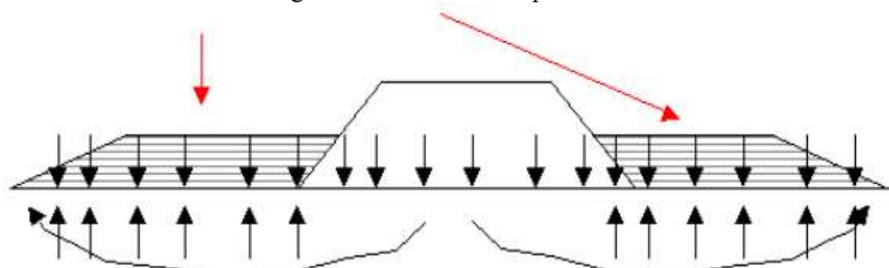
Figura 22- Drenos verticais e colchão de areia



Fonte: ALMEIDA, s.d apud MEIRELLES, 2013

Ao não optar pelo aumento da altura como fator de segurança e/ou a técnica de dreno é possível realizar a remoção dos solos moles presentes na fundação da barragem. É necessário prever bermas de equilíbrio para que os aterros anteriores e posteriores não realizem deslocamento do material instável (Figura 23) na fase de dimensionamento, afirma Meirelles (2013).

Figura 23- Bermas de Equilíbrio



Fonte: ALMEIDA, s.d apud MEIRELLES, 2013

“Por outro lado, resultam em um aumento considerável do volume do aterro. Por fim, pode-se aumentar o peso do aterro, causando uma sobrecarga na fundação. Depois de verificada a inexistência de recalques, o excesso de aterro pode ser removido” (MEIRELLES, 2013).

#### 2.4.2.5 Problemas Construtivos

As barragens estão sujeitas a deterioração por diversos fatores internos e externos. Essas anomalias estão relacionadas com a localização da obra, falhas no dimensionamento de projeto, no sistema operacional da barragem, na verificação na falta de recursos para a realização de pesquisas prévias dos materiais e fundação da barragem (CARDIA; KUPERMAN, 2013).

Os problemas construtivos são comuns devido a fatores de projeto que ocasionam diversas consequências estruturais para a barragem, mesmo quando não envolvem perdas humanas e catástrofes ambientais, de tal modo geram um alto dano econômico de reparo e/ou reconstrução (ROMANINI, 2016).

Segundo Piasentin (2013) a incidência de falhas no projeto é o principal causador de anomalias na barragem. Esse fenômeno é verificado pela não investigação adequada de propriedades geomecânicas, hidráulicas e a não previsão de possíveis situações na fase de projeto, comprometendo a execução da obra (ROMANINI, 2016). As falhas na fase de projeto podem ser verificadas de tal modo através de escolhas inadequadas de materiais e/ou dimensionamentos de capacidades reduzidas, esses fatores podem deteriorar a estrutura da barragem mais rápido que o comum, afirma a Agência Nacional de Águas (2013).

“Uma das principais ocorrências em barragens seria a falha no dimensionamento de materiais para atuarem como filtro, dessa forma o carregamento de materiais do maciço e/ou das fundações para o filtro. A incapacidade de escoamento do fluxo poderia provocar instabilidade, pelo aumento da pressão e busca de novos caminhos de saída, alterando a rede de fluxo” (CARDIA; KUPERMAN, 2013).

Um dos fatores bem comum analisados por Cardia (2013) é a não adequação minuciosa dos ensaios de amostras conforme parâmetros estabelecidos pelas exigências normativas ABNT e/ou normas internacionais e por pessoas em suas atribuições de conhecimentos, podem abrir brechas para estruturas mais frágeis que as normalmente verificadas em projeto (CARDIA; KUPERMAN, 2013).

Falhas no processo de construção estão diretamente ligadas com equívocos na fase de projeto. O dimensionamento utilizando materiais inadequados que não são submetidos a ensaios laboratoriais de eficiência pode prejudicar a vida útil da barragem e propiciar problemas na execução, todavia na estabilidade da estrutura, sendo que foi dimensionada conforme as situações de projeto. Nas barragens a falta de fiscalização periódica propicia na perda da qualidade da obra e a discordância com os parâmetros de projeto analisados (CARDIA; KUPERMAN, 2013).

Na execução da obra é possível verificar algumas anomalias, principalmente nos períodos chuvosos em que podem ocasionar trechos sem a compactação desejada, provocando a divergência com a resistência projetada detalhada no projeto. O excesso da movimentação de veículos pode acarretar na supercompactação do trecho mais que o previsto ANA (2013).

As principais causas de acidentes em barragens devido à elaboração, execução e compatibilização estão relacionadas com problemas na fundação ocasionada por erosões. Segundo Piasentin (2013) 70% das rupturas ocorrem nos primeiros dez anos de vida da barragem, essas rupturas deverão ser previstas e verificadas no projeto de dimensionamento da barragem e monitoramento pós-obra.

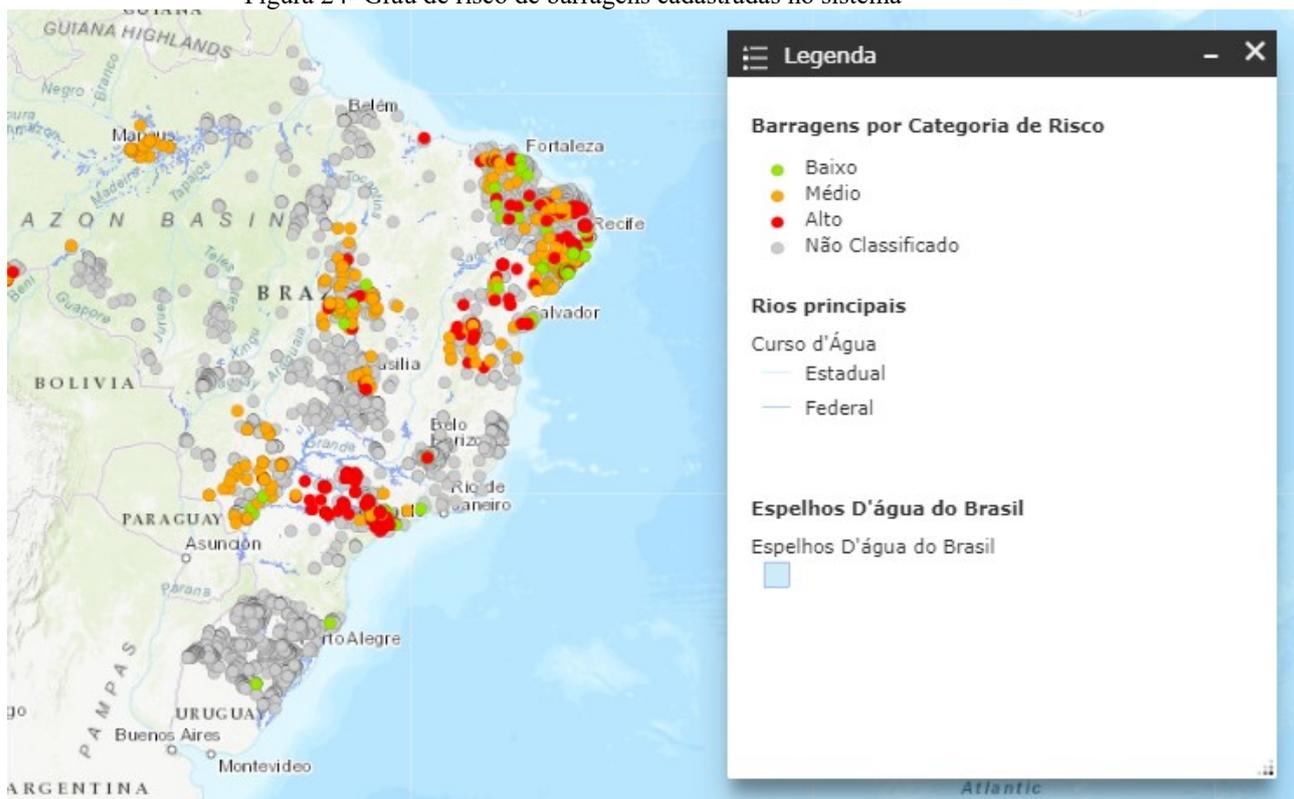
As barragens não são regidas somente pelo seu dimensionamento. A execução conforme preestabelecido em projeto é fundamental para o monitoramento e manutenção da barragem ao longo de sua longevidade conforme estudos de Piasentin (2013).

Segundo Piasentin (2013), a previsão de rupturas e recalques de qualquer natureza deverá ser previsto e analisados realizando o ajustamento entre o projeto estrutural e fundação. A compatibilização desses dois projetos é essencial para evitar

possíveis impactos sociais e ambientais. Deve-se garantir a qualidade em todos os procedimentos da obra desde a escolha dos materiais a execução da construção. Para Piasentin (2013) o controle e gerenciamento são importantíssimos para garantir a durabilidade da barragem.

Uma pesquisa no Sistema Nacional de Informação de Segurança de Barragens (SNISB) mostra que o número de barragens cadastradas para monitoramento no Brasil é de 3994. Essas barragens são caracterizadas e classificadas pelo risco de ruptura. No Brasil existem diversos casos de probabilidade de ruptura desde baixo e alto risco. Se todos os procedimentos desde o projeto, a execução e o pós-obra fossem realizados com parâmetros de qualidade e conforme prescrições normativas, esses riscos poderiam ser bem menores viabilizando barragens seguras. A seguir é apresentada a verificação da classificação de barragens conforme risco de ruptura (Figura 24).

Figura 24- Grau de risco de barragens cadastradas no sistema



Fonte: ANA, 2019

O risco de ruptura da barragem pode ser averiguado sobre três vertentes: baixo, médio e alto. O baixo risco é ocasionado por pequenos problemas que não prejudica a estabilidade da estrutura como verificado no médio. O alto risco apresenta condições de

rupturas globais em curto e médio prazo, conforme as condições e necessidades da estrutura (ANA, 2019).

É possível verificar diversas barragens no território brasileiro devido a sua grande extensão hídrica. A quantidade de barragens que não são classificadas é inúmera, de tal modo essas barragens são sujeitas a condições de vulnerabilidade como fatores de fissuras e rupturas, devido não possuírem nenhum tipo de monitoramento de sua condição estrutural e a incidência de problemas construtivos no decorrer de sua vida de utilização pode ser imensurável.

Segundo Carvalho (2008) a quantidade de barragens pequenas de terra construídas em propriedades rurais ao longo de toda extensão territorial é grande, essas são apresentadas sem um sistema construtivo técnico e não atendem aos critérios de segurança, assim estão sujeitas a problemas diversos após sua execução. Esse fato é cada vez mais comum para reduzir os custos das obras.

### 3 ESTABILIDADE DE TALUDES

Neste capítulo será descrito a definição de taludes e dos parâmetros de que influenciam na sua estabilidade, além de apresentar três métodos de cálculo do Fator de Segurança pelo método do Equilíbrio Limite, são eles: Fellenius (1936) e Bishop (1955).

#### 3.1 Definição

“Talude é um termo genérico, compreendendo qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos. Pode ser natural, caso das encostas ou vertentes, ou artificial, quando construído pelo homem, caso dos cortes e aterros”. (FIORI, 2015). A Figura 25 apresenta um talude de jusante de uma barragem.

Figura 25- Talude da barragem Casa de Pedra em Congonhas-MG



Fonte: MENDES, 2019

O talude é submetido a três ações: ao peso próprio dos materiais, ao escoamento da água e a resistência ao cisalhamento.

Para projetar uma barragem é necessário realizar a análise da estabilidade dos taludes a montante e a jusante. O Ministério da Integração Nacional (2002) determina que os devem assegurar sua estabilidade sobre qualquer tipo de ação e quaisquer níveis de reservatório: nível normal máximo ou nível normal de operação.

A estabilidade dos taludes de uma barragem deve ser verificada sobre quatro condições ao longo do seu tempo de vida útil, são elas: ao final da construção, no

regime permanente de operação com o nível d'água máximo do reservatório, no rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório e sob a ação de sismo, afirma Miranda (2013).

A Tabela 3 indica, de acordo com Cruz (2004), os fatores de segurança mínimos que devem ser adotados para a verificação da estabilidade dos taludes.

Tabela 3- Fatores mínimos de segurança

Condição de solicitação	Talude	FS mínimos	
		Seção homogênea	Seção terra-enrocamento
Final de construção	Montante	1,3	1,2
	Jusante	1,3	1,2
Regime permanente de operação	Montante	1,5	1,3
	Jusante	1,5	1,3
Rebaixamento de reservatório *NA máx – NA min	Montante	1,1	1,0
	Montante	1,0	1,0
*NA máx – sol. Vertedouro			
Qualquer condição para verificação da estabilidade para resistência residual	Montante	1,2	-
	Jusante	1,2	-

Fonte: CRUZ, 2004

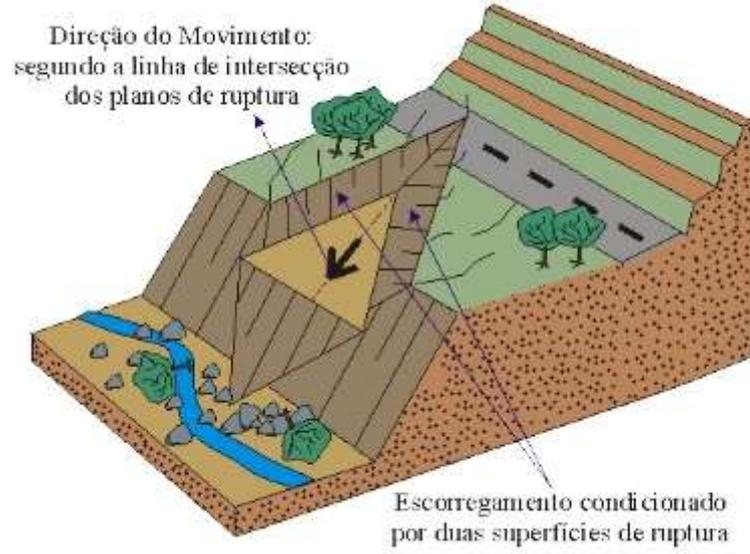
A análise dos fatores de segurança e elementos do talude é crucial para a barragem, pois a realização de cortes nos taludes condiciona a movimentação de terra (escoamento, subsidência e escorregamento), favorecendo que a tensões de cisalhamento limite ultrapasse a resistência do material provocando a ruptura da estrutura (MARANGON, 2004).

As principais causas dos escorregamentos verdadeiros e movimentação nos taludes são regidas por fatores externos e internos, as superfícies de rupturas podem ser cilíndricas ou planares. São, portanto, os únicos que submetem a análises estáticas por meio de modos de equilíbrio-limite (DOMINGOS, 2016).

Os fatores externos são aqueles que alteram de algum modo o estado de tensões atuantes sobre o maciço, como o aumento da inclinação do talude, sobrecarga na crista e efeito sísmico. Em contrapartida os fatores internos são causados por ações que diminuem a resistência ao cisalhamento do solo, como decréscimo da coesão e aumento da pressão neutra, afirma Domingos (2016).

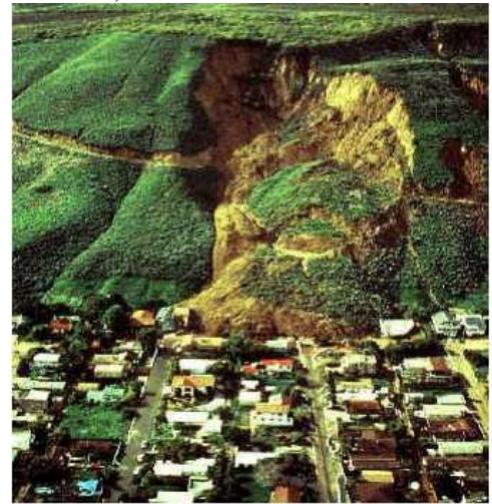
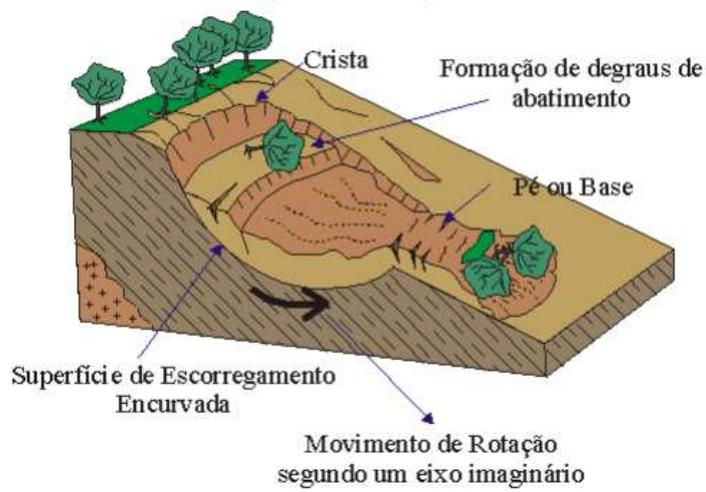
Os principais escorregamentos massa são: cunha (Figura 26), circular (Figura 27) e translacional (Figura 28):

Figura 26- Escorregamento cunha



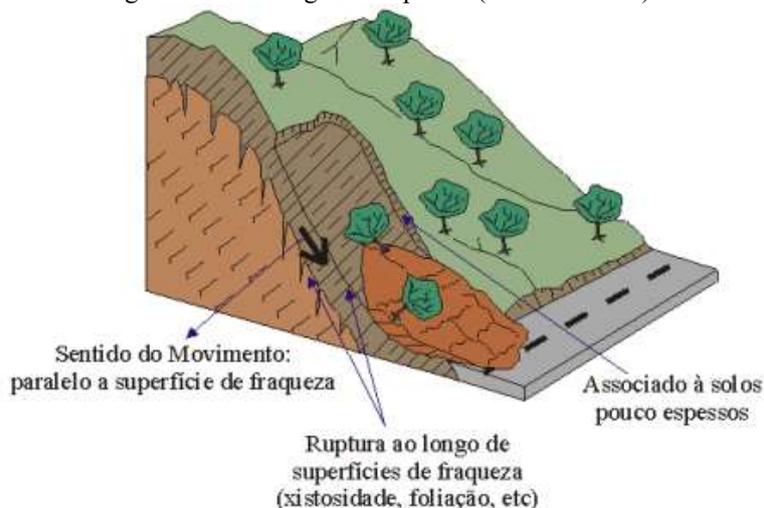
Fonte: INFANTI; FORNASARI, 1998

Figura 27- Escorregamentos circulares (Rotacionais)



Fonte: INFANTI; FORNASARI, 1998

Figura 28- Escorregamento planar (Translacionais)



Fonte: INFANTI; FORNASARI, 1998

Ao analisar a estabilidade de um talude e movimento de massa (cunha, circular e planar) é verificado que a superfície de ruptura depende da natureza e propriedades dos materiais constituintes, que podem ser perturbadores de agentes geológicos e geotécnicos do talude, menciona Fiori (2015).

Conforme Massad (2003) as principais ocorrências de escorregamentos são: modificação na geometria do talude por corte ou escavações, proporcionando o aumento de sua inclinação; colocação de sobrecargas no topo das encostas; infiltração de águas de chuvas, que podem ocasionar as poro-pressões no talude, consequentemente reduzindo a resistência cisalhante do solo; desmatamento e destruição da vegetação que pode ter um papel importante na estabilização das encostas, devido absorção de águas de chuva e reforçam o solo com suas raízes.

### 3.1 MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE

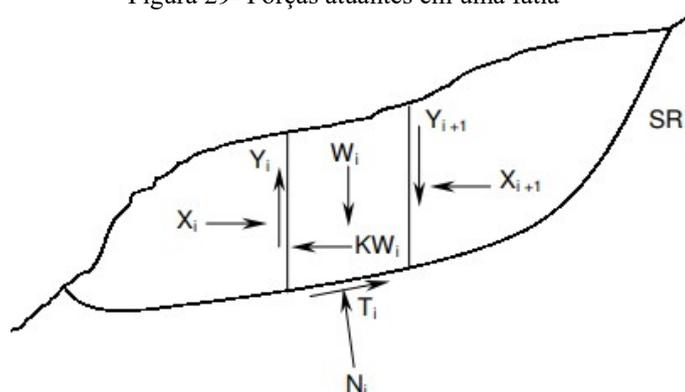
#### 3.1.1 Fellenius

O método de equilíbrio foi desenvolvido pelo sueco Wolmar Knut Axel Fellenius (1936) e originalmente criado para estudar solos saturados, sendo ampliado para os demais solos em condições de análise de tensões efetivas (STRAUSS, 1998). O método “baseia-se na análise estática do volume de material situado acima de uma

superfície potencial de escorregamento de secção circular, e esse volume é dividido em fatias verticais”. (FIORI, 2015).

A Figura 29 demonstra a atuação das forças numa fatia do plano de ruptura circular, onde para obter uma estabilidade deve se levar em consideração o equilíbrio entre as forças verticais, horizontais e os momentos (FIORI, 2015).

Figura 29- Forças atuantes em uma fatia



Fonte: Fiori, 2015

Onde:

$X_i, X_{i+1}$ : Componentes horizontais atuantes nas laterais da fatia.

$Y_i, Y_{i+1}$ : Componente vertical atuante nas laterais da fatia.

$W_i$ : Peso da Fatia.

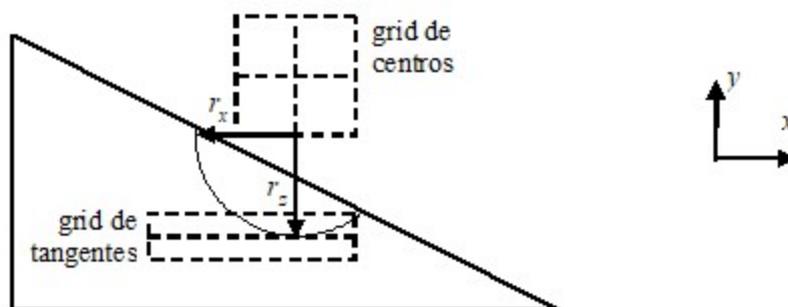
$T_i$ : Força tangencial atuante na base da fatia.

$N_i$ : Força Normal atuante na base da fatia.

O método de Fellenius (1936) se dá por hipóteses simplificadoras aonde as forças resultantes laterais de cada lado da fatia possuem proporções iguais, sendo assim, para determinar o Fator de Segurança utiliza-se apenas o equilíbrio entre os momentos (FIORI, 2015).

O Fator de segurança (FS) é determinado por diversas tentativas de centros e raios, para isso considerando-se um *grid* de centros e tangentes equidistantes, que permitem a determinação do raio que formará o traçado da superfície de ruptura. O FS é dado pelo menor valor obtido nessas tentativas. Essa pesquisa do menor fator de segurança está ilustrada na Figura 30.

Figura 30- Geometria de superfícies de ruptura críticas



Fonte: DOMINGOS, 2016

Aplicando o método de Fellenius, assume a seguinte formulação:

$$FS = \frac{\sum [c' \left( \frac{b}{\cos \alpha} \right) + W \cos \alpha - u \left( \frac{b}{\cos \alpha} \right) \operatorname{tg} \varnothing']}{\sum W \operatorname{sen} \alpha}$$

(Eq. 1)

Onde:

$c'$ : coesão

$u$ : poropressão média na base da fatia

$W$ : peso da lamela

$\varnothing'$ : ângulo de atrito efetivo do solo

O método de Fellenius é conservador e tende a fornecer valores baixos de FS. Em superfícies mais profundas e com índices consideráveis de poropressão é possível encontrar fatores de segurança mais confiáveis (GERSCOVICH, 2009).

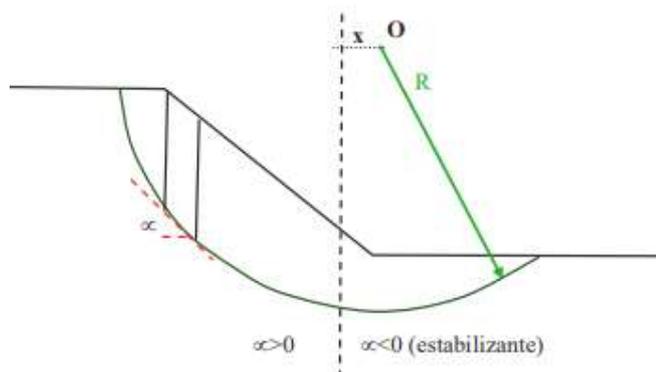
Segundo Gerscovich (2009), existe a incidência das fatias em que o valor  $\alpha$  possa ser negativo, com isso a parcela relativa efetiva todavia é negativa. Nesse caso:

$$N' = (W \cos \alpha - ul) < 0 \quad \therefore N' = 0$$

(Eq. 2)

É possível que ocorra com as fatias finas, com elevado valor de poropressão. Assim sendo, torna-se negativo de fato, conforme prescrito na Figura 31.

Figura 31- Ângulo das lamelas



Fonte: GERSCOVICH, 2009

“O método exposto o fator de segurança é uma relação entre a resistência ao corte real do talude e a tensão de corte crítica que tentam provocar a falha, ao longo de uma suposta superfície” (RODRIGUES JR., 2015):

$$FS = \frac{\text{Resistência ao Cisalhamento Disponível}}{\text{Tensões de Cisalhamento Atuante}}$$

(Eq. 3)

Considerando as fatias nas superfícies circulares onde possui centro de giro e momentos resistentes e atuantes, obtenha-se o fator de segurança da seguinte maneira:

$$FS = \frac{\text{Resistência ao Cisalhamento Disponível}}{\text{Tensões Atuante}}$$

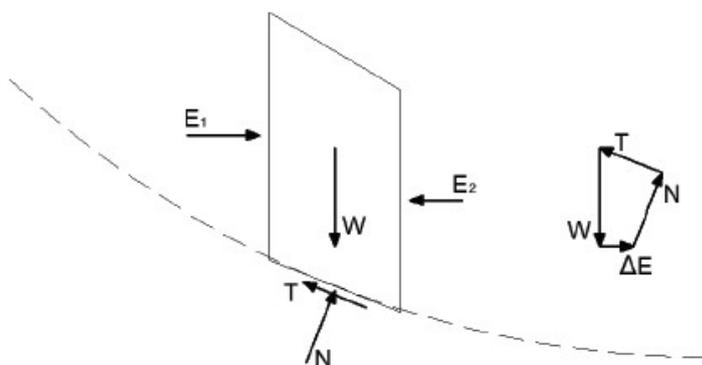
(Eq. 4)

### 3.1.2 Bishop

O método foi proposto por Bishop em 1955 e analisa a estabilidade de um talude utilizando a divisão da cunha de escorregamento em diversas fatias. É uma modificação do método de Fellenius e considera as reações das fatias vizinhas (PEREIRA, 2013).

Inicialmente, o método de Bishop foi desenvolvido para análise de superfície circulares, mas também pode ser utilizado para superfícies não circulares. O método não considera as forças de corte entre as fatias (Figura 32), mas sim o equilíbrio de momentos. Os bons resultados relacionados ao fator de segurança que o método fornece para certas análises fez com que fosse mais estudado. O fato das forças do corte entre as fatias não aparecerem na equação não dizem que são iguais a zero. Isso acontece por assumir uma distribuição adequada das forças de cortes verticais entre as fatias que atenda ao mesmo tempo o equilíbrio de forças horizontais. A reação normal na base é resultado do equilíbrio de forças segundo a direção vertical (SILVA, 2011).

Figura 32- Fatia genérica e polígono de forças no método de Bishop



Fonte: SILVA, 2011

O método de Bishop leva em conta a interação entre várias lamelas onde a resistência mobilizada ( $S_m$ ) é:

$$S_m = \frac{s}{FS} = \frac{1}{FS} [c' + (\sigma - \mu) \cdot \text{tg} \phi'] \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

S: tensões de corte

FS: fator de segurança

$c'$ : coesão

$\sigma$ : tensão normal

$\mu$ : poropressão média na base da fatia

$\phi'$ : ângulo de atrito efetivo do solo

E o fator de segurança (FS) é expresso pela equação:

$$FS = \frac{1}{\sum W \cdot \text{sen } \alpha} \sum [c' \cdot b \cdot \text{tg } \phi' (W - u \cdot b + X_n - X_{n+1}) / M_\alpha] \quad (\text{Eq.6})$$

Onde:

W: peso próprio da fatia

$\alpha$ : inclinação da base de uma fatia

b: largura da fatia

Para a determinação dos valores de  $X_n - X_{n+1}$  são considerados aproximações sucessivas que devem satisfazer a seguinte condição:

$$\sum (W_n - X_{n+1}) = 0 \quad (\text{Eq. 7})$$

A condução da análise de estabilidade deve ser feita por meio de aproximações sucessivas de maneira que possa corresponder todas as equações envolvidas.

#### 4. BARRAGEM DE TERRA DO RIO DOS BOIS

A barragem construída sobre o lago Roberto Caetano (Figura 33) está localizada no município de Leopoldo de Bulhões foi executado na gestão do ano de 1997 a 2000. Possui finalidade de contenção e lazer para o desenvolvimento do município. Todo o deságue do lago é proveniente da bacia hidrográfica Rio dos Bois.

Figura 33 - Espaço geográfico do lago Roberto Caetano



Fonte Google Earth, 2019

Toda a orla do lago municipal é pavimentada com a livre circulação de automóveis nos dois sentidos da pista. É característica a presença de quiosques na direção direita (Figura 34) e locais para a prática de esportes como quadra de areia e campo sintético na direção esquerda. Toda a extensão do lago corresponde a um perímetro de 0,00178 km e área correspondente a 0,13724 km<sup>2</sup> segundo simulação Google Earth (2019).

Figura 34- Localidade do Lago Roberto Caetano



Fonte: Próprio autor, 2019

A barragem de terra está situada no sentido Sudoeste conforme demarcação da Figura 35, onde a poligonal de conteção é verificada no perímetro longitudinal e transversal da bacia. A localização da barragem no município é estabelecida na entrada principal da cidade na proximidade do perímetro 78,5 m.

Figura 35- Localização geográfica



Fonte: Google Earth, 2019



Em análise do relatório é notória a presença de um solo muito mole nos 6 metros iniciais. O solo dominante é argiloso em toda sua extensão, sendo que superior aos 6 metros de profundidade a consistência do solo (conforme Figura 36) torna rijo com a cota altimétrica do furo correspondente a 998 e o nível de água disposto na cota de 1,05 metros.

#### 4.1 VAZÃO DA BACIA HIDROGRAFICA

Todo o volume de água da Barragem é derivado da Bacia Hidrográfica (Figura 38) Rio dos Bois e sub-bacia do Rio do Peixe, com uma extensão de 46 municípios dentre eles 33 possuem áreas urbanas. Essa bacia tem uma área de drenagem de 34.552,04 km<sup>2</sup>, o que corresponde a aproximadamente 10% do território do Estado de Goiás. Situa-se no centro-sul e está contida entre os meridianos 49° 07' e 52° 26' de longitude a oeste de Greenwich e os paralelos 16° e 18° 36' de latitude ao sul do Equador, segundo informações da RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos (2006).

Figura 37- Localização da Bacia Hidrográfica do Rio dos Bois



Fonte: RBRH, 2006

Através de sua extensão geográfica é possível verificar a vazão de referência, com valores obtidos no campo, por meio de medições diretas, ou quantitativas calculadas e verificadas com base em séries históricas de vazão e pluviosidade. De acordo com RBRH (2006, p. 52) “As vazões obtidas a partir de dados de estações pluviométricas e fluviométricas representam com segurança o comportamento de longo termo das vazões da bacia”.

A vazão da Bacia Hidrográficoado do Rio dos Bois foi calculada pela RBRH utilizando o programa RH 3.0, programa computacional que permite a obtenção de vazões máximas, mínimas e média de longo período e curvas de permanência. Os dados computacionais são executados em vazões máximas diárias para períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos, mínimas de duração de 1, 7, 15, 30, 60, 90, 120, 150 e 180. Com base nessa parametrização foram obtidos os seguintes resultados de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4- Vazões alcáveis da Bacia Rio dos Bois

<b>Q<sub>90</sub> (l/s)</b>	<b>Q<sub>95</sub>(l/s)</b>	<b>Q<sub>99</sub>(l/s)</b>
150.000	118.100	55.900

Fonte:GAMA, 2004 apud RBRH, 2006.

A Q90 é a vazão garantida em 90% do tempo, ou seja, cerca de 36 dias por ano esta vazão não é atendida. A Q95 é um grau de segurança maior a respeito do recurso hídrico, sendo que representa a vazão com desabastecimento em cerca de 18 dias por ano:

“Para a determinação da vazão alcável na Bacia Hidrográfica do Rio dos Bois, é necessário observar os critérios adotados pela autoridade outorgante no Estado de Goiás. A Resolução nº 09, de 04 de maio de 2005, aprovada pelo Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Goiás (CERH-GO) estabelecendo o regulamento do sistema de outorga de direito de uso das águas de domínio estadual, determina a adoção da Q95 como vazão de referência” (RBRH, 2006, p. 54).

A Q99 praticamente eliminaria o risco de suspensão dos usos outorgados na bacia, em pouco mais de 03 dias. A vazão do Lago Roberto Caetano atende os mesmos critérios de vazão Q99 com um volume de aproximadamente 46,9 l/s que são escoados em manilhas de 1 metro de diâmetro.

## 5. UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA GEOSTUDIO

Os recursos computacionais são muito utilizados atualmente para auxiliar na solução de problemas em diversas áreas da Engenharia Civil como: Geotecnia, Construção Civil, Hidrotécnica, Sistemas Estruturais e Transportes

Para a simulação e verificação da estabilidade do talude na barragem de terra da cidade de Leopoldo de Bulhões/GO foi utilizado o sistema computacional GeoStudio (Slope e Flux) que analisou a percolação de água pelo interior da barragem de pequeno porte em três situações:

Tabela 5 – Casos analisados e tipos de drenagem

<b>Caso</b>	<b>Tipo</b>
<b>A</b>	Sem sistema de drenagem
<b>B</b>	Dreno de pé
<b>C</b>	Dreno chaminé

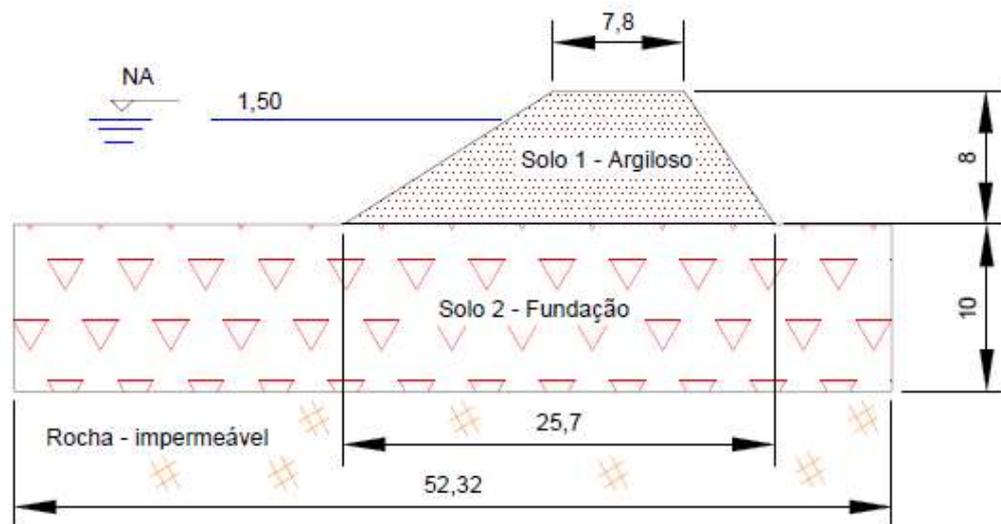
Fonte: Próprio autor, 2019

A barragem de terra apresenta comprimento total de 25,70 metros de montante a jusante. A altura total de 8 metros, largura de crista de 7,80 metros e para a cota da crista foi considerada uma folga de 1,50 metros, denomina da borda livre. O talude de montante (lateral que fica em contato com a água) possui inclinação correspondente 49% e jusante 22%, com respectivamente 1:1,5 e 1:0,48 indicados por V:H ambos, constituídas de material compactado conforme critérios de projeto.

A importância da correta inclinação dos taludes se deve ao fato de assegurar a estabilidade da barragem e controlar a superfície de saturação no seu interior. As inclinações nos taludes de montante a jusante devem ser diferentes para controlar a estabilidade das barragens, além de fatores como o tipo de material que influenciam na inclinação dos taludes. O talude de jusante deve ser dimensionado considerando as pressões neutras que podem se desenvolver no maciço até a finalização da construção e o talude de montante é dimensionado de acordo com o rebaixamento instantâneo do reservatório. No talude a montante de água represada irá exercer esforços sobre sua altura em relação a lamina d'água que deve ser menor e ficar mais próximo do fundo da represa para uma maior estabilidade.

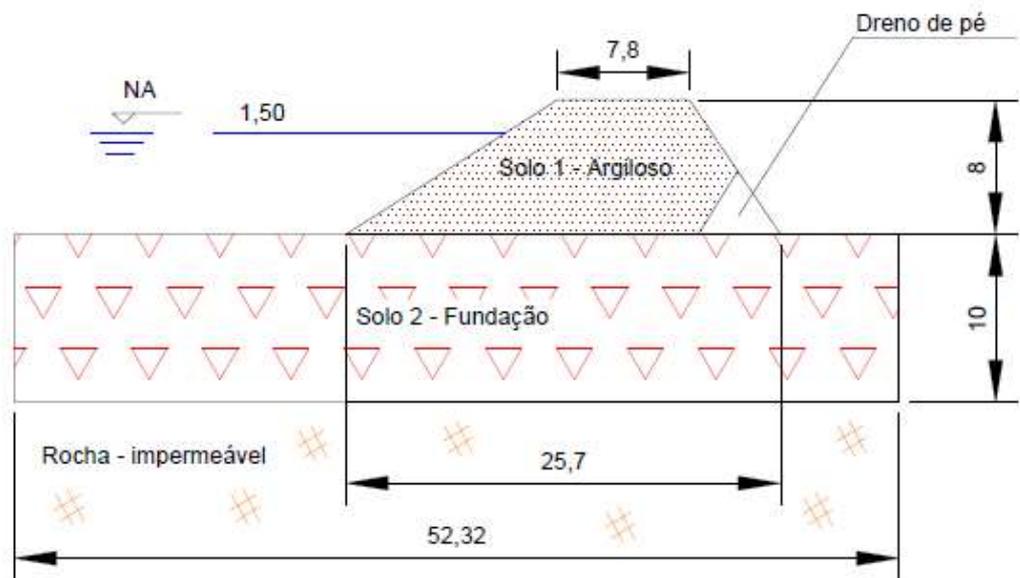
Nas figuras a seguir são apresentados os esquemas, dimensões e aferições sobre os taludes de montante a jusante, com a incidência do nível da lâmina de água da barragem Rio dos Bois – GO:

Figura 38 – Corte esquemático da barragem de terra (Caso A)



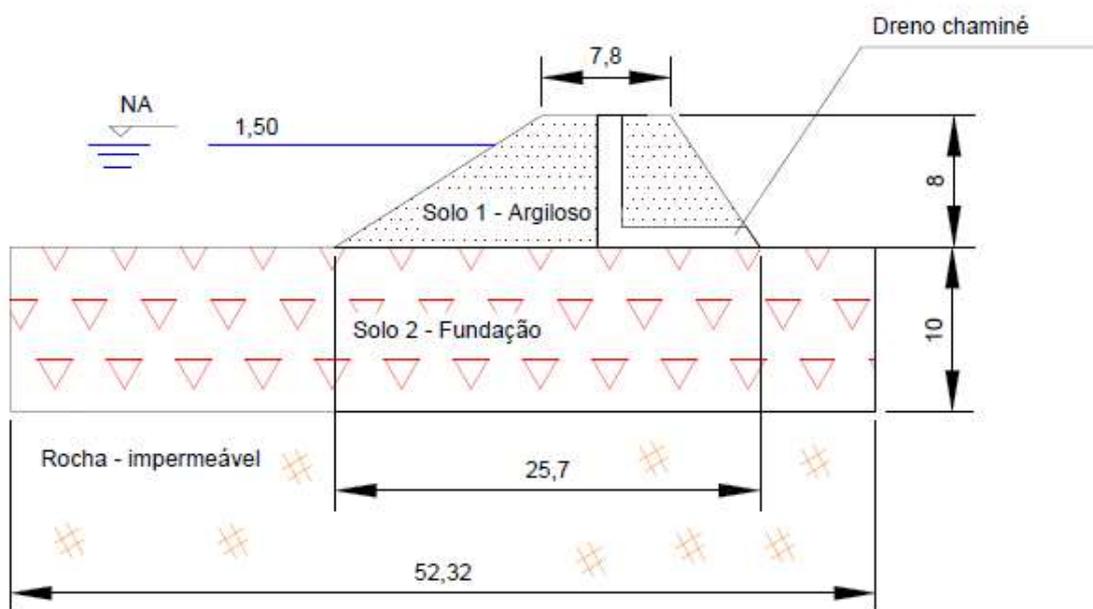
Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 39 - Corte esquemático da barragem de terra com dreno de pé (Caso B)



Fonte: Próprio autor, 2019

Figura 40 – Corte esquemático da barragem de terra com dreno chaminé (Caso C)



Fonte: Próprio autor, 2019

### 5.1. ANÁLISE DOS DADOS POR MEIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Depois de obtidos os parâmetros geotécnicos necessários foram executadas diversas análises de percolação de água no software GeoSlope que determina a linha freática, a vazão no interior do maciço e a percolação pela fundação gerando gráficos de cada situação simulada. As coordenadas utilizadas para o desenho da fundação e do talude foram:

Tabela 6 – Coordenadas da fundação

Fundação	
X	Y
15	20
15	5
70	20
70	5

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 7 – Coordenadas do talude

Talude	
X	Y
30	20
42,5	28
47	28
50,3	28
55,7	20

Fonte: Próprio autor, 2019

Foram realizadas simulações para a verificação da percolação no maciço com a barragem sem sistema de drenagem (Caso A), dreno de pé (Caso B) e filtro chaminé (Caso C). As coordenadas dos drenos são:

Tabela 8 – Coordenadas do dreno de pé

Dreno de pé	
X	Y
53,97	22,61
55,7	20
53,01	20,01

Fonte: Próprio autor, 2019

Tabela 9 – Coordenadas do dreno chaminé

Dreno chaminé	
x	Y
46	28
47	28
47	21
55,06	21
55,7	20
46	20

Fonte: Próprio autor, 2019

Com o resultado da sondagem à percussão (SPT) foi possível verificar que o material da camada da fundação da barragem é uma argila mole e foi considerada uma argila saturada para aplicação no software GeoSlope. O material utilizado na construção da barragem homogênea é uma argila que devido ao processo de compactação se torna uma argila compacta não saturada.

A fundação tem espessura de 10 metros, sendo maior que a barragem, que possui 8 metros de altura, isso se deve ao tipo de solo diagnosticado com a sondagem a percussão (SPT). Na sondagem é possível observar que a argila se torna rija a partir de 7,45 metros de profundidade e muito rija a partir de 10,45 metros. Para uma fundação adequada em barragens de terra é necessário que ela esteja em uma profundidade que alcance o solo mais estável e impermeável.

Na tabela abaixo (Tabela 4) segue os valores do peso específico, coesão e ângulo de atrito da argila saturada, não saturada e argila. Não foi possível ter acesso aos dados reais utilizados na barragem do Lago Roberto Caetano então foram adotados valores de referências bibliográficas.

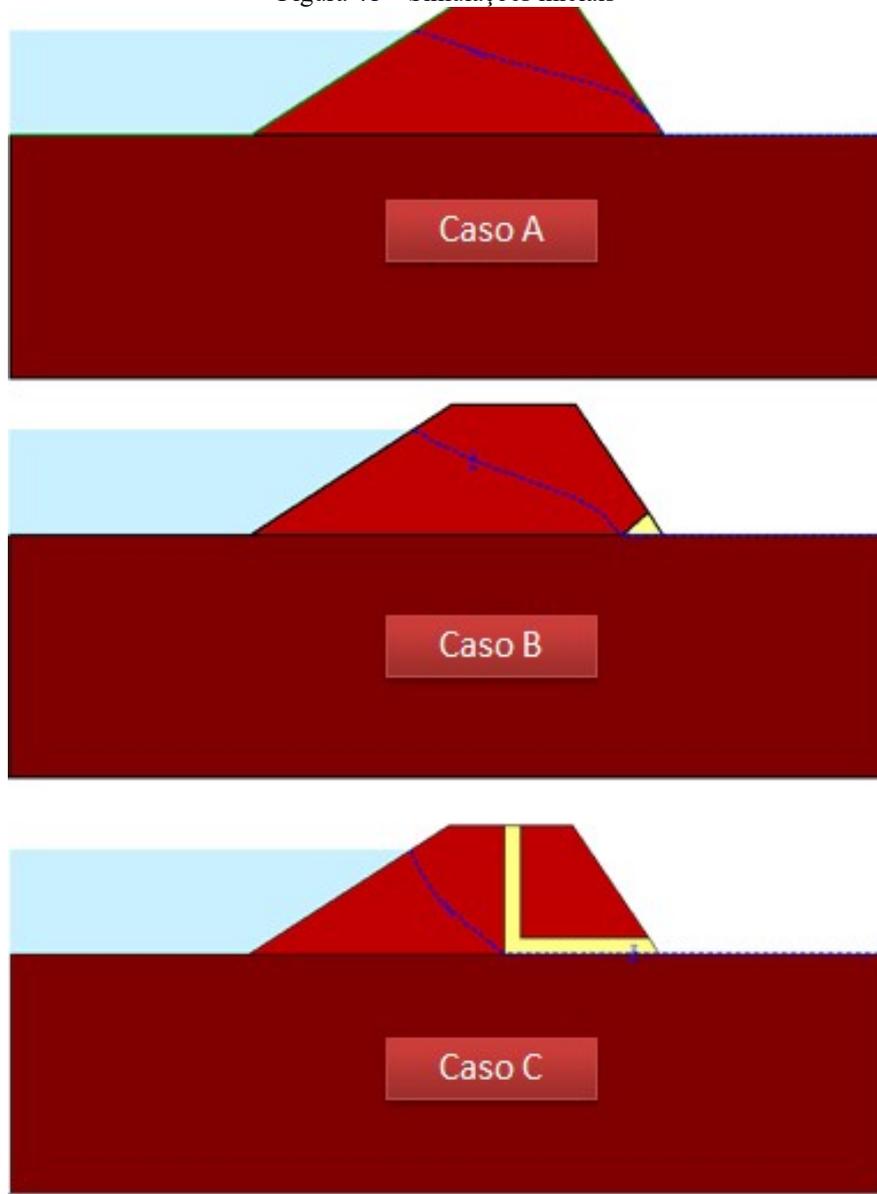
Tabela 10 - Valores utilizados nas simulações

	Argila saturada (Fundação)	Argila não saturada (Barragem)	Areia (Drenos)
Peso específico	17 KN/m <sup>3</sup>	19 KN/m <sup>3</sup>	21 KN/m <sup>3</sup>
Coesão	10 KPa	25 KPa	0
Ângulo de atrito	17,5°	25°	35°

Fonte: Marangon, 2009

Com os recursos computacionais, dados geotécnicos e hidráulicos da barragem sobre circunstâncias distintas, chamados de casos, foram realizadas as seguintes simulações (Figura 41).

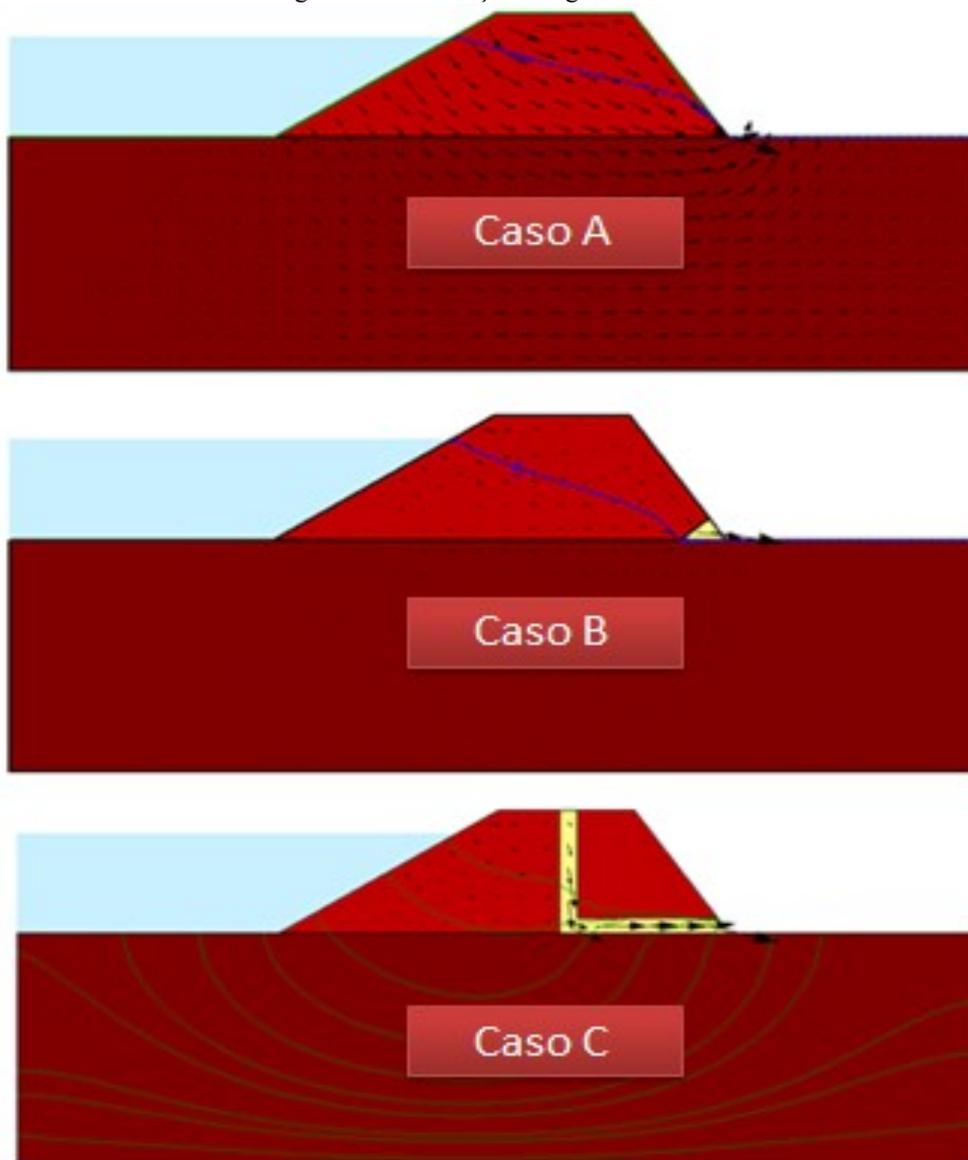
Figura 41 – Simulações iniciais



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012).

A verificação da simulação foi considerada com uma folga de 1,50 metros inferior a crista, sendo que a infiltração de água no maciço é representada pela linha pontilhada azul (linha freática) no interior da barragem. Essa é uma incógnita variável mediante as condições de simulação que lhe foram atribuídas (Figura 42).

Figura 42 – Infiltração de água



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012)

Na incidência de um sistema sem drenagem (Caso A) a linha freática (cor azul), relativa ao fluxo de água é localizada a uma altura peculiarmente alta no talude de jusante, sendo que futuramente poderá ocasionar diversos problemas a barragem (infiltrações, anomalias e vazamentos), ocasionados por precipitações e ondas que

oriundas de altas magnitudes podem causar o fenômeno chamado de galgamento muito prejudicial a estabilidade de barragens de terra, além de inferior que prejudicará completamente o sistema estrutural.

Ao inserir o sistema de drenagem, em particular o dreno de pé (Caso B), no talude de jusante é verificado que a implementação condiciona a diminuição da infiltração em relação ao percentual total de infiltração de água verificado no Caso A (Sem sistema de drenagem). O dreno realiza a captação de água que percolava do maciço e a direcionou ao fluxo de vazão. No Caso B referente ao sistema com dreno de pé é notório o fluxo de vazão sendo representado por setas, em que, quanto maior sua magnitude maior é a força de percolação da água que infiltra no maciço. É importante inferir que no mecanismo de Caso B, a barragem está favorecendo o fator de segurança do talude, garantindo a estabilidade pelo controle de drenagem implementado evitando situações de vazamentos e *piping* no aterro.

Quando é adotado o filtro chaminé (Caso C) na simulação da barragem é possível verificar duas situações distintas de infiltração nos taludes de jusante e montante. No talude de montante a linha freática possui um caminho determinado de percolação sendo direcionada até a estrutura do filtro chaminé. No talude de jusante devido a incidência da captação de toda a infiltração de água no talude a montante o mesmo se torna seco, ou seja, sem a infiltração de água no talude jusante. No sistema de drenagem chamado de filtro chaminé o fluxo de água é captado na estrutura e direcionado o fluxo de água infiltrada pelas setas (Figura 42). Esse sistema comparado ao Caso B (dreno de pé), permite uma drenagem mais consistente e maior devido a dimensão do filtro ser maior que do dreno. Essa variável de infiltração permite obter uma segurança maior levando em consideração os Casos A (sem sistema de drenagem) e B (dreno de pé) analisando as principais porções e problemáticas de uma barragem de terra em vazamento, *piping* e galgamento. Apesar de ser um sistema com maior eficiência o projetista deve verificar as incógnitas de custos na implementação desse sistema, considerando o porte físico e estrutural que a barragem será submetida entre custo x benefício.

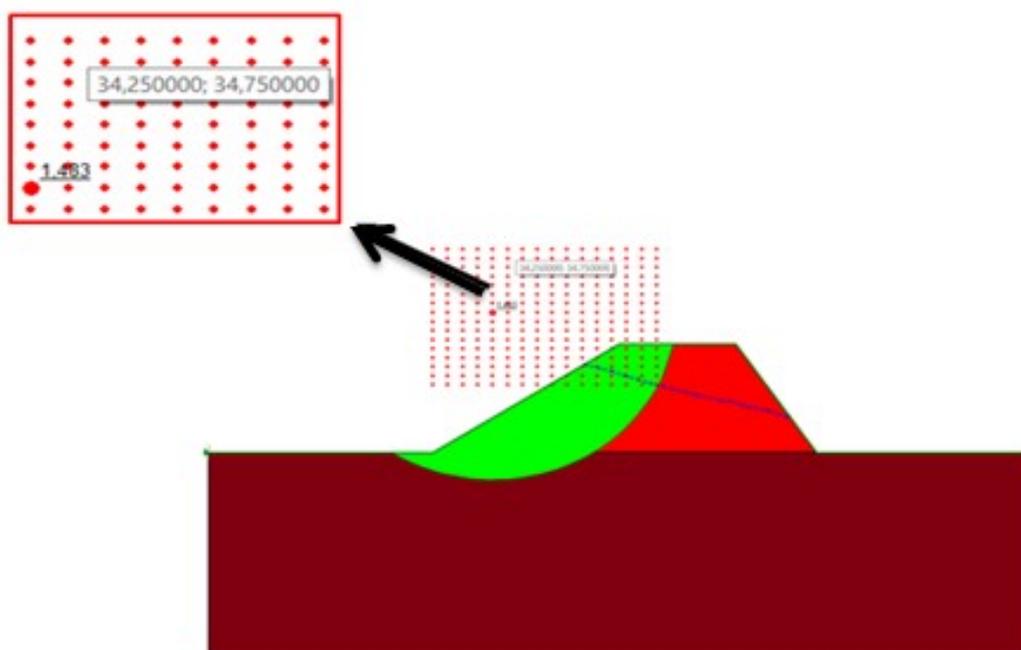
O fator de segurança contra a ruptura do solo é o critério para a avaliação da estabilidade de uma barragem e é definido como a razão entre o equilíbrio de momentos estabilizadores. A ruptura acontece quando esses momentos se igualam e o Fator de Segurança se iguala a unidade. No estudo foi utilizado o software GeoSlope para o cálculo dos fatores de segurança utilizando os métodos de Bishop e Fellenius que

aplicam critérios de diversas tentativas de centros e raios (Figura 30). Para isso, considera-se um *grid* baseado na análise estática do volume de material situada acima de uma superfície potencial de escorregamento de seção circular.

Os fatores de segurança obtidos e aceitos para os taludes devem levar em conta a confiabilidade dos dados utilizados nas análises de estabilidade, a adequabilidade e as limitações das análises selecionadas, as magnitudes das deformações toleráveis e as consequências da ruptura em potencial. A tabela abaixo indica os fatores mínimos de segurança que são normalmente aceitáveis para os cálculos de estabilidade de taludes conforme estabelece Cruz (2004) na Tabela 3 de Fatores mínimos de segurança.

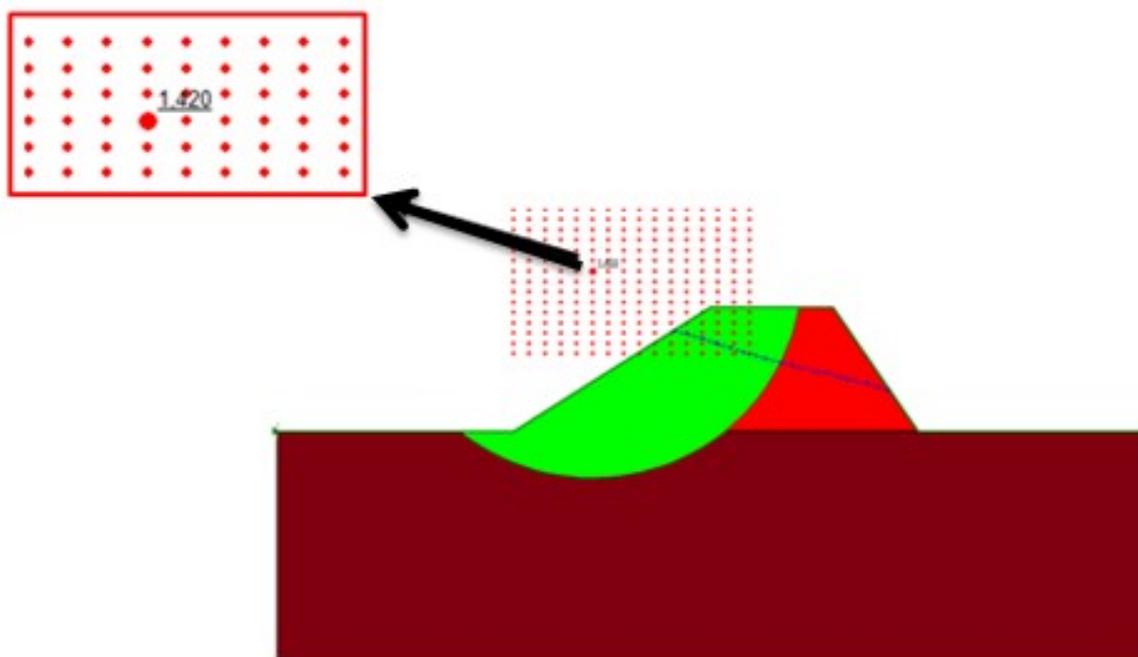
Analisando o maciço com a linha freática e sem a presença de drenos (Caso A), foram obtidos os seguintes resultados de fatores de segurança:

Figura 43 – Fator de segurança – Bishop (Caso A)



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012)

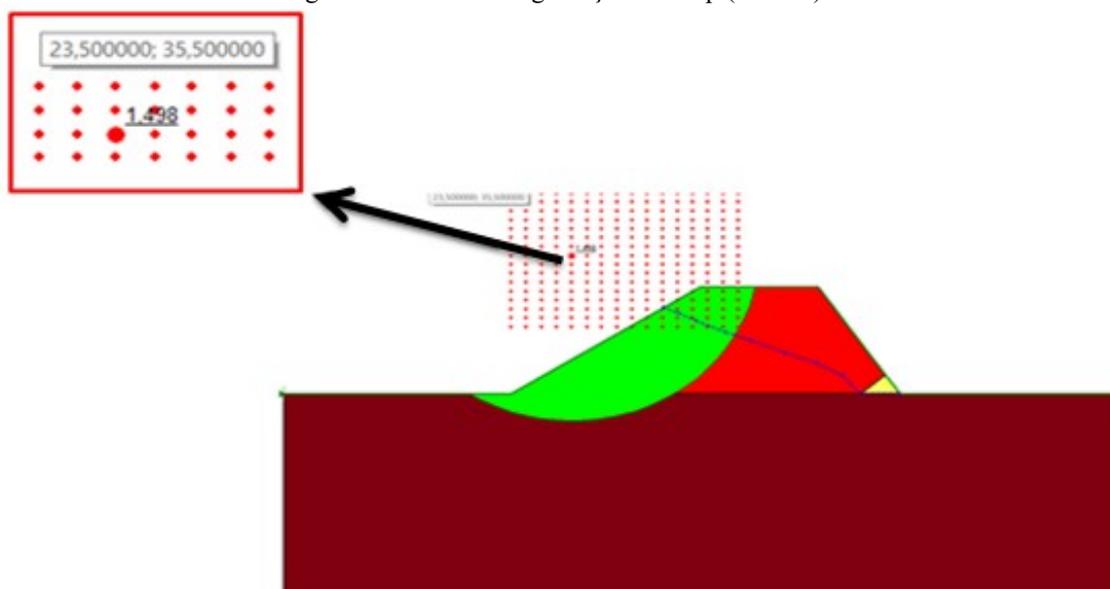
Figura 44 – Fator de segurança – Fellenius (Caso A)



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012)

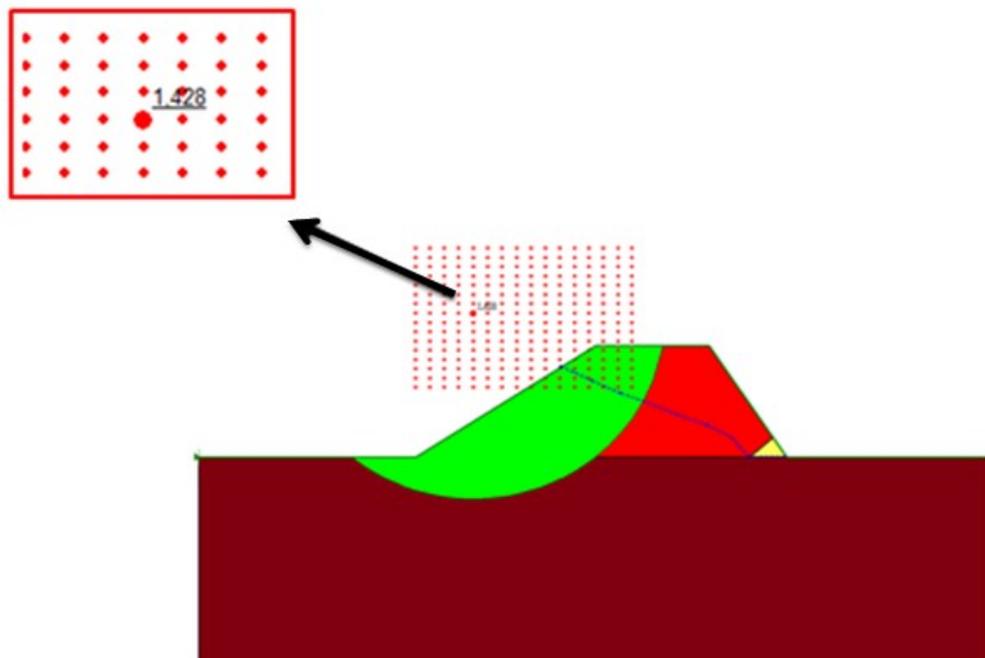
Utilizando o método de equilíbrio Bishop (Figura 43) foi encontrado o fator de segurança 1,483 e com o método Fellenius (Figura 44) o resultado obtido foi de 1,420. Segundo Cruz (2004) o fator de segurança mínimo exigido para verificação em qualquer condição da estabilidade para resistência residual deve ser 1,2 (Tabela 3), portanto, a falta de drenos não foi a causa de ruptura do talude.

Figura 45 – Fator de segurança – Bishop (Caso B)



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012)

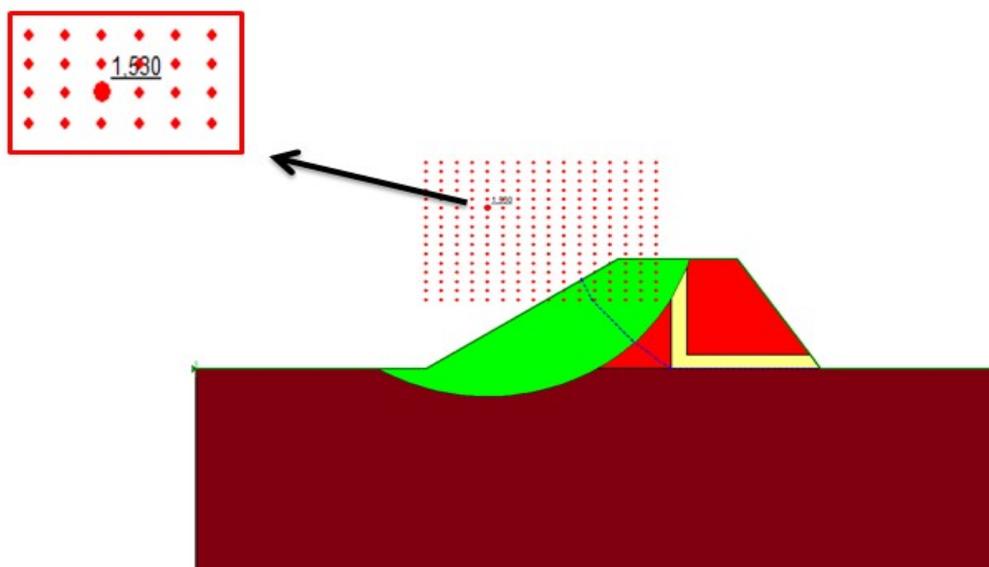
Figura 46 – Fator de segurança – Fellenius (Caso B)



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012)

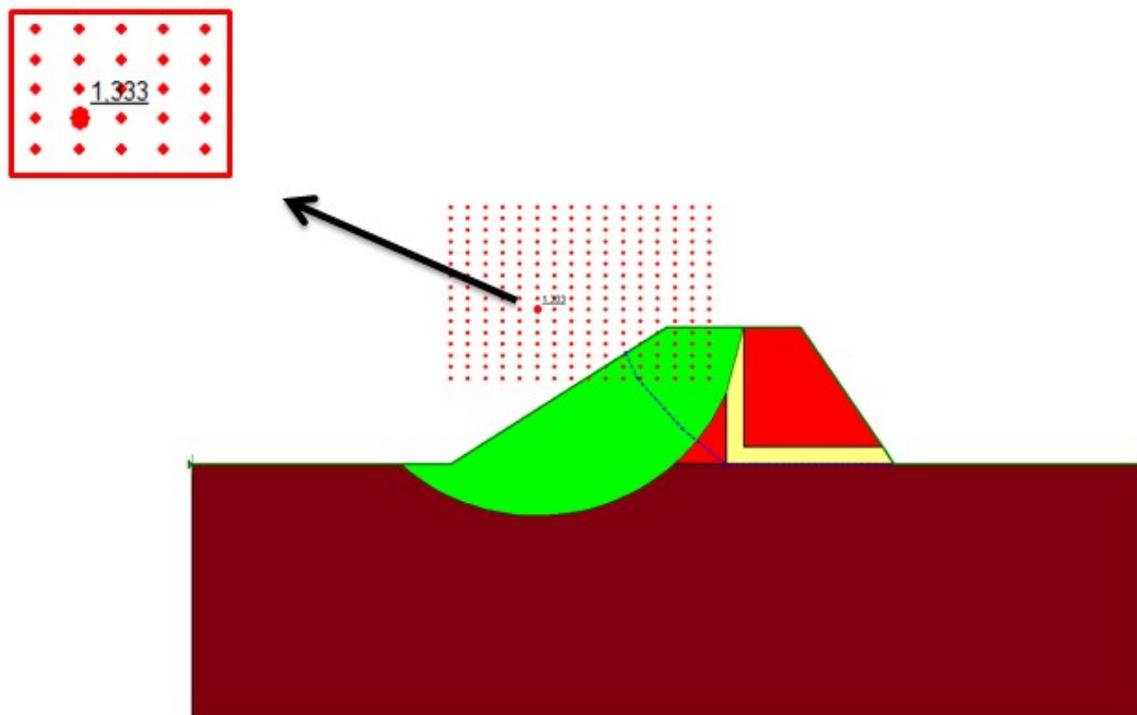
Após as primeiras simulações foi colocado o dreno de pé para verificar se o comportamento da barragem seria mais eficiente e seguro. Com a presença de dreno de pé na simulação utilizando Bishop (Figura 45) o fator de segurança ficou em 1,498 e com Fellenius (Figura 46) teve como resultado 1,428. As duas simulações obtiveram os fatores de segurança mínimos necessários, que é de 1,2, mas não tiveram grandes diferenças dos valores obtidos com a simulação realizada na barragem sem drenos.

Figura 47 – Fator de segurança – Bishop (Caso C)



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012)

Figura 48 – Fator de segurança – Fellenius (Caso C)



Fonte: Próprio autor, GeoStudio (2012)

Na última simulação foi colocado dreno chaminé para verificar o comportamento da barragem. O resultado do fator de segurança ficou em 1,530 para o método de equilíbrio Bishop (Figura 47) e para Fellenius (Figura 48) ficou em 1,333. Era esperado que com o dreno chaminé os fatores de segurança seriam os mais significativos, mas isso não aconteceu com o método de Fellenius que teve como resultado o valor de 1,333, valor mínimo adequado, segundo Cruz (2009). O método de Fellenius admite que as forças entre lamelas sejam paralelas a sua base e ignora forças resultantes de pressões neutras atuantes nas faces entre lamelas. Quando a pressão neutra é elevada o método de Fellenius não consegue levar em conta as forças resultantes da pressão nas faces verticais por esse motivo o fator de segurança ficou tão baixo (MASSAD, 2003).

Abaixo segue o resumo dos fatores de segurança encontrados nas simulações realizadas no software GeoSlope para os casos A, B e C utilizando os métodos de equilíbrio Bishop e Fellenius (Tabela 11).

Tabela 11 – Resumo de valores de Fatores de Segurança do talude da barragem

Tipo de barragem	Método	Fator de segurança
Sem dreno	Bishop	1,483
	Fellenius	1,420
Dreno de pé	Bishop	1,498
	Fellenius	1,428
Dreno chaminé	Bishop	1,530
	Fellenius	1,333

Fonte: Próprio autor, 2019

Conforme tabela acima (Tabela 11) verificou-se que os valores dos fatores de segurança obtidos nas simulações realizadas no software GeoStudio tiveram pouca variação entre os casos A, B e C. Todos os valores dos fatores de segurança ficaram dentro dos padrões mínimos aceitáveis que é de 1,3 para este tipo de barragem conforme Tabela 3 (Cruz, 2004).

O fator de segurança que teve menor resultado foi no Caso C calculado pelo método de Fellenius, mas neste caso o valor deve ser desconsiderado pois na barragem com dreno chaminé o método não levou em consideração as forças resultantes da pressão nas faces verticais. O fator de segurança com maior valor também foi na simulação do Caso C, com dreno chaminé, mas realizada com o método de Bishop.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estabilidade de uma barragem deve ser mantida linearmente sobre qualquer natureza, assegurando que seus riscos e potencialidades de eventuais fissuras, rupturas, adensamento, anomalias e problemas construtivos sejam nulos. E de tal modo a estrutura seja eficiente e capaz de garantir segurança ambiental, estrutural e principalmente à sociedade.

A verificação da estabilidade da barragem Rio dos Bois foi realizada utilizando o software GeoSlope e GeoFlux, através de condições de percolação e estabilidade a ruptura, averiguando o fator de segurança mediante a simulação de três sendo essas chamadas de Caso A (sem sistema de drenagem), Caso B (dreno de pé) e Caso C (filtro chaminé), todos com base nas propriedades geomecânicas e hidráulicas da barragem. Com os dados inseridos e analisados no Caso A em simulações, permitiu determinar que a linha freática foi verificada em uma cota relativamente alta e esse fator impactou em um baixo fator de segurança de 1,42 e 1,48 respectivamente nos métodos de Fellenius e Bishop.

No Caso B foi implementado um sistema de drenagem que possibilitou captar as águas que percolaram na estrutura no pé do talude de jusante, esse fato implicou no fator de segurança com os valores mais elevados para Fellenius e inferior a Bishop com respectivamente 1,50 e 1,43.

Com o Caso C, sistema de maior drenagem da infiltração, é possível obter uma análise mais sucinta entre o método conservador de Fellenius e sua ampliação pelo método de Bishop, com valores bem distintos de 1,33 e 1,53 de fator de segurança a estabilidade da barragem.

Verificou-se com a análise das simulações que a estabilidade e o fator de segurança relativos aos casos: Caso A, Caso B e Caso C que quanto mais houver o emprego de tecnologia de drenagem na barragem, melhores serão as condições de estabilidade e segurança que a mesma será sujeita. O rompimento corrido em 1º de Abril 2000 da barragem Rio dos Bois, localizada no município de Leopoldo de Bulhões – GO, não foi ocasionada por problemas de percolação de água devido à infiltração de água no maciço.

As simulações demonstram que a estrutura permanece estável nos três casos apontados e em virtude dos argumentos apresentados e aspectos analisados é

imprescindível inferir que a barragem na atual situação não apresenta risco de rompimento por percolação de água no maciço. Para apontamentos da ruptura que ocorreu em 2000 é recomendada a realização de estudos, verificando fatores como clima do mês de agosto. Analisando a formação de ondas devido ao vento, além de inferir sobre o rebaixamento do nível de água em épocas de estiagens, pois prejudica a estabilidade e o fator de segurança da barragem, adensamento, além de mensurar problemas construtivos e anomalias entre possíveis divergências nas etapas de projeto e execução.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. R. **Dimensionamento e acompanhamento executivo de uma barragem de terra para irrigação – um estudo de caso.** Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens:** Diretrizes para a Construção de Barragens. Volume VI. Brasília, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Mapa interativo das Barragens Cadastradas no Sistema.** Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/mapas-tematicos-e-relatorios/tema-1-1>> Acesso em 02 Abr. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.** Disponível em: <<http://www.snisb.gov.br/>> Acesso em 02 Abr. 2019.

AGUIAR, D. P. O. **Contribuição ao estudo do índice de segurança de barragens – ISB.** Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2014.

ALMEIDA, A. B. **Risco associado à segurança de barragens.** Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571243001/texto-riscos.pdf>>. Acesso em: 02 de Abr. de 2019.

ALMEIDA, J. G. R. **Deformações devido a carregamentos verticais.** Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, 2017.

AMBIENTE BRASIL. **O que se sabe sobre o rompimento de barragem que matou ao menos 58 pessoas em MG.** Disponível em: <<https://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2019/01/27/150026-o-que-se-sabe-sobre-o-rompimento-de-barragem-que-matou-ao-menos-58-pessoas-em-mg.html>>. Acesso em: 02 de Jun. de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11.682 DE Setembro de 1991. **Estabilidade de taludes.**

ARAUJO, M. C. N. **Estudo de equivalência entre drenos franceses e tapetes drenantes em barragens de terra.** Dissertação. Mestrado em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG.** Disponível em: <[http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos\\_aplicativos/roteiro\\_dimensao\\_barragens.html#dois](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensao_barragens.html#dois)> Acesso em 05 de Mar. 2019.

BARBOSA, R. A. **Diagnóstico e execução de ações corretivas visando à recuperação da Barragem Poleiros, em Barra de Santa Rosa, PB.** Campina Grande, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997.**

BRASIL. **Decreto Lei nº 10.752, de 21 de novembro de 1977.** Dispõe sobre realização de Auditoria Técnica nas Autarquias e Companhias em cujo capital o Estado tenha participação majoritária para os fins que especifica.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas 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 Informações sobre segurança de barragens.

BRASIL. **Projeto de Lei nº 1.181-C de 2003.** Estabelece diretrizes para verificação da segurança de barragens de cursos de água para quaisquer fins e para aterros de contenção de resíduos líquidos industriais.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** Volume 2 [3ª Ed. Rev. e ampl.]. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Brasília, INL, 1973.

CARDIA, R. R. KUPERMAN S. C. **Curso Segurança de barragens: inspeção e auscultação de barragens.** Módulo II, 2013.

CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação.** Lavras: Ed. UFLA, 2008.

CARVALHO, D. **Barragens: uma introdução para graduandos.** Maio/2011. Disponível em: <[http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem\\_terra\\_1.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_1.pdf)> Acesso em: 01 de Abr. de 2019.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil: séculos XIX, XX e XXI.** Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras. Casos Históricos, Materiais de Construção e Projetos.** Oficina de Textos, 2ª edição. São Paulo, 2004.

DOMINGOS, V. H. **Estabilidade de taludes utilizando o método do equilíbrio limite.** Dissertação. Programa de pós-graduação em geotecnia, estruturas e construção civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2016.

ELETOBRAS, Centrais Elétricas do Brasil. **Diretrizes para projetos de PCHs,** 2000.

ES BRASIL. **Governo inaugura barragem em Marilândia e assina ordens de serviço em Sooretama.** Disponível em: <<https://esbrasil.com.br/governo-inaugura-barragem-em-marilandia-e-assina-ordens-de-servico-em-sooretama/>>. Acesso em 04 de Jun. de 2019.

FAO. **Manual sobre pequenas barragens de terra: guia para a localização, projeto e construção**. Roma: Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. 2011, 120p. (Publicação da FAO sobre Rega e Drenagem, nº 64).

FIORI, A. P.; CARMIGNAMI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Oficina de textos, 2015.

GAGO, R. **Gestão de crises no atendimento inicial a emergências com rupturas de barragens: Análise e proposta**. 2009. 204 f. (Monografia) – Centro de Aperfeiçoamento e Estudos Superiores. São Paulo, 2009.

GERSCOVICH, D. (2009). **Estabilidade de taludes**. Disponível em <[http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e5/Apostila\\_Taludes\\_UERJ.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/e/e5/Apostila_Taludes_UERJ.pdf)> Acesso em: 01 de Mar. 2019.

GOIÁS. Secretaria de Meio Ambiente, Recursos Hídricos Infraestrutura, Cidade e Assuntos Metropolitanos - SECIMA. **Manual de Licenciamento Ambiental**. Núcleo de Licenciamento. Goiânia-GO, 2017. Versão atualizada em fevereiro de 2017.

GOMES, M. O. TEXEIRA, R. L. **Análise e desenvolvimento de projeto construtivo de uma pequena barragem de terra no córrego da Cava – Morrinhos/GO, com foco na segurança**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG. Aparecida de Goiânia – 2017.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Cidades. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/leopoldo-de-bulhoes/panorama>>. Acesso em: 06 de Set. de 2019.

INFANTI Jr, N & KANJI, M. A. **Considerações preliminares sobre fatores que afetam a segurança de barragens de terra**. Revista Construção Pesada - Separatas, São Paulo, SP, 1974/1978.

JANSEN, R.B., **“Dams and Public Safety”**. US. BuRec, Denver, EUA, 1983, 332 p.

JÓNATAS, R. J. L. **Rotura de barragens de aterro por galgamento: ensaios experimentais com aterros homogêneos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

LAURIANO, A. PIMENTA, J. CORTEZ, J. SILVA, A. **Discussões sobre os modos de falha e risco de galgamento de barragens de rejeitos**. II SGBR – Seminário gestão de riscos e segurança de barragens de rejeito, 2017.

MARANGON, M. **Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra**. Barragens de Terra e Enrocamento. Cap. 5, 2004.

MARANGON, M. Parâmetros dos Solos para Cálculos de Fundações. Geotecnia das Fundações. Cap. 3, 2009.

MASSAD, F. **Obras de terra: Curso básico de geotecnia**. São Paulo, 2003. 216 p. Oficina de textos, 2ª edição.

MEIRELLES, F. S. C. **Unidade 9: Barragens de terra e enrocamento**. Módulo I – Barragens: aspectos legais, técnicos e socioambientais, 2013. Disponível em: <[https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/20/Unidade\\_9-modulo1.pdf](https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/110/20/Unidade_9-modulo1.pdf)> Acesso em: 05 de Abr. de 2019.

MENESCAL, R. A.; CRUZ, P. T.; CARVALHO, R. V.; FONTENELE, A. S.; OLIVEIRA, S. K. F. **Uma metodologia para avaliação do potencial de risco em barragens do semi-árido**. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza – CE. 2001.

MENDES, G. **Barragem gigante que tem cinco vezes mais chances de rompimento que Brumadinho**. Disponível em: <<https://www.falagm.com/artigo/congonhas-a-maior-barragem-de-minas-tem-cinco-vezes-mais-chances-de-rompimento-do-que-brumadinho>>. Acesso em: 03 de Jun. de 2019.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Unidade de Gerenciamento do Proágua/ Semi-árido. **Diretrizes ambientais para projeto e construção de barragens e operação de reservatórios**. Brasília, 2005.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Unidade de Gerenciamento do Proágua/ Semi-árido. Brasília, 2002.

MIRANDA, A. N. **Inspeção de barragens de aterro**. Fundação Parque Tecnológico Itaipu – Brasil, 2016.

OLIVEIRA, J. R. C. **Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2008.

PEREIRA, T. S. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PIASENTIN, C. **Inspeção e auscultação de barragens**. Unidade 3: Inspeções visuais. 2013

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas/ 3ª Edição** – São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC – Rio. **Instrumentação e Segurança de Barragens**. Disponível em: <[http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0124945\\_03\\_cap\\_02.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0124945_03_cap_02.pdf)> Acesso em: 04 de Abr. de 2019.

Prefeitura de Leopoldo de Bulhões. Disponível em:  
<<https://www.leopoldodebulhoes.go.gov.br/home>>. Acesso em: 06 de Set. de 2019.

RIO GRANDE DO SUL. **Decreto nº 6136, de 15 de julho de 1955**. Aprova a regulamentação da Lei nº 2434, de 23 de setembro de 1954, modificada pela Lei nº 2642, de 20 de junho de 1955. Assembléia Legislativa do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 15 de julho de 1955

RODRIGUES JR., A. R. **Estudo de diferentes métodos de análises de estabilidade de taludes terrosos**. Monografia. Universidade Federal do Pampa. Caçapava do Sul, 2015.

ROMANINI, A. **Barragens – Elementos de projeto**. Universidade do Estado de Mato Grosso, Campus de Sinop. Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas. Sinop, 2016.

SAMPAIO, M. V. N. **Segurança de barragens de terra: um relato da experiência do Piauí**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SANTOS, V. S. **Rompimento da barragem em Brumadinho**. Disponível em:  
<<https://www.biologianet.com/ecologia/rompimento-barragem-brumadinho.htm>>. Acesso em: 03 de Jun. de 2019.

SAYÃO, A. “**Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento**”. Curso de Mestrado da PUC -RJ, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, João Paulo. **Os Métodos de Equilíbrio Limite e dos Elementos Finitos na Análise de Estabilidade de Taludes**. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, 2011.

SMIDERLE, C. S. D. **Segurança de Barragens: análise da instrumentação da Barragem de Itaúba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

STRAUSS, M. **Análise de estabilidade do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SUGIMOTO, L. **Por barragens mais seguras**. Jornal da Unicamp. 2014. Disponível em: <[https://www.unicamp.br/unicamp/sites/default/files/jornal/paginas/ju\\_605\\_pagina\\_cor\\_05\\_web.pdf](https://www.unicamp.br/unicamp/sites/default/files/jornal/paginas/ju_605_pagina_cor_05_web.pdf)> Acesso em: 15 de Mai. de 2019.

TEIXEIRA, S. H. C. **Sistemas de vedação e de drenagem interna**. Curso de capacitação em estruturas de barragens: terra, enrocamento e rejeitos. Curitiba, 2017.

UNICAMP. **Barragens: uma introdução para graduandos**. Maio, 2011

USBR (*United States Bureau of Reclamation*). **Avaliação de pequenas barragens**. Brasília: Bureau of Reclamation, Manual de Irrigação, v.6., 2ª edição, 2002.

ZUFFO, M. S. R. **Metodologia para avaliação da segurança de barragens.**  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas,  
Campinas, 2005.