

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ROBERTO SCHIMITZ RODRIGUES

**RETROANÁLISE DO PROCESSO CONSTRUTIVO E ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM BARRAMENTO: ESTUDO DE CASO**

ALEGRETE

2023

ROBERTO SCHIMITZ RODRIGUES

**RETROANÁLISE DO PROCESSO CONSTRUTIVO E ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM BARRAMENTO: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Coorientador: Prof. Me. Fabiano Garcia Oliveira

ALEGRETE

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

R696a Rodrigues, Roberto Schimitz

Análise do processo construtivo e análise de estabilidade
de talude de um barramento: Estudo de caso / Roberto Schimitz
Rodrigues.

151 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2023.

"Orientação: Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco".

1. Barragem de terra. 2. Açudes. 3. Estabilidade de
taludes. 4. Construção de barragens. I. Título.

ROBERTO SCHIMITZ RODRIGUES

**RETROANÁLISE DO PROCESSO CONSTRUTIVO E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE DE UM BARRAMENTO:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 03, fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Wilber Feliciano Chambi Tapahuasco

Orientador
(UNIPAMPA)

Fabiano Garcia Oliveira

Coorientador
(UNIPAMPA)

Diogo Silveira Kersten

(UNIPAMPA)

Luciéle Bilhalva Campagnolo

(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **WILBER FELICIANO CHAMBI TAPAHUASCO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/02/2023, às 11:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIOGO SILVEIRA KERSTEN, Técnico em Agropecuária**, em 08/02/2023, às 11:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FABIANO GARCIA OLIVEIRA, Usuário Externo**, em 08/02/2023, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIELE BILHALVA CAMPAGNOLO, Usuário Externo**, em 09/02/2023, às 08:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1048537** e o código CRC **73B3186E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Jesus Cristo que é o autor e consumidor da minha fé, que perante minhas orações ele sempre esteve comigo e por maior que fosse minhas dificuldades, as providências eram sanadas através de inúmeras pessoas que contatei ao longo deste período de graduação.

Ao meus pais e meu irmão que partiu prematuramente, Odair Schimitz, um homem de bem, que foi um exemplo de humildade e profissionalismo, que por onde passou deixou um legado de como tratar as pessoas, sendo amigo, carismático, sem nunca deixar a soberba subir ao seu coração. Agradeço eternamente e se hoje estou concluindo minha graduação, foi porque escutei seus conselhos sobre nunca deixar de estudar, pois um dia me faria falta e hoje tenho certeza que ele queria o melhor para mim, nossa família e meus filhos.

Ao professor Wilber, que teve uma imensa paciência de sanar minhas dificuldades durante a realização deste trabalho, que usou de todo o seu conhecimento para me proporcionar uma preparação para o mercado de trabalho. Fica o meu muito obrigado pelas inúmeras horas que dedicou o seu tempo como orientador, tanto de forma presencial ou virtual, deixando muitas vezes o seu lar em período de descanso para me atender em sua sala.

Ao Fabiano, que durante a realização dos ensaios de laboratório, efetuou um trabalho excepcional, no qual dedicou horas e horas do seu tempo realizando um dos ensaios mais importante deste trabalho no laboratório de solos. Fica o meu eterno agradecimento e que tenha muito sucesso futuramente como professor ao longo dos anos.

Ao Diogo, que durante nossas visitas de campo, realizou um levantamento topográfico com excelência durante a coleta de dados no barramento da barragem e ainda dedicou um tempo extra em me auxiliar em algumas atividades propostas envolvendo o levantamento topográfico realizado no campo, entre outras. Obrigado de coração pela ajuda e fica o meu reconhecimento eterno, pois sem sua ajuda e conhecimento, seria impossível obter resultados precisos no levantamento topográfico do barramento da barragem.

A Luciéle, que mesmo em período de estudos, dedicou um tempo precioso para atender as responsabilidades cabíveis como avaliadora desta banca. Muito obrigado de coração pelo tempo dedicado neste trabalho que me será útil durante toda a minha carreira profissional.

Por fim, a todo o quadro de docentes desta universidade, que perante a graduação, em momento algum deixaram de sanar todas minhas dúvidas surgidas em cada disciplina cursada. Levarei comigo um legado de todos, que ensinar é uma arte e não uma obrigação.

RESUMO

O trabalho, tem por objetivo principal, realizar um estudo de caso através de uma retro análise do processo construtivo de uma barragem de terra de pequeno porte, localizada no município de Alegrete-RS. Para isso, inicialmente realizou-se *in-situ*, o acompanhamento do processo construtivo através de vistorias e a coleta de amostras. Também, *in situ* foram realizados os ensaios de Frasco de Areia (NBR 7185/1986) e de permeabilidade em diversos pontos do maciço da barragem. Seguidamente, no laboratório, através das amostras coletadas da barragem em estudo foram realizados ensaios de caracterização geotécnica (NBR 6457/2016, NBR 7181/2016, NBR 6459/2016, NBR 7180/2016, NBR 6508/1984 e NBR 6458/2016), ensaio de compactação Proctor Normal (NBR 7182/2016) e o ensaio de cisalhamento direto, para obter os parâmetros de resistência das amostras coletadas. Os resultados dos parâmetros de resistência e índices físicos das amostras ensaiadas, serviram como dados de entrada para calcular a estabilidade do talude da barragem, através do *software* GeoStudio (2020), licença plena. Por fim, conhecer o Potencial de Risco da barragem, com base no levantamento patológico da Ficha de Inspeção Regular de Barragem de Terra fornecida pela (ANA/2016). O estudo apresentou como resultados obtidos através das simulações dos taludes de montante e jusante, em condições de operação normal, rebaixamento rápido e gradual do reservatório, fatores de segurança acima do mínimo permitido. Apesar de algumas irregularidades presenciadas durante o acompanhamento do processo construtivo do barramento, durante as análises de estabilidade dos taludes, mesmo em condições do acréscimo de carga sísmica, os resultados comprovaram a segurança da barragem, após entrar em regime normal de operação, rebaixamento rápido e gradual do reservatório.

Palavras chaves: Barragem de terra, Açudes, Estabilidade de taludes, Construção de barragens de terra.

ABSTRACT

The main objective of this work is to carry out a case study through a retro analysis of the construction process of a small earth dam, located in the municipality of Alegrete-RS. For this, initially, the construction process was monitored in situ through surveys and sample collection. Also, in situ, Sand Bottle tests (NBR 7185/1986) and permeability tests were carried out at various points of the dam massif. Then, in the laboratory, through the samples collected from the dam under study, geotechnical characterization tests were carried out (NBR 6457/2016, NBR 7181/2016, NBR 6459/2016, NBR 7180/2016, NBR 6508/1984 and NBR 6458/2016), Proctor Normal compaction test (NBR 7182/2016) and the direct shear test, to obtain the resistance parameters of the collected samples. The results of the resistance parameters and physical indices of the tested samples served as road data to calculate the stability of the dam slope, through the GeoStudio software (2020), full license. Finally, knowing the Risk Potential of the dam is based on the pathological survey of the Regular Inspection Sheet for Earthen Dams provided by (ANA/2016). The study presented results obtained through simulations of the upstream and downstream slopes, under normal operating conditions, the rapid and gradual lowering of the reservoir, and safety factors above the minimum allowed. Despite some irregularities witnessed during the monitoring of the construction process of the dam, during the stability analysis of the slopes, even in conditions of increased seismic load, the results proved the safety of the dam, after entering into the normal operating regime, rapid lowering, and gradual reservoir.

Keywords: Earth dam, Dams, Slops stability, Construction of earth dams.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Objetivo geral.....	10
1.1.1	Objetivos específicos.....	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1	Conceitos básicos de barragens	11
2.2	Principais componentes que constituem uma barragem de terra	13
2.3	Fases de estudos em um projeto básico para obras de barragens de terra.....	14
2.4	Condicionantes na localização do barramento	15
2.4.1	Estudos geológicos no local do barramento.....	17
2.4.1.1	Estudos geotécnicos	17
2.4.1.2	Classificação dos materiais utilizados na construção de barragens de terra	18
2.5	Dimensionamento da seção de barramento em pequenas barragens de terra	19
2.6	Perfil da barragem.....	21
2.6.1	Largura da crista.....	21
2.6.1.1	Inclinação dos taludes	22
2.6.1.2	Largura da base da seção transversal da barragem	23
2.6.2	Cut-off ou trincheira de vedação	23
2.7	Drenos	25
2.7.1	Erosão superficial dos taludes	25
2.8	Processo de compactação e maquinários utilizados em barragens de terra	27
2.9	Estudo do comportamento mecânico no maciço de uma barragem de terra	29
2.10	Análise de estabilidade em taludes	29
2.10.1	Métodos utilizado para o cálculo de estabilidade em barragens com seções zonadas, mistas ou homogêneas.....	33
2.11	Método de Bishop Simplificado e Morgenstern e Price.....	34
2.12	Ensaio geotécnicos aplicados aos materiais utilizados na construção do barramento.....	37

2.13 Levantamento patológico em barragens de terra	49
2.13.1 Avaliação do potencial de risco	52
3 METODOLOGIA PROPOSTA	56
3.1 Área de estudo e características geométricas da barragem.....	58
3.2 Equipamentos utilizados na construção da barragem.....	60
3.3 Processo construtivo	60
3.4 Levantamento topográfico do barramento	65
3.5 Coleta das amostras e execução de testes de laboratório.....	71
3.5.1 Coleta de amostras	71
3.5.2 Ensaios de caracterização geotécnica	73
3.5.2.1 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação	73
3.5.2.2 Limites de Atterberg (LL e LP)	73
3.5.2.3 Massa específica dos grãos que passam na peneira 4,8 mm.....	74
3.5.2.4 Massa específica, massa específica aparente e da absorção de água dos grãos de pedregulhos retidos na peneira 4,8 mm	75
3.5.2.5 Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio.	76
3.6 Ensaios convencionais	77
3.6.1 Ensaio de compactação	77
3.6.2 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto	78
3.7 Testes de avaliação “ <i>in-situ</i> ”	82
3.7.1 Ensaio de permeabilidade pelo método de uma altura de carga	82
3.7.1.1 Ensaio de controle da massa específica aparente “ <i>in-situ</i> ”	83
3.8 Inspeção de campo e análise patológica.....	84
4 Resultados e processamento de dados	85
4.1 Análise comparativa do processo construtivo	85
4.2 Caracterização geotécnica dos materiais de solos	88
4.3 Resultados dos ensaios convencionais.....	90
4.3.1 Ensaio de compactação e permeabilidade	90

4.4 Ensaio de cisalhamento direto	92
4.4.1 Parâmetros de resistência obtidos através da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.	94
4.5 Inspeções de campo e análises patológicas	96
4.6 Avaliação do potencial de risco.....	113
4.7 Simulação do comportamento hidráulico e estabilidade das seções do barramento	115
4.7.1 Regime normal de operação.....	115
4.7.2 Rebaixamento rápido e gradual do reservatório.....	123
5 Conclusões	134
REFERÊNCIAS.....	137
ANEXO A – Volume acumulado obtido através do cálculos das seções transversais do maciço da barragem.....	143

1 INTRODUÇÃO

Barragem é o termo associado à um reservatório que, dentre tantas finalidades, se propõe através da construção de um barramento, bloquear um curso d'água, além de serem classificadas quanto ao uso dos materiais em: barragem homogênea, barragem zonada com núcleo central impermeável e barragem zonada com camada impermeável a montante (COSTA, 2012; CRUZ, 1996). Conforme os autores a barragem de terra zonada de pequeno porte, tem a sua maior destinação para fins de irrigação agrícola.

Como toda obra de engenharia, as barragens também sofrem com a ação do tempo devido ao processo de intemperismo, com a ocorrência de erosão, e assoreamento, contribuindo para o desgaste da construção. Além disso, na fase de projeto, deve-se prever o surgimento de problemas patológicos que possam comprometer a segurança da barragem, através dos métodos avaliativos de construção, características dos materiais e estabilidade de taludes (COSTA 2012; CRUZ 1996; CARVALHO, 2008).

Segundo dados levantados pelo IRGA (2022) a área cultivada de arroz no município de Alegrete-RS, estimada para safra 2020/2023, foi de 54.035 hectares, sendo que a maior parte da irrigação é realizada através de barragens (SALINAS, 2017).

Conforme dados levantados pelo GOV-RS (2019), 873 barragens e açudes foram classificados com Dano Potencial Associado Alto. A vistoria da segurança dos reservatórios de água, foram avaliados com a Ficha para Inspeção Regular de Barragem constatando-se anomalias em níveis pequeno, médio e grande. Além disso, a segurança das barragens de terra, estão com maior índice de comprometimento à ruptura, após o passar dos anos devido a exposição dos fatores climáticos, ação do homem e animais, conforme avaliação nos taludes de contenção sendo eles: formigueiros, arbustos em excesso na jusante, erosões a montante e jusante, crista estreita com menos de 4 m e infiltrações notáveis após a jusante.

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo de caso, fazendo-se uma retro análise do processo construtivo através de ensaios laboratoriais a respeito do tipo de solo utilizado em sua construção, principais características, dentre outros fatores que permitam avaliar a segurança e a estabilidade do talude do barramento. Além de um referencial teórico, este trabalho reunirá um importante acervo técnico que favorecerá o conhecimento e o melhor gerenciamento da barragem em estudo.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal do trabalho é avaliar o processo construtivo de uma barragem de terra, afim de verificar a sua estabilidade e segurança.

1.1.1 Objetivos específicos

- Acompanhar o processo construtivo de uma barragem de terra, no município de Alegrete-RS;
- Determinar as características e parâmetros geotécnicos do maciço de terra da barragem;
- Fazer uma análise do comportamento mecânico e hidráulico do barramento; e
- Avaliar a segurança da barragem utilizando a Ficha de Inspeção Regular de Barragem, proposta pela Agência Nacional das Águas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceitos básicos de barragens

Segundo Matos, Silva e Pruski, (2000), uma pequena barragem de terra, é definida com uma altura máxima de 10 metros. Para a confecção de um barramento com seção homogênea e zonada, a altura máxima não deve ultrapassar 25 metros, atendendo as exigências de segurança e estabilidade da barragem (CARVALHO, 2008). A capacidade de adequação a grandes deformações, sem ruptura, e a elevada relação largura da base/altura que as caracteriza são fatores que recomendam este tipo de barragem para qualquer tipo de fundação, pois as tensões aplicadas ao terreno são bastante reduzidas e, o trajeto da água infiltrada através da fundação é necessariamente longo (GOMES e TEIXEIRA, 2017) .

Segundo Gomes e Teixeira (2017), as pequenas barragens de terra podem ser constituídas por uma grande variedade de solos. Além disso, os autores também comentam que quando a barragem tem a função de basicamente armazenar água para irrigação em atividades agrícolas, é muito comum escolher barragens de terra de pequeno porte, por apresentar uma maior simplicidade na elaboração e construção.

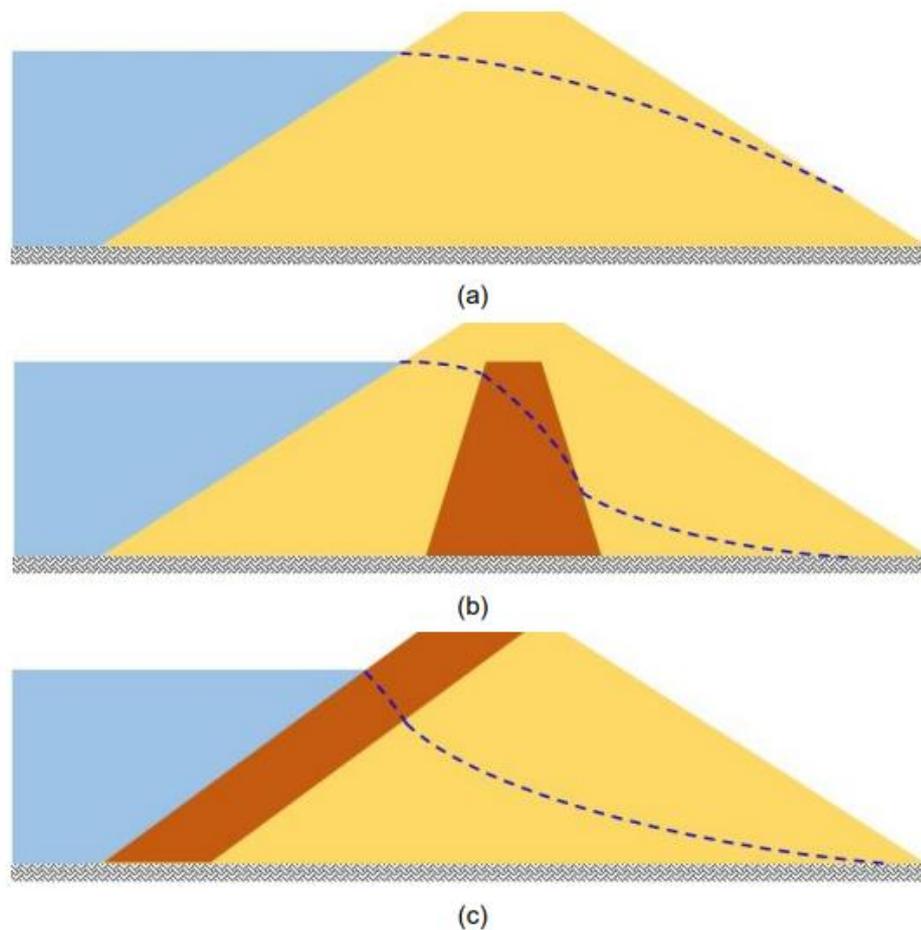
Conforme Gomes e Teixeira (2017), entre as principais vantagens dessas barragens homogêneas e zonadas, destacam-se as seguintes:

- São utilizados materiais naturais e do próprio local;
- Os procedimentos do projeto são simples;
- São necessários pequenos ativos fixos tangíveis (ex.:uso de tração animal para construção e compactação do barramento, na falta de maquinários);
- Os requisitos para as fundações são menos exigentes do que para outro tipo de barragem, pois a base larga de uma barragem de terra distribui melhor a carga nas fundações; e
- Resistem ao assentamento do maciço, melhor do que estruturas mais rígidas e podem ser mais adequadas para áreas onde os movimentos do solo são comuns.

Segundo Costa (2012) e Cruz (1996), os tipos de barragens mais utilizadas para irrigação em atividades agrícolas, são: as barragens de terra homogênea ou simples (Figura 1a), construídas com um único tipo de material, recomendadas quando o solo do local da barragem oferece condições adequadas para construção e impermeabilização; também as

barragens de terra heterogêneas ou zonadas, que podem ser constituídas por um núcleo central impermeável (Figura 1b) ou por uma camada impermeável externa sobre o talude de montante (Figura 1c). O núcleo geralmente é constituído de um material argiloso de boa compactação, complementando ao material granular de maior permeabilidade (constituído de areia, cascalho ou fragmentos de rocha, ou uma mistura desses materiais).

Figura 1 – Tipos de barragens de terra: Barragem homogênea (a); Barragem zonada com núcleo central impermeável (b) e Barragem zonada com camada impermeável a montante (c).



Fonte: Gomes e Teixeira (2017).

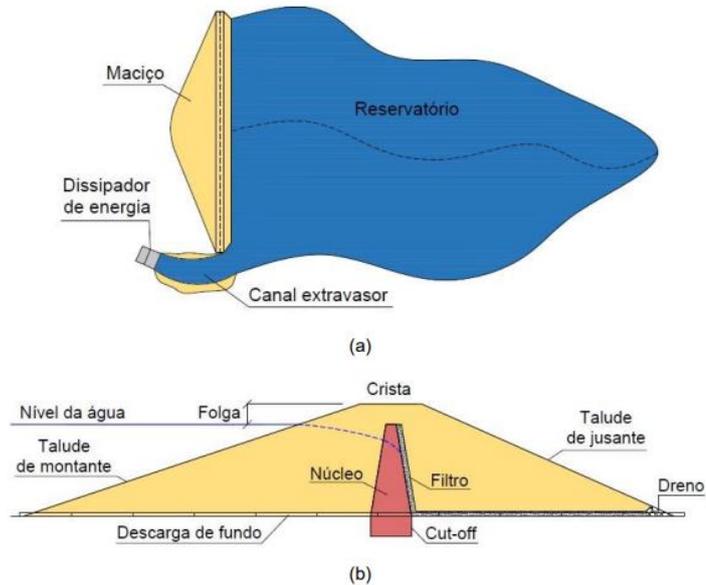
2.2 Principais componentes que constituem uma barragem de terra

Segundo Carvalho (2008), cita-se a seguir, os principais elementos que constituem uma barragem de terra:

- Maciço ou aterro: considera-se o próprio barramento da barragem, construído transversalmente ao curso da água do talvegue principal, encarregado de armazenar a água do reservatório;
- Reservatório: é o volume de água armazenado no reservatório;
- Canal extravasor: destinado a escoar água durante e após o período das cheias, devido a ocorrência de chuvas;
- Dissipador de energia: estrutura hidráulica que tem a finalidade de diminuir a energia cinética da água a ser restituída ao leito natural do curso d'água;
- Crista: é a parte superior do barramento, utilizada como via de rodagem;
- Taludes: são as faces laterais inclinadas, sendo o talude de montante que fica em contato com a água e talude de jusante o lado da região seca;
- Cut-Off: trincheira de vedação construídas com material impermeável e de boa compactação, abaixo do núcleo da barragem, que tem a função de reter possíveis infiltrações que possam ocorrer entre o maciço e solo rochoso da fundação.
- Núcleo: elemento construído no centro do barramento, com material impermeável (argiloso), diminuindo a infiltração da água entre as zonas internas do maciço (espaldares e núcleo);
- Descarga de fundo ou desarenador: instalada sob o aterro, tem a finalidade de garantir o escoamento contínuo a jusante, promover o esvaziamento da represa e o controle de nível do reservatório;
- Nível d'água: é a altura máxima do nível da água em condições normais de operação;
- Folga: distância vertical entre o nível máximo d'água e a crista do barramento, conhecido como reserva para o volume de espera durante períodos das cheias;
- Filtro: estrutura para conduzir a linha de fluxo na região interna do maciço da barragem, conduzindo-a na direção do dreno no talude de jusante; e
- Dreno: construído na projeção do talude de jusante para drenar a água do aterro.

Conforme Carvalho (2008), na Figura 2, será apresentado os principais elementos de uma barragem de terra em planta baixa e corte transversal.

Figura 2 - Principais elementos de uma barragem de terra em planta baixa (a) e principais elementos de uma barragem de terra em corte transversal (b).



Fonte: Gomes e Teixeira (2017).

2.3 Fases de estudos em um projeto básico para obras de barragens de terra

De acordo com Cruz (1996), as principais fases de estudos em um projeto básico para obras de barragens, são: geologia estrutural, hidrogeologia, materiais de construção, equipamentos e previsão de custos, sendo no projeto básico que são feitas as grandes economias de um empreendimento.

Cruz (1996), descreve os seguintes itens de destaque em um projeto básico a seguir:

- a) Geologia estrutural: Sob o ponto de vista geotécnico, além dos estudos, investigações e ensaios de rotina, é necessário ter clara a geologia estrutural da área, pois em princípio, todo o local para construção de uma barragem é geologicamente conturbado. É recomendável realizar sondagens e percussão e rotativas, que sejam abertas trincheiras exploratórias, poços e galerias, para esclarecer aspectos geológicos não detectados claramente pelos procedimentos usuais.
- b) Hidrogeologia: Um estudo hidro geológico das fundações é de primordial importância, pois permite antecipar os tratamentos de fundação. As feições permeáveis da fundação e a sua interligação com o futuro reservatório da barragem, precisam ser bem identificadas.
- c) Materiais de construção: Os materiais de construção devem ser pesquisados à exaustão, em dois aspectos a serem considerados. O primeiro refere-se aos volumes de materiais, não só para a barragem, mas também para o movimento de terra, rocha,

agregados, areias, etc.; que são necessários para acampamento, aterros industriais, estradas, alojamentos, etc. A falta de previsão de áreas de empréstimo nas jazidas no local da obra de solos, pedreiras e depósitos de areia podem comprometer um projeto. É comum nas áreas de empréstimos de materiais, descobrir que as espessuras de solos eram menores que as previstas e que na metade da execução da obra a rocha acabou. O segundo aspecto refere-se à compactação. Por mais que se conheçam os vários tipos de solos de empréstimo extensamente utilizados em barragens, problemas de compactação ocorrem numa frequência maior do que a esperada. Solos muito úmidos, podem gerar problemas de produtividade e muito secos, exigem recursos adicionais de umedecimento. Sempre que possível, deve ser realizado aterros experimentais na fase de projeto básico.

d) Equipamentos: De certa forma os equipamentos em geral é um problema do empreiteiro, porém em muitas vezes requer alguns equipamentos especiais previstos na fase do projeto básico. A exemplo da energia de compactação, há solos arenosos que são muito facilmente compactáveis, e que podem se tornar excessivamente rígidos se compactados com equipamentos muito pesados. Se o projeto prevê um limite superior de grau de compactação, é necessário especificar equipamentos mais leves, que se adequem a energia de compactação. Equipamentos mais leves, em geral de menor produtividade e, conseqüentemente, de maior custo.

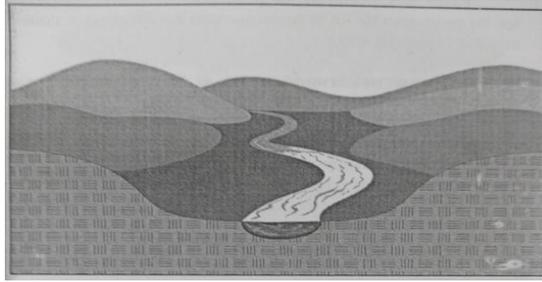
e) Previsão de custos: é necessário que a previsão de custos na movimentação de material, m^3 , sejam orçados corretamente, comparados a demanda hídrica necessária em m^3/s . Num projeto básico, é uma forma a garantir o tempo estimado de retorno investido no empreendimento (CRUZ; 1996, P. 95,96).

2.4 Condicionantes na localização do barramento

Carvalho (2008), sugere que a escolha do local da construção do barramento da barragem, seja, levando em consideração as condições geotécnicas e geológicas da região, fatores hidráulicos e fatores ligados a finalidade que se destina a barragem. Uma barragem pode ser localizada em qualquer ponto de um curso d'água, desde que o local seja capaz de unir os três pontos essenciais (extravador, maciço e reservatório), num conjunto satisfatório de segurança, aliado à simplicidade e baixo custo de execução.

Conforme, Mattos, Silva e Pruski (2000), durante os estudos de localização, na escolha do local para construção da barragem de terra, devem-se ponderar as vantagens e desvantagens de cada situação, de modo que o local selecionado, satisfaça da melhor maneira possível, a barragem, a represa e o canal extravador, conforme ilustrado a Figuras 3 e Figura 4, a seguir:

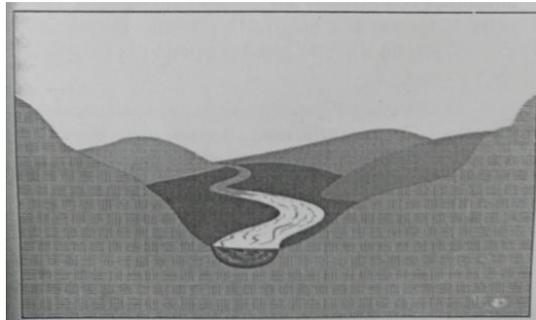
Figura 3 - Representação esquemática com perfil adequado para se construir o extravasador de águas fora da barragem.



Fonte: Lopes e Lima (2005).

A Figura 3, detalha um local onde o curso d'água, passa por uma seção, onde o vale é estreito, favorecendo no volume de material para a construção do maciço e no volume de corte do aterro, para a construção do canal extravasador da barragem. Uma seção bastante uniforme na lateral esquerda e direita, acima do curso d'água, o que é favorável a estabilidade do maciço da barragem e as condições de volume armazenado.

Figura 4 - representação esquemática com perfil inadequado para se construir o extravasador de águas fora da barragem.



Fonte: Lopes e Lima (2005).

A Figura 4, detalha um local onde o curso d'água, passa por uma seção, onde o vale é estreito, favorecendo no volume de material para a construção do maciço, porém no volume de corte do aterro e para a construção do canal extravasador da barragem, caracteriza um local inapropriado. Descreve um movimento muito grande na terraplanagem, quanto ao corte e aterro e o volume quanto a capacidade de armazenamento do reservatório, representa ser muito pequeno, pelas condições topográficas do terreno.

Mattos, Silva e Pruski (2000), descrevem entre as avaliações que se fazem necessárias, estão: estudos geológicos e geotécnicos, além de alguns aspectos topográficos da área de construção do maciço. Segundo os autores, estes estudos tratam de dois aspectos a seguir:

- O local da barragem e obras anexas, que garantam uma escolha adequada e segura, sobretudo quanto as fundações, ombreiras e encostas naturais nas vizinhanças da obra e;
- Os materiais naturais de construção, necessários à realização das obras da barragem.

2.4.1 Estudos geológicos no local do barramento

Mattos, Silva e Pruski (2000), sugerem que o maciço não deve ser assentado sobre lajeiros de pedra, aflorantes ou presentes em pequenas profundidades. A infiltração da água do reservatório, proporciona o escoamento entre o aterro e o lajeiro de pedras, o que compromete, seriamente, a estabilidade da barragem, ocorrendo o deslizamento do aterro, em razão da frágil soldadura às pedras rochosas.

Lopes e Lima (2005), prescrevem que o maciço da barragem deve ser assentado com poucos afloramentos de rochas e nascentes de água, evitando-se solos alagados ou arenosos, optando-se por solos argilosos, secos e profundos.

Conforme Carvalho (2008), na escolha do local para a construção do maciço da barragem, ao realizar a escavação até encontrar o material rochoso ou solo de boa resistência, não deve ser em camadas muito profundas, pois encarece a obra quanto a movimentação de material. Um estudo de sondagens, pelo método de trincheiras e tradagem, são métodos simples e suficientes para realizar a coletas de amostras deformadas e indeformadas, que são utilizadas na realização dos ensaios de caracterização dos materiais, resistência, compactação e permeabilidade, por meio de análises e procedimentos realizados em laboratório. Deve-se realizar um estudo das camadas do subsolo no local da fundação, de forma que se possa conhecer a sua estabilidade. Se a fundação onde o maciço for construído, possuir argila mole, a mesma deve ser removida de forma parcial ou total, por meio de uma boa drenagem do local, afim que a barragem assente sobre um terreno firme, ficando livre de escorregamentos e deslizamentos, após a construção do maciço.

2.4.1.1 Estudos geotécnicos

Mattos, Silva e Pruski (2000), orientam quanto ao aspecto geotécnico, devem ser avaliados a qualidade do material no que se refere à sua capacidade de suporte da carga do maciço. Toda a obra deve ser construída com os materiais, próximos ao barramento e deverá ser adaptado conforme materiais disponíveis.

Cruz (1996) orienta que na pesquisa dos materiais, devem ser realizadas com exaustão em dois aspectos fundamentais a serem considerados:

- O volume de material não só para a barramento, mas também para o movimento de terra, rocha, agregados, areias, etc. A falta de previsão das áreas de empréstimo de solos, pode comprometer o projeto, pois não é raro constatar na metade da execução da obra, que um determinado material acabou, onde as espessuras previstas das camadas nas áreas de empréstimo, eram menores do que se estimava.

- A compactação deve ser conhecida, pois problemas de compactação, ocorrem em uma frequência maior do que a esperada. Solos muito úmidos geram problemas de produtividade e solos secos exigem recursos adicionais de umedecimento.

Conforme Mattos, Silva e Pruski (2000), na pesquisa do solo para ser utilizado no barramento, com relação à qualidade e suas características, pode ser feito coletas por meio de tradagem, trincheiras e sondagens. As perfurações com o trado, constitui o processo mais simples, para investigações preliminares das condições geológicas, obtendo-se amostras deformadas em pesquisa de áreas de empréstimo, determinação do nível da água e indicação de mudanças nos tipos de materiais atravessados.

2.4.1.2 Classificação dos materiais utilizados na construção de barragens de terra

Os cascalhos, são utilizados nas camadas de transição entre os filtros e enrocamentos. Essas frações devem ter coerência suficiente para não se desagregarem pela ação da água, quando expostas aos fatores climáticos e ter resistência suficiente para resistirem aos impactos mecânicos (MATTOS; SILVA; PRUSKI, 2000). O material mais grosseiro (agregado graúdo ou cascalho), deve ser utilizado na constituição das faces de montante e jusante da barragem. (COSTA, 2012).

A curva da granulometria de distribuição do diâmetro das partículas, é usada para obtenção da classificação granulométrica do solo. O solo pode ser de textura fina, média ou grosseira e, quando composto de partículas de maior granulometria, é denominado “cascalho”, utilizando-se sempre o critério da fração granulométrica dominante. O solo é considerado “grosseiro”, quando mais de 50% da amostra do material, não passa na peneira nº 200. Se mais de 50% ficar retido na peneira nº 4, ele é considerado “cascalho”; caso contrário, é denominado “areia grossa, média o fina”. No solo de textura fina, menos de 50% da amostra do material deve ficar retido na peneira 200. (MATTOS; SILVA; PRUSKI, 2000; CRUZ, 1996).

Segundo a ABNT da NBR 6502/1995, da classificação de Rocha e Solos, resumiu as

características gerais dos materiais para a utilização em construção civis, conforme apresentado no Quadro 1:

Quadro 1 - Classificação dos solos, segundo a granulometria utilizados nas construções civis.

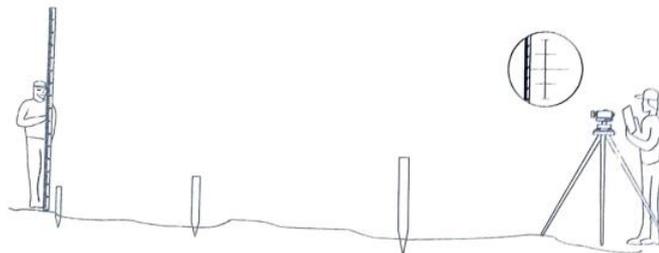
Rocha	
Bloco de rocha	acima de 1,0 m
Matacão	20 cm - 1,0 m
Pedra-de-mão	6 cm - 25 cm
Solo	
Pedregulho	2,0 mm - 60 mm
Areia Grossa	0,60 mm - 2,0 mm
Areia Média	0,20 mm - 0,60 mm
Areia Fina	0,05 mm - 0,42 mm
Silte	0,002 mm - 0,06 mm
Argila	Inferior a 0,002 mm

Fonte: Adaptado da NBR 6502 (1995).

2.5 Dimensionamento da seção de barramento em pequenas barragens de terra

Conforme Carvalho (2008), após ser definido o local da construção do maciço da barragem, deve-se proceder o detalhamento da área de inundação por meio de levantamento topográfico da bacia de acumulação, conforme descreve a Figura 5:

Figura 5 – Levantamento Planialtimétrico da bacia de acumulação.

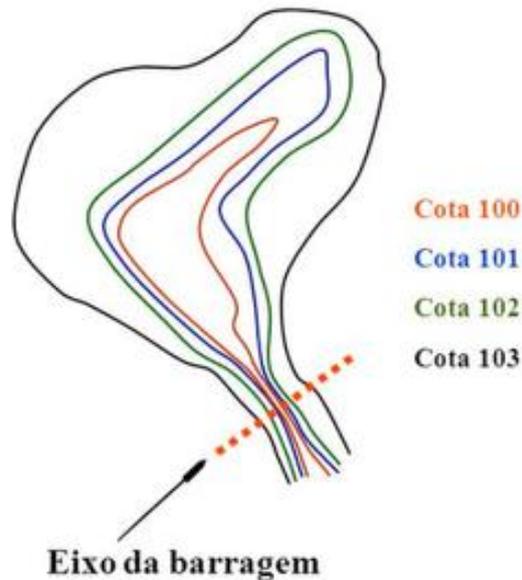


Fonte: Carvalho (2008).

Este levantamento tem por objetivo um melhor conhecimento da área onde será construída a barragem. Normalmente utiliza-se o levantamento do eixo da barragem e de seções intermediárias, transversais ao eixo com levantamento de curvas de nível (normalmente de metro em metro) em toda a área a ser inundada pela represa. O levantamento do eixo da barragem tem por finalidade o fornecimento de dados para o projeto do corpo da barragem. Estaqueia-se com uma distância que varia de acordo com a uniformidade da encosta (não necessita ser constante). (CARVALHO, 2008, p. 63).

O levantamento do eixo da barragem, obtido através das curvas de nível onde será alocado o barramento com as seções intermediária que representa a área inundada, é representada na Figura 6:

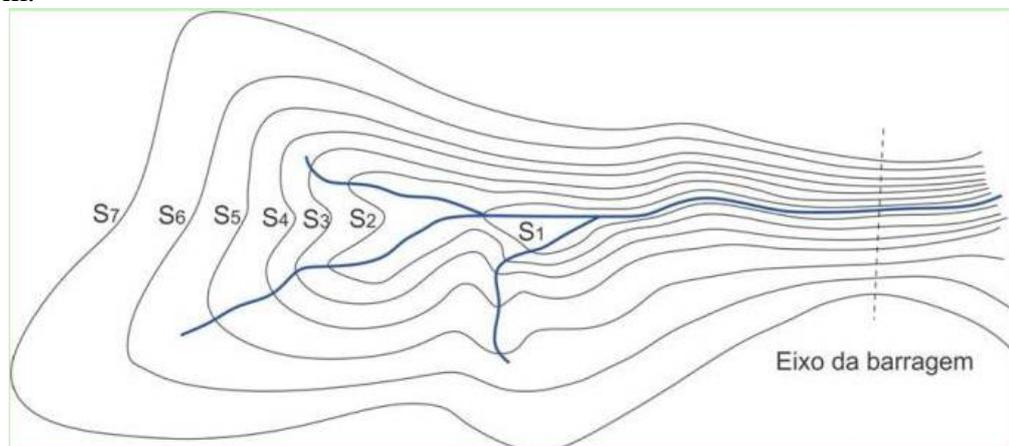
Figura 6 – Planta Planialtimétrica do local da construção e levantamento do eixo da barragem.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

Conforme Carvalho (2008) e Cruz (1996), após o levantamento planialtimétrico do local da construção da barragem, (levantamento do eixo do maciço, das seções intermediárias transversais ao eixo, com o levantamento das curvas de níveis), define-se a altura da barragem. conforme as seções descritas na Figura 7.

Figura 7 – Levantamento da curvas de níveis, seções intermediárias transversais e do eixo da barragem.



Fonte: Carvalho (2008).

2.6 Perfil da barragem

Mattos, Silva e Pruski (2000), prescrevem, que a altura total de uma barragem de terra, depende da altura da lâmina de água normal, da altura máxima da lâmina de água que atravessa o extravasor (altura que representa o volume de espera das vazões máximas das cheias), e da folga livre, que representa a diferença entre a altura que representa o volume de espera das vazões de cheias e a crista da barragem, conforme a Equação 1, para determinar a altura total da barragem:

$$H = H_n + H_e + f \quad \dots(1)$$

Onde:

H=altura total da barragem (m);

H_n=altura normal da barragem (m);

H_e=altura máxima da lâmina de água que atravessa o extravasor (m); e

f=folga livre (m).

2.6.1 Largura da crista

Quanto maior a largura da crista de uma barragem de terra, maior será o volume de material, proporcionando maior estabilidade no maciço da barragem e menor possibilidade de ocorrer infiltração de água. A largura da crista, deve ser o suficiente para fazer com que a linha freática, que representa a divisória entre o meio saturado e não saturado se mantenha no interior do maciço da barragem, quando o reservatório estiver cheio, além da sua largura, ser o suficiente para resistir aos choques decorrentes do embate das ondas. Em barragens de terra, sua largura não deve ser inferior a 3 m, no caso da não utilização em tráfego de rodagem, caso seja utilizada para este fim, recomenda-se que sua dimensão deve ser de 4 a 6 m. (MATTOS; SILVA; PRUSKI, 2000; CRUZ, 1996).

Carvalho (2008), sugere que a largura da crista deve ser sempre maior que 3 m, no caso da mesma ser utilizada por tráfego de veículos, sua largura deve ser de no mínimo 6 m. O autor apresenta sugestões (práticas) de valores da largura da crista, em função da altura da barragem, conforme descreve a Tabela 1:

Tabela 1 – Valores da largura da crista (c) em metros, em função da altura da barragem (H) em metros.

Altura da barragem H (m)	4	6	8	10	>12
Largura mínima da crista (m)	4	3,5	4	5	6

Fonte: adaptado de CARVALHO, 2008 APUD DAKER, 1983.

Mattos, Silva e Pruski (2000), sugerem dimensionar a largura da crista, por meio da Equação 2, modelo de Preece a seguir:

$$c = 1,1 H^{1/2} + 0,9 \quad \dots(2)$$

onde:

c= largura da crista (m); e

H= altura da barragem (m).

2.6.1.1 Inclinação dos taludes

Conforme Carvalho (2008), Mattos, Silva e Pruski (2000), a inclinação dos taludes da barragem é caracterizada pelo coeficiente de inclinação “z”, que indica a razão de quantas vezes uma medida na horizontal é maior que uma medida vertical, formando um ângulo de inclinação, formado que a linha deste faz com a horizontal, na montante e jusante. A inclinação vai depender do tipo de material, usado na construção, e se não houver disponibilidade de material com boa qualidade, deve-se adotar menores inclinações, favorecendo maior estabilidade da barragem. O talude de montante deve ser menos inclinado que o de jusante, pois desta forma, além de proporcionar maior segurança, dificulta a infiltração da água no interior do maciço da barragem. Carvalho (2008), sugere as seguintes inclinações dos taludes, em função do tipo de material utilizado e altura do maciço da barragem, conforme descrito na Tabela 2:

Tabela 2 - Inclinações de taludes, montante e jusante (Z:1), conforme altura e material utilizado no corpo da barragem.

	Altura do aterro (**)			
	Até 5 metros		De 5,1 a 10 metros	
Material do aterro	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Solo argiloso	2,00:1	1,75:1	2,75:1	2,25:1
Solo arenoso	2,25:1	2,00:1	3:00:1	2,25:1
Areias e cascalhos	2,75:1	2,25:1	3:00:1	2,50:1
Pedras de mão	1,35:1	1,30:1	1:50:1	1,40:1

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008) apud DNAEE (1985).

Conforme o DNAEE (1985), as inclinações sugeridas na Tabela 2, prescrevem as seguintes condições:

(*) valores usuais considerando-se que o material de fundação não condicione a estabilidade do talude (casos nos quais as camadas naturais do solo, abaixo da superfície, sejam mais resistentes que os maciços compactos das barragens); e
 (**) Para barragens com altura > 10 m podem ser usadas as mesmas inclinações dos taludes para as barragens de terra, desde que a estabilidade da barragem seja verificada, quanto ao fator de segurança.

2.6.1.2 Largura da base da seção transversal da barragem

Carvalho (2008), Mattos, Silva e Pruski (2000), indicam a Equação 3, para calcular a largura da base, em função da geometria da barragem, conforme descrito na Figura 8:

$$B = c + (z_m + z_j) H \quad \dots(3)$$

Em que:

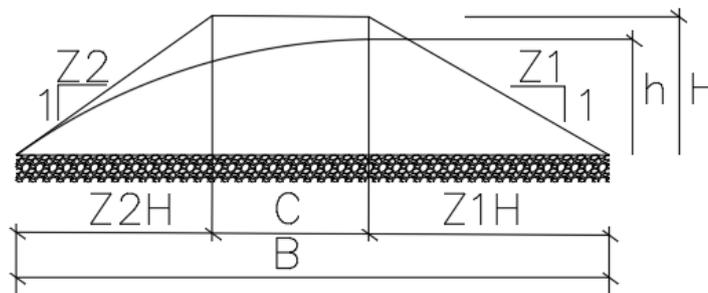
c =largura da crista da barragem (m);

z_m =projeção horizontal do talude a montante (m);

z_j =projeção horizontal do talude a jusante (m); e

H =altura da barragem (m).

Figura 8 – Seção transversal do maciço (projeção dos taludes e crista).



Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

2.6.2 Cut-off ou trincheira de vedação

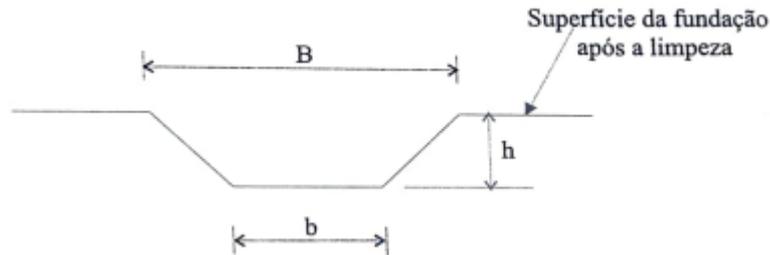
Conforme Carvalho (2008), Lopes e Lima (2005) e Costa (2012), a necessidade de se construir um cut-off, com material impermeável (argila) na fundação de uma barragem de terra, será constatada, após realizar a sondagem do local, onde será assentado o maciço da barragem, onde a mesma detectar a presença de material permeável a pouca profundidade. No caso de

abertura de trincheira, deverá atravessar todas as camadas permeáveis, que permitiriam futuras infiltrações, e aquelas formadas por barro podre que afetariam a estabilidade do aterro. Deve-se aprofundar a trincheira até a profundidade onde o solo apresente boa consistência, assim como, o seu comprimento deve ser ao longo de todo eixo barrável.

Costa (2012), orienta que à construção do *cut-off* e o núcleo da barragem seja com solo argiloso de boa qualidade e baixa permeabilidade. Segundo Lopes e Lima (2008), a largura mínima do *cut-off* e núcleo deve ser de 1/3 da altura da lâmina d'água acima daquele ponto.

Carvalho (2008), sugere dimensões da trincheira, de acordo com a altura da barragem (m), conforme a Tabela 3. A Figura 9, representa uma forma esquemática de uma trincheira de vedação:

Figura 9 – Representação esquemática de uma trincheira na fundação da barragem.



Fonte: Carvalho (2008).

Tabela 3 – Dimensões da trincheira de acordo com a altura da barragem (m).

Altura da barragem (m)	B (m)	b (m)	h (m)
Até 5,00	3,0	1,5	0,5
6,00	3,0	1,5	0,6
7,00	3,0	1,5	0,7
8,00	3,2	1,6	0,8
9,00	3,6	1,8	0,9
10,00	4,0	2,0	1,0

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008).

A construção do núcleo da barragem, será a partir da base maior (B), representada pela parte superior da trincheira ou cut-of, obedecendo a mesma largura, até a cota de água máxima, da lâmina de água natural e no topo, sua largura com dimensão de 1 m. O enchimento da vala deve ser feito em camadas de no máximo 15 cm de espessura. A compactação do (*cut-off* ou trincheira de vedação) e do núcleo, deve ser realizada com a densidade máxima e umidade ótima, determinada pelo ensaio de Proctor em laboratório. (LOPES; LIMA, 2005; CARVALHO, 2008).

2.7 Drenos

Carvalho (2008), orienta que, quando na construção de uma maciço envolvendo barragens de terra com materiais não homogêneos, quanto à permeabilidade, ou quanto à sua altura, e conseqüentemente a sua carga hidráulica forem altas, é conveniente a instalação de filtros, na parte da jusante do aterro, logo após o núcleo, devendo ser construído ao longo de todo o comprimento do maciço. Os autores Matos, Silva e Pruski (2000, p. 113), priorizam o uso de drenos em barragens, visando a segurança, quanto a estabilidade de taludes, através da seguinte analogia:

Nenhuma barragem de terra é considerada impermeável, devendo-se contar com a percolação de água através do aterro, bem como sob ele. Se a força de percolação em um ponto do aterro exceder a resistência ao deslocamento de uma partícula do solo nesse ponto, essa partícula entra em movimento. Terse-a, conseqüentemente, escoamento das menores partículas, em geral a partir da região imediatamente a jusante do pé do aterro, o que é conhecido como erosão tubular (“piping”). Por essa razão, o corpo da barragem deverá ser protegido contra o arraste de partículas finas no seu interior, principalmente quando o corpo da barragem for constituído por material de alta permeabilidade, uma vez que esse fenômeno pode vir a proporcionar a ruptura do maciço.

Com o objetivo de se precaver quanto ao aparecimento de “piping” no maciço, quando do uso de materiais muito permeáveis, tem sido recomendada a disposição de materiais grosseiros para agirem como dreno da água percolante. Os drenos deverão estar posicionados no talude de jusante, desde sua base até uma altura mínima de $H_n/3$. Caso haja previsão de que a linha de saturação possa atingir o talude de jusante em altura superior a $H_n/3$ (verificar traçando a linha de saturação), esses drenos deverão ser prolongados até a cota máxima prevista no N.A.

O sistema de drenagem interna consiste na utilização de drenos verticais ou inclinados, e horizontais, de forma que os drenos verticais (ou inclinados) interceptam o fluxo que passa dentro do corpo da barragem, enquanto os horizontais interceptam o fluxo da fundação e encaminham o fluxo do interior do maciço da até o pé do talude de jusante. (MASSAD, 2010; CRUZ, 1996).

2.7.1 Erosão superficial dos taludes

Segundo Souza (2013), Cruz (1996) e Massad (2010), o talude montante pode sofrer erosão provocada por ondas e o talude de jusante erosão das águas provocadas pelas chuvas. Conforme Souza (2013), nos taludes de montante a erosão é prevenida com camada de enrocamento (rip-rap), formada por pedras suficientemente grandes para não se deslocarem, que resistam aos impactos das ondas. Sherard et al. (1963) apud Mendonça (2013), descreve

uma correlação entre a altura da onda máxima, espessura e diâmetro médio que o rip-rap deve ter, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Correlação entre a altura da onda, diâmetro e espessura do rip-rap.

Altura da onda máxima (m)	Diâmetro médio do rip-rap (cm)	Espessura do rip-rap (cm)
< 0,60	25	30
0,60 a 1,20	30	45
1,20 a 1,80	37	60
1,80 a 2,40	45	75
2,40 a 3,00	55	90

Fonte: Adaptado de Sherard et al. (1963) apud Mendonça (2013).

Sherard et al. (1963) apud Mendonça (2013), também sugere valores mínimos que deve ter a espessura da camada de transição ou de rip-rap e a camada de solo do talude que deve ser executada se o rip-rap não conter finos, através da Tabela 5.

Tabela 5 – Correlação entre a altura da onda e espessura mínima de transição do rip-rap.

Altura da onda (m)	Espessura mín. de transição (cm)
< 1,20	15
1,20 a 2,40	22,5
2,40 a 3,00	30

Fonte: Adaptado de Sherard et al. (1963) apud Mendonça (2013).

Sendo os diâmetros mínimos e médios limitados pelas Equações 4 e 5 a seguir:

$$D_{\text{máx}} \approx 1,5 D_{50} \quad \dots(4)$$

$$0,6 D_{50} > D_{\text{mín}} > 2,5 \text{ cm} \quad \dots(5)$$

Segundo Costa (2012), a extensão do rip-rap ao longo da altura do talude deve seguir no mínimo da crista da barragem até a altura de 1,5 m abaixo do $NA_{\text{mín}}$ (nível máximo d'água de montante).

Conforme Souza (2013), Cruz (1996) e Massad (2010), o talude de jusante a erosão deve ser prevenido com uso de vegetação rasteira, banquetas (a cada 10 m de altura da barragem) e canaletas de drenagem superficial. Outra solução é a construção de uma camada

de material granular (cascalho ou brita), podendo ser necessário uma camada de transição ente o aterro e essa camada de material granular.

2.8 Processo de compactação e maquinários utilizados em barragens de terra

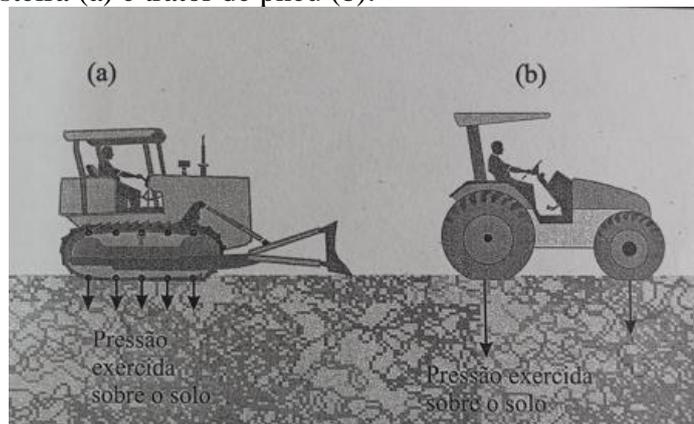
Conforme Costa (2012) e Carvalho (2008), entende-se por compactação de um solo, a redução do índice de vazios, por processos mecânicos, podendo ser rápida ou demorada, conforme a sua composição granulométrica, na qual irá determinar o grau de compactação do material *in situ*.

Conforme Salinas (2017) e Carvalho (2008), a compactação na construção do barramento da barragem, deve ser realizada pelo método de terra compacta, no qual as camadas são dispostas entre 10 e 25 cm de espessura. No caso de solos siltosos, a compactação se faz pelo próprio equipamento de transporte (conjunto scraper madal – trator), método utilizado em barragens de pequeno porte.

Carvalho (2008), sugere que para terrenos arenosos a compactação deve ser realizada com rolos lisos e em locais com solos argilosos, com a utilização de rolos tipo pé de carneiro, procedimento pelo qual, permite uma construção perfeita, possibilitando uma melhor seleção do material.

Lopes e Lima (2005), orientam, que durante a compactação, deve-se optar pelo uso do trator de esteira, sendo que a compactação não poderá ser realizada utilizando-se apenas este equipamento, pois o mesmo não oferece uma boa estabilidade à barragem, conforme descreve a Figura 10, quanto ao efeito de diferente maquinários na compactação do solo:

Figura 10 – Trator de esteira (a) e trator de pneu (b).



Fonte: Lopes e Lima (2005).

Segundo Carvalho (2008), a Figura 10(a), demonstra a diferença entre as forças de cargas, impostas na vertical, entre os tratores de esteira e pneu, o que prova que o trator de esteira, compacta menos, devido a base de contato na superfície do solo ser maior, o que reduz a sua eficiência, por distribuir em uma área maior o peso do equipamento.

Carvalho (2008), Costa (2012) e Cruz (1996), orientam que durante a confecção do maciço da barragem, se o teor de umidade estiver abaixo da ótima, deve-se realizar o umedecimento das camadas de material dispostas no barramento (caminhões-pipa, munidos das barras de distribuição), até obter-se o ponto ideal, por outro lado, se estiver acima, recomenda-se movimentar as mesmas para enxugar mais rápido. Segundo os autores, para comprovar se a compactação está sendo realizada corretamente, deve-se determinar sinteticamente a umidade (método da frigideira a campo) e o peso específico aparente do material (processo do frasco de areia).

A Figura 11, descreve os equipamentos utilizados no processo de compactação do maciço da barragem.

Figura 11 – Equipamentos utilizado na compactação em solos siltosos (a), em solos arenosos (b) e em solos argilosos (c).



Fonte: LAFAETE locação de equipamentos (2022).

A escolha dos tipos de máquinas e equipamentos na construção da barragem, vai depender das características do projeto, conforme: tamanho do aterro, tipo de solo (argiloso, arenoso, siltoso, etc.), distância da área de empréstimo, tempo ao qual a obra deve ser concluída, topografia do local, etc. Deve-se realizar o planejamento dos serviços a serem executados, como forma de adequar melhor a escolha dos equipamentos, que garantam a eficiência durante as atividades realizadas no campo (CARVALHO, 2008).

Segundo Salinas (2017), no caso das construção do maciço para barragens de terra de pequeno porte, o uso de maquinária agrícola (conjunto scraper madal-trator e escavadeira) é o suficiente, atentando-se que as camadas devem ser dispostas entre 7,5-10 cm e, a compactação será realizada pelos pneus dos tratores, (cheios de água ou pequenos rolos) seguindo um trajeto

irregular ou paralelamente nas camadas dispostas, de forma a obter uma compactação mais adequada.

2.9 Estudo do comportamento mecânico no maciço de uma barragem de terra

Cruz (1996) Costa (2012), prescrevem às análises de estabilidade de taludes e os mecanismos potenciais de ruptura, devem ser adequadamente definidos em função da geometria da barragem, das propriedades geotécnicas dos materiais compactos, das camadas de fundação, e de prováveis condições de fluxo que estabelecem nas diversas condições de sollicitação. A estabilidade de obras de terra e enrocamento deverá ser verificada para três condições de sollicitação: final de construção, regime permanente de operação e rebaixamento do reservatório. As sollicitações dominantes deverão ser a do regime permanente de operação e rebaixamento rápido, para qual os níveis de segurança requeridos devem ser compatíveis com o empreendimento. Conforme Garcia (2013), a análise de rebaixamento rápido pode ser feita apenas na montante, caso não apresente variações em termos de fator de segurança entre a estabilidade da barragem em regime de final de construção e regime de operação.

2.10 Análise de estabilidade em taludes

A análise de estabilidade envolve um conjunto de procedimentos visando à determinação de um índice ou grandeza que permita quantificar o quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra, para um determinado conjunto de condicionantes atuantes (pressões neutras, sobrecargas, geometria, etc). Pode-se utilizar para uma análise de estabilidade de taludes, os métodos analíticos, que se baseiam na teoria do equilíbrio limite, análise limite e nos modelos matemáticos de tensão deformação. (PEREIRA, 2013, p. 22).

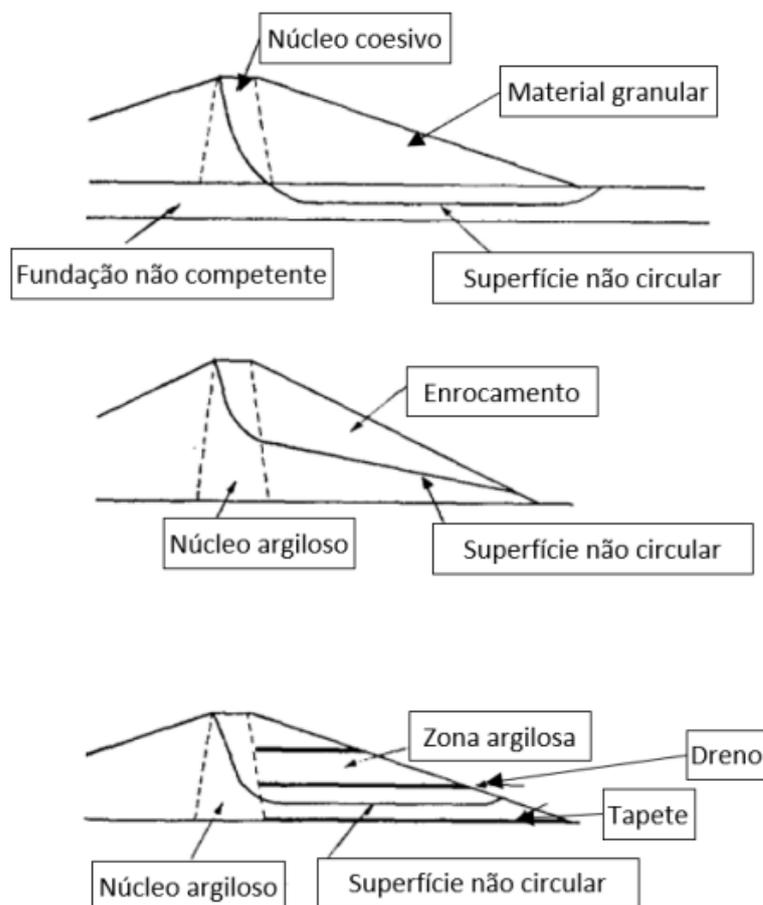
Conforme Pereira (2013), Cruz (1996) e Costa (2012), os métodos analíticos, empregando o equilíbrio limite, expressam a estabilidade de um talude ou uma encosta por um Coeficiente ou Fator de Segurança (FS). A análise de estabilidade por equilíbrio limite tem uma grande aceitação, que se deve basicamente a dois motivos: a simplicidade do método e ao nível satisfatório de acurácia dos seus resultados (no que diz respeito à segurança do maciço).

Entende-se por fator de segurança o valor numérico obtido da relação estabelecida pela resistência ao cisalhamento do material analisado ($\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$, onde c e ϕ são a coesão e o ângulo de atrito interno do solo, respectivamente, enquanto σ é a tensão normal atuante na

superfície potencial de ruptura), e a resistência ao cisalhamento mobilizada para garantir o equilíbrio do corpo deslizante, sob o efeito de esforços atuantes. (CRUZ, 1996; COSTA, 2012).

Segundo Dias (2021) apud Morgenstern e Price (1965), apresentaram um parecer descritivo de cálculo do fator de segurança satisfazendo as condições do equilíbrio limite, permitindo superfícies de rupturas em formatos não circular e circular. A Figura 12, apresenta condições em um talude de barragem, em que a superfície não circular caracteriza a ruptura em barragens com núcleo coesivo e argiloso.

Figura 12 – Condições de ruptura não circular em barragem com núcleo impermeável.



Fonte: Dias (2021), adaptado de Morgenstern e Price (1965).

A Figura 12, apresenta as condições de ruptura não circular, na qual uma barragem zonada é constituída de núcleo argiloso e coesivo, sendo o talude com núcleo coesivo o material utilizado nos espaldares seja granular ou pedregulhoso. Já para um talude constituído de núcleo argiloso, os espaldares devem constituir enrocamento ou uma zona argilosa, dreno na região da jusante e tapete impermeável. Está análise orienta selecionar o método a ser utilizado para

calcular o fator de segurança que atenda uma ruptura não circular, no caso de uma barragem com seção zonada.

Define-se um fator de segurança dado pela Equação 6:

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{mob}} \quad \dots (6)$$

onde:

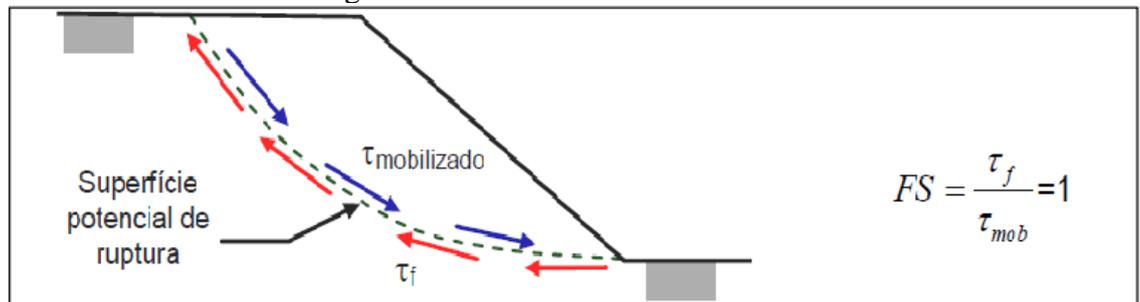
FS=fator de segurança em relação a resistência do solo;

τ_{res} =tensão cisalhante média da resistência do solo (KPa); e

τ_{mob} =tensão cisalhante mobilizada desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura (KPa).

Pereira (2013) e Cruz (1996), prescrevem, que a instabilidade do talude será deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualarem à resistência ao cisalhamento, conforme ilustra a Figura 13:

Figura 13 – Geometria do escorregamento.



Fonte: Pereira (2013).

Pereira (2013), e Cruz (1996), afirmam que quanto mais próximo de 1,0 estiver FS, mais próximo o maciço estará da ruptura. No que diz respeito aos valores propostos pelo “Corps of Engineers” (FS = 1,3 a 1,4), recomendam-se alguns cuidados ao se adotar tais valores; considera-se imprescindível fixar o valor mínimo do fator de segurança em cada projeto específico em função da peculiaridade do mesmo, de acordo com o grau de conservantismo na fixação das hipóteses de projeto, o grau de confiança dos resultados das investigações de campo e dos ensaios de laboratório, o método de análise adotado, etc (MARANGON, 2004). Geralmente, um valor de 1,5 para o fator de segurança, em relação à resistência, é aceitável para um projeto de talude estável. (CRUZ, 1996).

Honório (2022), prescreve em que, as análises sísmicas (regiões que podem entrar em ruptura no maciço da barragem) têm sido recomendadas mesmo em regiões assísmicas por conta da possibilidade de ocorrência de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório.

Assim, os taludes do reservatório devem apresentar estabilidade sob condições de precipitações elevadas, carregamentos sísmicos, rebaixamento rápido do lençol e qualquer outra situação que ameace a ruptura da estrutura e coloque em risco a segurança. O Quadro 2, resume os fatores mínimos de segurança aceitáveis para os cálculos de estabilidade de taludes de barragens, segundo a NBR 13.028 ABNT, 2017.

Quadro 2 – Fatores de segurança mínimos para barragens de terra em diferentes condições.

Fase	Tipo de ruptura	Talude	Fator de segurança mínimo
Final de construção	Maciço e fundações	Montante e jusante	1,3
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
Operação com rede de fluxo em condição extrema de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,3
Operação com rebaixamento rápido do nível d'água do reservatório	Maciço	Montante	1,1
Operação com rede de fluxo em condição normal Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	1,5
		Entre bermas	1,3
		Montante e jusante	1,1

Fonte: Adaptado da NBR 13.028 (2017).

2.10.1 Métodos utilizado para o cálculo de estabilidade em barragens com seções zonadas, mistas ou homogêneas

Conforme Pereira (2013) e Júnior (2019), os métodos baseados no equilíbrio limite das fatias, para determinar a “estabilidade de taludes” prescrevem as exigência descritas na NBR 11682/1991. O FS, pode ser obtido através dos seguintes métodos disponíveis no SLOP/W do *software* GEO-SLOP, para uma seção geométrica envolvendo taludes de barragens: Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967), Bishop (1955), Jambu (1973) e Fellenius (1927). De acordo com GEO-SLOPE (2019), estes métodos são bastante similares. As diferenças entre eles dependem de: quais equações estáticas são consideradas e satisfeitas; quais forças entre fatias são incluídas e qual é a relação considerada entre as forças cisalhante e normal entre as fatias. (CRUZ, 1996).

De acordo com Pereira (2013) a maioria dos métodos de equilíbrio limite divide a região de solo delimitada pela superfície de ruptura em diversas fatias verticais e aplica as equações de equilíbrio para cada fatia isoladamente.

Segundo Cruz (1996), Pereira (2013) e Costa (2012), existem uma variedade de métodos propostos, para uma solução de equilíbrio estático no maciço de uma barragem de terra, nos quais os métodos utilizados, podem ser, quanto à forma da superfície e ser dividido em dois grupos: Métodos para análise de superfície circulares (mais utilizados para facilitar a solução de casos) e, métodos para análise de superfícies quaisquer.

O método das fatias considera a heterogeneidade do solo quanto a tensões, geometria do talude e irregularidade da superfície considerada, além disso ele permite a distribuição da poropressão quando necessário, de modo que seja possível analisar a situação mais crítica (HONÓRIO, 2022).

De acordo Marangon (2004), ao ser rompida a massa de um solo, que em muitos casos, a geometria da superfície rompida, se apresenta a forma próxima de um círculo na ruptura, sendo o mais comum, quanto a homogeneidade da massa de solo em barragens de terra.

A estabilidade de uma barragem é avaliada através dos cálculos de estabilidade de taludes de montante e jusante. Essas análises podem ser realizadas durante as etapas de construção da barragem e ao longo da sua vida útil (CRUZ, 1996; PEREIRA, 2013).

Pereira (2013), Junior (2019) e Cruz (1996), descrevem alguns dos métodos para cálculo da estabilidade de taludes de barragens de terra, por equilíbrio-limite, mais utilizados atualmente na Tabela 6. Os métodos são diferenciados, quanto á forma da superfície de ruptura

considerada, quanto às equações de equilíbrio usadas e quanto às hipóteses sobre as forças entre as fatias do talude.

Tabela 6 – Características dos métodos de análise de estabilidade de taludes

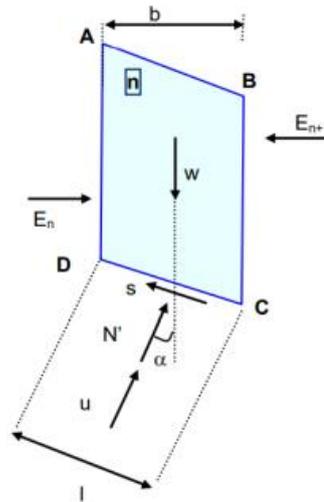
Método	Características
Fellenius (1927)	Superfície de ruptura circular
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
Bishop Simplificado (1955)	Superfície de ruptura circular
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
Janbu Simplificado (1968)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
	Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais
Morgenstern e Price (1965)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
	Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais
Spencer (1967)	Superfície de ruptura qualquer
	Satisfaz o equilíbrio de momentos
	Satisfaz o equilíbrio de forças verticais
	Satisfaz o equilíbrio de forças horizontais

Fonte: JUNIOR (2019) apud Tonus (2009).

2.11 Método de Bishop Simplificado e Morgenstern e Price

Conforme Neto (2019), Bishop (1955) propôs um método simplificado que consiste em desprezar a componente tangencial das forças entre as fatias de modo que a resultante entre elas é horizontal. Conforme Cruz (1996), o método é muito utilizado no cálculo de estabilidade de taludes, considerando uma superfície de ruptura circular. A Figura 14, mostra os esforços na fatia de Bishop:

Figura 14 – Esforços na fatia de Bishop.



Fonte: Neto (2019).

Assim o fator de segurança (FS) é dado pela Equação 7 e 8, segundo Bishop (1955):

$$F_s = \frac{\sum (C' l + (W \cos \alpha - ul) \operatorname{tg} \Phi') \frac{1}{ma}}{\sum W_i \operatorname{sen} \alpha} \quad \dots(7)$$

Onde ma é expresso pela Equação 6:

$$ma = \cos \theta + \frac{\operatorname{tg} \theta x \operatorname{sen} \theta}{f_s} \quad \dots(8)$$

Onde:

F_s é fator de segurança (adimensional);

C' é a coesão do solo (KPa);

Φ' é o ângulo de atrito ($^\circ$);

l é o comprimento da base da fatia (m);

α é a inclinação da base da fatia, sendo (-) ao lado esquerdo e (+) lado direito ao centro da parte inferior de cada fatia com o tracejado a partir da localização "x" acima do círculo ($^\circ$); W_i é o peso da n-ésima fatia (KPa);

$u = hp$. γ_w , força de percolação da água (KPa);

Hp = perda de carga em relação ao ponto analisado (m);

Como o F_s aparece em ambos os lados (Equação 7), o cálculo do fator de segurança é feito da seguinte forma: toma-se para F_s do segundo termo da equação um valor aproximado F_0 (por exemplo, obtido pelo método de Fellenius), e recalcula-se o segundo membro da

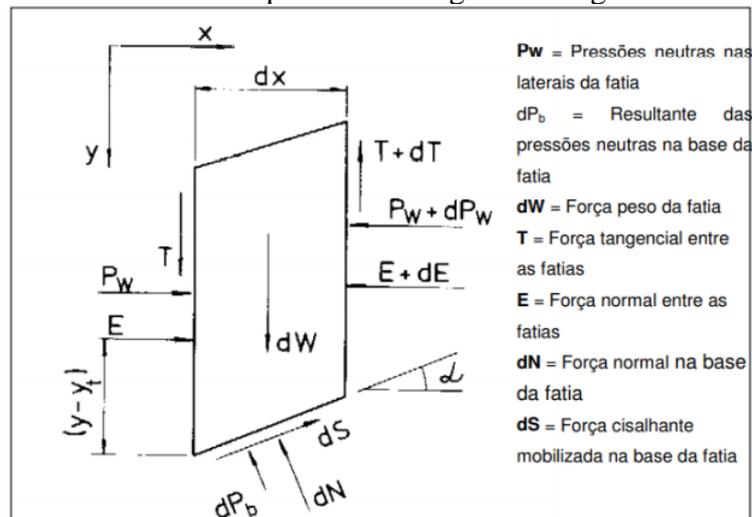
fórmula. Se o valor obtido de F_s do primeiro termo da equação diferir muito de F_0 , repete-se o cálculo até que o valor obtido de F_s , seja aproximadamente igual ao F_0 assumido. Em geral, três interações satisfazem a procura de F_s , quando então se tem aproximadamente F_0 assumido igual ao F_s obtido. (PEREIRA, 2013).

O Propósito ao qual se refere este trabalho, para um estudo de caso, envolvendo análise de estabilidade do talude de uma barragem de terra, não será utilizado todos os métodos descritos por pereira (2013). O mesmo limita-se, devido aos métodos construtivos da barragem, que proporciona critérios de análise de taludes, mais simplificados, conforme a sua geometria e uso de materiais utilizados na construção do maciço. Conforme Pereira (2013), Cruz (1996) e Honório (2022), o método de Bishop simplificado, atende as condições de análises de segurança do talude ao qual se propõe este trabalho, através dos dados obtidos por meio dos ensaios laboratoriais, sendo suficientes para analisar o “FS” pelo método de análise de superfície circular.

Conforme Souza (2016), Dias (2021) e Cruz (1996), o método de Morgenstern e Price (1965), satisfaz rigorosamente todas as condições de equilíbrio estático: equilíbrio de forças verticais, equilíbrio de forças horizontais e equilíbrio de momentos em qualquer superfície de ruptura (circular ou planar). Dias (2021), prescreve que a metodologia proposta pelo método, atende todas as condições de equilíbrio, permitindo a aplicação de diferentes funções de força entre fatias, onde a massa instável é dividida em fatias infinitesimais. Vale ressaltar que devido à complexidade do cálculo, recursos computacionais são necessários.

A Figura 15, mostra as forças entre as fatias consideradas na metodologia imposta pelo método:

Figura 15 – Forças atuantes nas fatias pela metodologia de Morgenstern e Price.



Fonte: Dias (2021).

Segundo os autores, o método elaborado por Morgenstern-Price assume fatias de largura infinitesimal. Netto (2019) afirma que, em busca de tornar o problema estaticamente determinado, assume-se que a inclinação da resultante θ pode variar ao longo da superfície através da função dada pela Equação 9.

$$\text{Tg } \Theta = \frac{T}{E} = \lambda f(x) \quad \dots (9)$$

Onde λ é um parâmetro escalar determinado a partir da solução de cálculo de um fator de segurança e $f(x)$ uma função arbitrária. A escolha da função $f(x)$ exige um julgamento de como a inclinação das forças entre fatias varia no talude.

2.12 Ensaios geotécnicos aplicados aos materiais utilizados na construção do barramento

Segundo Costa (2012), Cruz (1996) e Carvalho (2008), deve se dar uma atenção especial, quanto a escolha dos materiais que serão utilizados na construção do maciço da barragem, optando-se por solos permeáveis, de forma a evitar o excesso de infiltração no interior do maciço, podendo comprometer a estabilidade da barragem. Observações detalhadas, obtidas através de ensaios laboratoriais, são indispensáveis, quanto a esses procedimentos relacionados à escolha de materiais. (CARVALHO, 2008; COSTA, 2012).

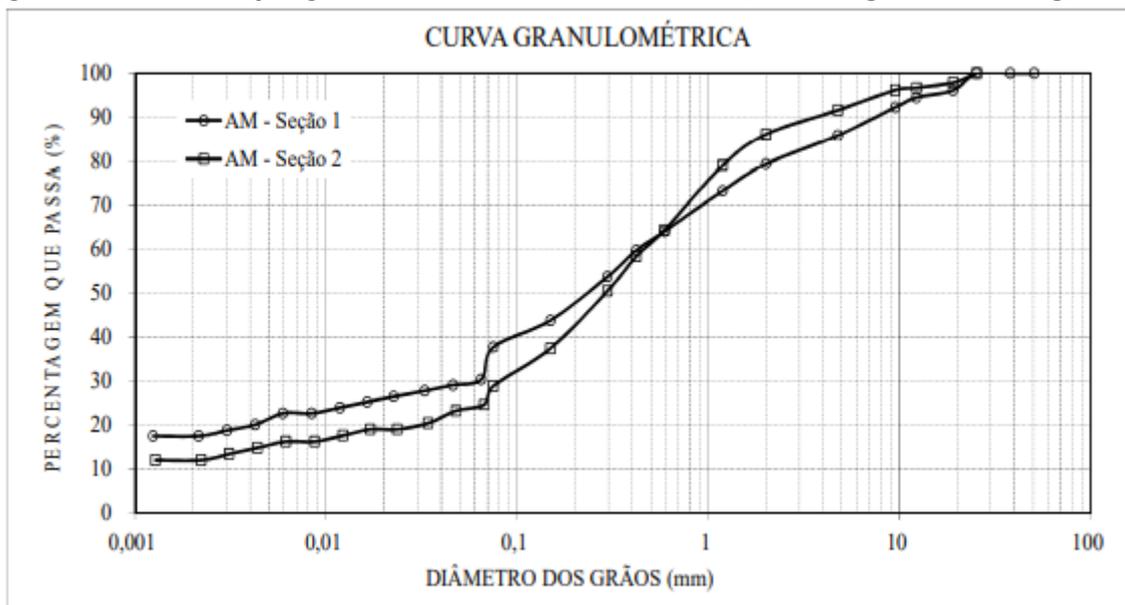
Costa (2012) e Cruz (1996), prescrevem os seguintes ensaios para caracterizar os materiais utilizados na construção do barramento, através de seus índices físicos e parâmetros de resistência, complementados pelas características de compactação e permeabilidade: análise granulométrica; limites de consistência (LL e LP); umidade natural; peso específico real; densidade máxima seca (Proctor normal); umidade ótima (Proctor normal); permeabilidade e parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito interno). Para solos puramente argilosos, recomenda-se o ensaio de adensamento. Os ensaios de resistência ao cisalhamento podem ser feitos pelos métodos de cisalhamento direto ou triaxial.

Conforme Costa (2012), as amostras coletadas, devem ser acondicionadas em sacos de 30 kg e encaminhadas ao laboratório para ensaio. Sempre que possível, deve-se realizar no campo o ensaio da massa específica 'in situ'. (COSTA 2012).

Conforme Cruz (1996), deve-se realizar os procedimentos cabíveis primeiramente pela NBR 6457/2016, que relaciona a preparação da amostra de solo deformada. A análise granulométrica de um solo é realizada através do ensaio precedido pela NBR 7181/2016.

Araújo (2013), realizou ensaios geotécnicos para coletar os resultados obtidos e verificar a estabilidade dos taludes da barragem Olho d'Água, localizada no distrito de São Vicente, município de Várzea Verde, no Estado do Ceará. O autor obteve os resultados de granulometria, com duas amostras deformadas retiradas de uma jazida no talude de jusante da barragem com seção zonada. As amostras ensaiadas, foram dos materiais utilizado na confecção do corpo do maciço, trincheira de vedação e tapete impermeável. A Figura 16, apresenta o resultado da curva granulométrica das duas amostras ensaiadas e na Tabela 7, o resumo dos resultados da caracterização geotécnica dos materiais da amostra 1 e amostra 2.

Figura 16 – Distribuição granulométrica das amostras 1 e 2, da barragem Olho d'Água.



Fonte: Dantas Neto e Carneiro (2013).

O ensaio de granulometria, possibilita condicionar a escolha dos materiais utilizados na construção barragem, conforme a distribuição granulométrica, analisada graficamente, tanto para os espaldares, núcleo, maciço e filtro. (CRUZ, 1996; COSTA, 2012; MIRANDA; 2021).

Tabela 7 – Resumo dos ensaios de granulometria das amostras 1 e 2, da barragem Olho d’Água.

Amostra ensaiada	Amostra 1 (%)	amostra 2 (%)
Pedregulho	8	12
Areia	63	48
Silte	18	14
Argila	18	14

Fonte: Adaptado de Dantas Neto e Carneiro (2013).

Conforme a NBR 6459/2016, o ensaio limite de liquidez (LL), determina até que ponto o teor de umidade de um solo argiloso, correspondente ao estado de consistência, limite entre os estados líquido e plástico. Conforme Miranda (2021), o estudo do comportamento de solos finos torna necessária a determinação de seus limites de consistência, pois dependendo do seu teor de umidade, de forma geral, um solo pode existir em três diferentes estados: quebradiço, plástico e líquido.

O limite de plasticidade (LP) é realizado conforme os procedimentos realizados pela NBR 7180/2016, no qual será um índice utilizado para determinar o Índice de Plasticidade (IP) da amostra de solo ensaiada.

Perante a realização dos ensaios geotécnico na barragem Olho d’Água, Araújo (2013), encontrou na amostra 1 e amostra 2 dos materiais utilizados na construção do corpo do barramento, os seguintes resultados de LL, LP e IP, conforme descritos na Tabela 8. O autor não informou o resultado nulo do LP e IP da amostra 1.

Tabela 8 – Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade da amostra 1 e 2, da barragem Olho d’Água.

Amostra ensaiada	Amostra 1 (%)	amostra 2 (%)
Limite de Liquidez	29,5	27,4
Limite de Plasticidade	x	19,6
Índice de Plasticidade	x	7,8

Fonte: Adaptado de Dantas Neto e Carneiro (2013).

É comum a tentativa de correlacionar o limite de liquidez e o índice de plasticidade com outros parâmetros de comportamento dos solos, como a resistência ao cisalhamento (MIRANDA, 2021).

Segundo Costa (2012), Cruz (1996) e Miranda (2021), o ensaio do peso específico real do solo, é procedido pela NBR 6508/1984, que determina o valor da densidade real dos grãos, que passam pela peneira 4,8 mm e o peso específico em condições naturais de campo, pela NBR 7185/2016, pelo método do frasco de areia. O peso específico dos grãos ou densidade real dos grãos é um número adimensional, que é utilizado na classificação dos solos (granulometria dos solos) e o peso específico obtido através do ensaio frasco de areia, é um parâmetro utilizado no ensaio de cisalhamento direto, no cálculo de estabilidade de taludes e aferição do grau de compactação realizado na construção do barramento da barragem (COSTA, 2012; CRUZ, 1996).

García (2013), priorizou realizar um trabalho referente a “análise de comportamento de barragens construídas com núcleos argilosos compactos no ramo super úmido”, pois este tipo de solo predomina a região do estudo. O autor realizou ensaios geotécnicos, para coletar o resultado do peso específico real do solo e a densidade máxima seca do solo “in situ”, utilizando uma amostra deformada com solo silto-argiloso, coletado do campo experimental da Universidade Federal de Brasília.

A Tabela 9, apresenta o resultado da densidade dos grãos e a densidade máxima seca do solo “in situ”, após a realização dos ensaios por García (2013).

Tabela 9 – Resultados de caracterização física do solo.

Amostra ensaiada	Solo silto-argiloso
Peso específico real do grãos (g/cm ³)	2,74
Peso específico natural do solo (g/cm ³)	1,78
Teor de umidade natural do solo (%)	27

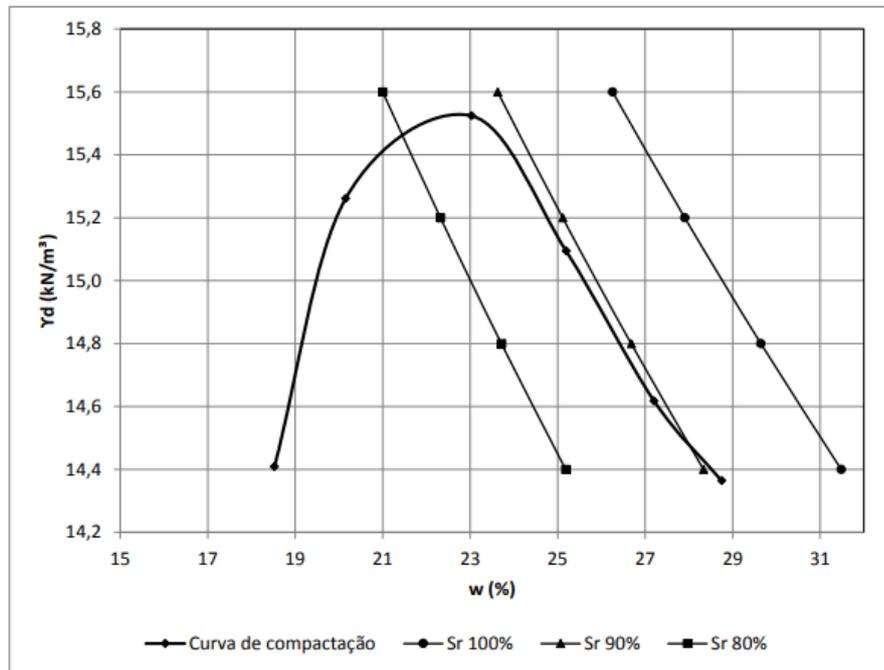
Fonte: Adaptado de García (2013).

O ensaio de compactação dos solos, é precedido pela NBR 7182/2016, que tem como principal objetivo, determinar o teor de umidade ótima, aliada ao peso específico máximo. Segundo Costa (2012), Cruz (1996) e Carvalho (2008), o ensaio, prioriza garantir com a homogeneização do material, uma melhoria nas propriedades de permeabilidade, reduzir recalques e absorção de água, decorrentes do aumento do peso específico melhorando a capacidade de resistência do maciço da barragem.

García (2013), ao realizar um trabalho referente a uma “análise de comportamento de barragens construídas com núcleos argilosos compactos no ramo super úmido”, encontrou em uma amostra de solo silto-argiloso, o seguinte resultado do teor de umidade ótima, aliada ao

peso específico máximo, conforme mostra a Figura 17. O autor teve por objetivo realizar o ensaio de compactação e obter os parâmetros de moldagem dos corpos de prova para os ensaios de adensamento, permeabilidade e triaxiais, com umidade definidas com 23%, 25% e 28% e analisar o comportamento desse material a ser utilizado na construção de barragem de terra.

Figura 17 – Curva de compactação do solo silto-argiloso do campo experimental da Universidade Federal de Brasília.



Fonte: García (2013).

Quanto ao ensaio de resistência ao cisalhamento direto, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb estabelece que um material se rompe por causa das combinações das tensões normal e de cisalhamento (Cruz, 1996). Define-se como resistência ao cisalhamento do solo a tensão cisalhante que ocorre no plano de ruptura no instante da ruptura. (CRUZ, 1996; DIAS, OLIVEIRA, 2013).

Segundo Cruz (1996), para avaliar a tensão de cisalhamento do maciço de uma barragem de terra, ao realizar-se o ensaio de cisalhamento direto, as amostras devem ser saturadas, a massa específica, deve ser de amostras compactas (grau de compactação 95%), retiradas do núcleo no maciço da barragem, no teor de umidade (ótima), obtida a campo.

Cruz (1996) e Costa (2012), definem, que a capacidade dos solos em suportar cargas, depende de sua resistência ao cisalhamento, isto é, da tensão (τ'), que é a máxima tensão que

pode atuar no solo, sem que haja ruptura, conforme a Equação 10, concluindo-se que somente as pressões efetivas mobilizam resistência ao cisalhamento, (por atrito de contato grão a grão).

$$\tau' = c' + \sigma' \cdot \operatorname{tg} \phi \quad \dots(10)$$

Onde:

τ' = tensão da resistência ao cisalhamento do material;

C' = coesão efetiva retirada da equação de 1º grau da reta logarítma do gráfico (Kpa);

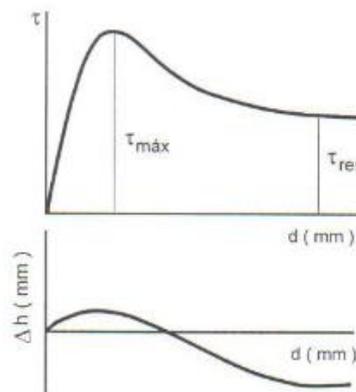
σ' = tensão normal existente no plano de cisalhamento (KPa); e

ϕ = ângulo de atrito retirado da equação de 1º grau da reta logarítma do gráfico (tangente inversa, do valor matemático, junto a variável “x” (°)).

A tensão “ τ ” pode ser representada em função do deslocamento no sentido do cisalhamento, como se mostra na Figura 18, onde se identificam a tensão de ruptura (τ_{\max} , de pico) e a tensão residual, que o corpo de prova ainda sustenta, após ultrapassada a situação de ruptura, τ_{residual} .

O deslocamento vertical durante o ensaio também é registrado, indicando se houve diminuição ou aumento de volume durante o cisalhamento.

Figura 18 - Comportamento tensão x deslocamento (horizontal) e de deslocamento vertical.

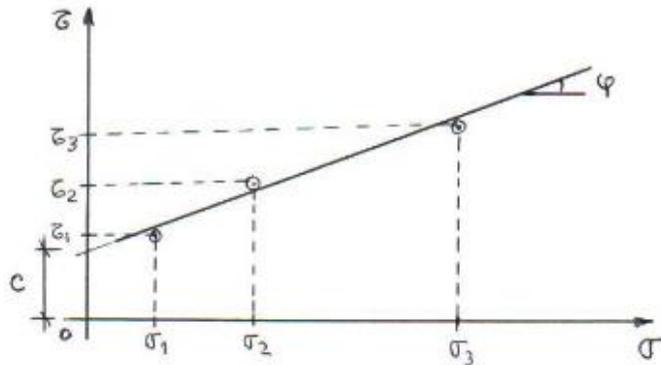


Fonte: Oliveira (2019).

Deve ser realizados ensaios com diversas tensões normais, em no mínimo três corpos de prova (OLIVEIRA, 2019). Segundo Oliveira (2019) e Cruz (1996), pode-se obter a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo, plotando-se diretamente em um gráfico cartesiano ($\sigma \times \tau$), sendo os pontos referentes às respectivas tensões σ (adotadas) e τ (medidas),

que serão posteriormente interpolados graficamente por uma reta, a fim de definir a envoltória de Mohr-Coulomb pretendida, conforme descreve a Figura 19:

Figura 19 – Interpolação dos pontos de ruptura para obtenção da envoltória de Mohr-Coulomb.



Fonte: Oliveira (2019).

Segundo Costa (2012) e Cruz (1996), após traçar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, obtém-se os dados referentes ao ângulo de atrito (Φ) e coesão (C') do solo ensaiado, que são utilizados como dados de entradas nas simulações de estabilidade de taludes de uma barragem de terra.

Souza (2019) realizou um estudo, referente a “verificação da análise da estabilidade da barragem São Bento do Una, localizada no município de São Bento, Estado do Pernambuco.

Os dados de resistência (C' e Φ), foram obtidos através Relatório do Projeto Básico, perante a realização do ensaio triaxial e após traçar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

A Tabela 19, apresenta os resultados da coesão e ângulo de atrito, juntamente com o peso específico dos materiais geotécnicos que fazem parte do Projeto Básico, utilizados na confecção do barramento da barragem zonada.

Tabela 19 – Dados utilizados no cálculo da estabilidade da barragem São Bento do Uma.

TIPO DE MATERIAL	TRIAXIAL			PESO		
	COESÃO		ϕ (°)	ESPECÍFICO (γ)		
	(kPa)	(t/m ²)		(t/m ³)	(kN/m ³)	
Maciço	Proteção do núcleo	13	1,33	32	1,87	18,34
	Núcleo / Cut-off	13	1,33	32	1,87	18,34
	Filtro vertical / Tapete horizontal	0	0	30	1,84	18
	Transição de brita	0	0	30	1,84	18
	Enrocamento / Material de 2ª categoria	0	0	41,4	2,08	20,42
	Rip-Rap / Enrocamento	0	0	45	2,04	21
	Fundação	Rocha sã	Impenetrável (BedRock)			

Fonte: Projeto Básico da Barragem São Bento do Una (2014).

Com a alternativa para medir a resistência dos materiais granulares com partículas de grandes dimensões, Cruz e Mailolino (1983) realizaram ensaios de cisalhamento direto em caixa de 100 x 100 x 40 cm, para ensaiar materiais com partículas de até 3'' (7,50 cm) e, triaxial e CD, resultados publicados no livro 100 Barragens brasileiras.

No Quadro 3, são resumidos os resultados obtidos da barragem Capivara, quanto a classificação do material, tipo de ensaio e os parâmetros de resistência médios obtidos através dos ensaios realizados em fragmentos de enrocamento “basalto”.

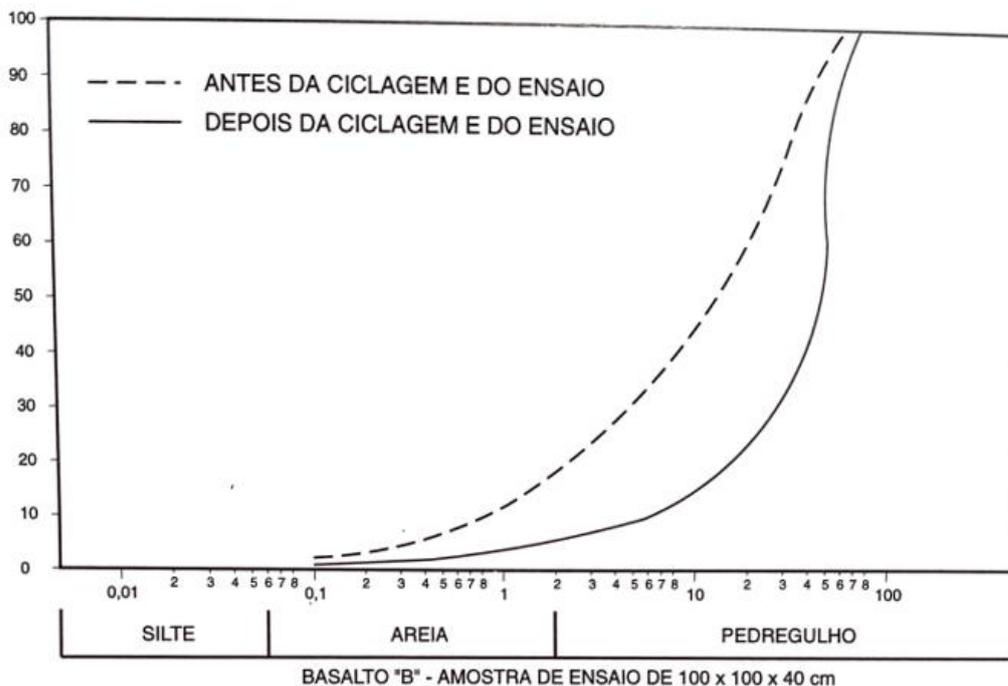
Quadro 3 – Resultados dos ensaios procedidos em fragmentos de enrocamento de basalto.

Barragem	Classificação do Material	Tipo de Ensaio	Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento (média)	
			C (kg/cm ²)	ϕ (°)
CAPIVARA	Basalto são	CD 100 x 100 x 40 cm	0	49
	Basalto vesicular e/ou amigdaloidal	CD 100 x 100 x 40 cm	0	44
		CD 100 x 100 x 40 cm	0	39,5
	Basalto compacto micro amigdaloidal	CD 100 x 100 x 40 cm	0	44,5
		CD 100 x 100 x 40 cm	0	41
	Basalto vesicular e/ou amigdaloidal (B)	Triaxial e CD	0,5	38
	Triaxial e CD	0,3	37	

Fonte: Adaptado de Cruz (1996).

Conforme Cruz (1996), a Barragem de Capivara para o basalto B, foram os materiais sujeitos à desagregação, onde a Figura 20, mostra a variação granulométrica das amostra após a ciclagem no ensaio de resistência, ocorrendo maior quebra de partículas para as amostras que continham fragmentos de até 3”.

Figura 20 – Curvas granulométricas de materiais rochosos antes e após ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Cruz (1996).

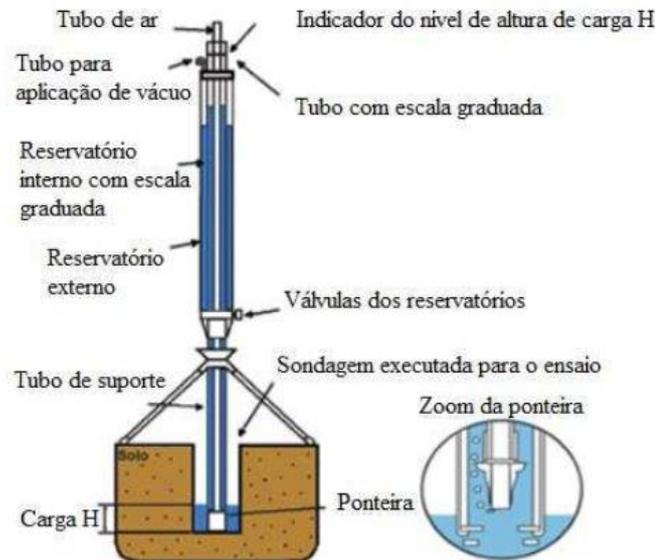
Os ensaios realizados a campo, para a determinação do coeficiente de permeabilidade, refletem melhor os resultados as propriedades (in situ) do que os métodos de laboratório, resultando em valores mais precisos do coeficiente de permeabilidade (FERNANDES, 2017).

Segundo Fernandes (2017) e Lisboa (2006), pode-se utilizar o Permeâmetro de Guelph para medir o coeficiente de permeabilidade saturado em campo (carga constante), acima do nível d'água, em solos homogêneos, rígidos e isotrópicos, sendo eficiente na medição de permeabilidade na ordem de 10^{-2} a 10^{-6} cm/s. Valores abaixo ou acima destes níveis, não se consegue realizar o ensaio ou tem-se erros nos dados obtidos.

O equipamento é composto por um tripé, que tem a finalidade de adaptar o equipamento em terrenos irregulares, um tubo acrílico com régua graduada, onde a água é introduzida, e uma

garrafa de Mariotte, que tem a função de controlar a carga constante de água no tubo. Um desenho representativo, é mostrado na Figura 21:

Figura 21- Esquema de equipamentos utilizados para a realização do ensaio.



Fonte: Fernandes (2017) apud BIELSCHOWSKY (2005).

Segundo Fernandes (2017) para se obter o coeficiente de permeabilidade, o ensaio é executado com dois carregamentos de pressão diferente, e com cada carga se obtém suas respectivas vazões, sendo o coeficiente de permeabilidade obtido pela Equação 11:

$$K = G_2 \cdot Q_2 - G_1 \cdot Q_1 \quad \dots(11)$$

Sendo as vazões Q_1 e Q_2 encontrados pela Equação 12 e a Equação 13:

$$Q_1 = A_{\text{trans}} \cdot R_1 \quad \dots(12)$$

$$Q_2 = A_{\text{trans}} \cdot R_2 \quad \dots(13)$$

Onde:

A_{trans} = área do furo; e

R_1 e R_2 = velocidade em que o fluxo atingiu um regime permanente.

Os parâmetros G_1 e G_2 são encontrados pela Equação 14 e a Equação 15, sendo:

$$G_1 = \frac{H_2 \cdot C_1}{\pi [2 \cdot H_1 \cdot H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)]} \quad \dots(14)$$

$$G_2 = \frac{H_2 \cdot C_1}{\pi [2 \cdot H_1 \cdot H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1)]} \quad \dots(15)$$

Onde:

a = raio do buraco;

C_1 e C_2 = fator forma retirado da Figura (28a) ($C \times H/a$); e

H_1 e H_2 = carga aplicada em cada estágio.

A obtenção do fluxo mátrico (Φ_m) através dos dados do ensaio pode ser feito através da Equação 16:

$$\Phi_m = J_1 \cdot Q_1 - J_2 \cdot Q_2 \quad \dots(16)$$

Os parâmetros J_1 e J_2 podem ser encontrados pelas Equação 17 e Equação 18:

$$J_1 = \frac{(2 \cdot H_2^2 + a^2 \cdot C_2) C_1}{2\pi [(2 \cdot H_1 \cdot H_2 (H_2 - H_1) + a^2 (H_1 \cdot C_2 - H_2 \cdot C_1))]} \quad \dots(17)$$

$$J_2 = \frac{J_1 (2 \cdot H_1^2 + a^2 \cdot C_1) C_2}{[(2 \cdot H_2^2 + a^2 \cdot C_2) C_1]} \quad \dots(18)$$

Onde:

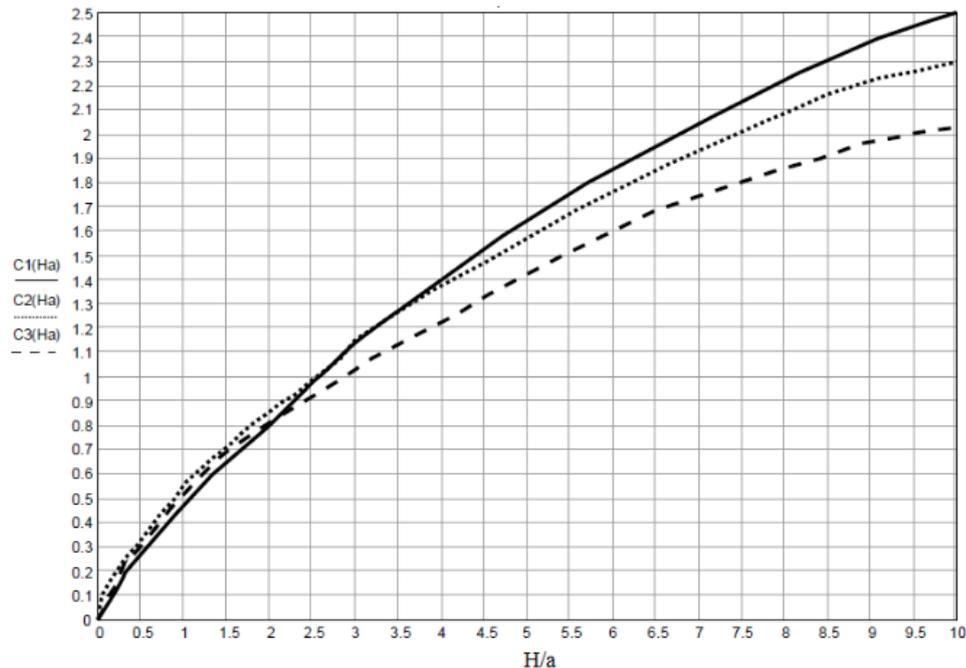
a = raio do buraco;

C_1 e C_2 = fator forma retirado da Figura (28) ($C \times H/a$); e

H_1 e H_2 = carga aplicada em cada estágio.

Segundo Fernandes (2017) e Lisboa (2006), a determinação de qual curva utilizar na Figura 22 para a obtenção do fator forma (C) depende da estimativa do coeficiente α^* , que varia com o tamanho dos poros. Para um $\alpha^* = 0,01 \text{ cm}^{-1}$, utilizar a curva C_3 , para um $\alpha^* = 0,04 \text{ cm}^{-1}$, utilizar a curva C_2 e para um caso em que o $\alpha^* \geq 0,12 \text{ cm}^{-1}$, utilizar a curva C_1 para a obtenção do fator forma (manual Guelph). Para auxiliar nesta estimativa de (α^*) pode ser utilizada a Tabela 19.

Figura 22 - Determinação do fator (C) (SOILMOISTUR E EQUIPMENT CORP., 2008).



Fonte: Fernandes (2017).

Tabela 19: Relação de solos com o parâmetro α^* (adaptado de ELRICK et al., 1989).

Tipo de Solo (Estrutura e textura)	α^* (cm ⁻¹)
Solos compactado, argilosos ou siltosos, como materiais de aterros sanitários e revestimentos, lacustres ou sedimentos marinhos, etc	0,01
Solos que são de textura fina (argilosos ou siltosos) e não estruturados; também pode incluir alguns areias finas.	0,04
Solos mais estruturados de argilas; também inclui meio desestruturado e areias finas. Materiais com alta a moderada quantidade de macroporos e fissuras.	0,12
Areias grossas ; também pode incluir alguns solos altamente estruturadas com rachaduras grandes e com macroporos e etc.	0,36

Fonte: Fernandes (2017).

Os valores de C_1 , C_2 e C_3 podem ser encontrados de forma direta através das Equações 19, Equação 20 e Equação 21:

$$C_1 = \left[\frac{H/a}{2,074 + 0,093 \left(\frac{H}{a} \right)} \right]^{0,754} \quad \dots(19)$$

$$C_2 = \left[\frac{H/a}{1,192 + 0,091 \left(\frac{H}{a} \right)} \right]^{0,683} \quad \dots(20)$$

$$C_3 = \left[\frac{H/a}{2,081 + 0,121 \left(\frac{H}{a} \right)} \right]^{0,672} \quad \dots(21)$$

Onde:

a = Raio do buraco; e

H = carga aplicada em cada estágio.

Quanto maior a relação H/a melhores serão os resultados, pois assim potencializa o fluxo de pressão tridimensional, que atinge fluxo constante mais rápido e abrange uma região finita, e minimiza o fluxo unidimensional gravitacional. Quanto maior o tempo de ensaio e o volume utilizado, maior será a importância do fluxo gravitacional (FERNANDES, 2017).

A Equação 22 considera efeitos não saturados, como a capilaridade e pressão inicial no solo. Segundo Fernandes (2017) *apud* Elrick et al. (1989) propôs um ensaio utilizando apenas uma carga de pressão, tendo como base que a utilização de duas cargas de pressão em meios heterogêneos e com grandes vazios levaram a resultados negativos. A Equação 22 representa a formulação proposta por Fernandes (2017) *apud* (REYNOLDS & ELRICK, 1989), sendo:

$$K = \frac{C \cdot Q_s}{\left[2 \cdot \mu \cdot H^2 + C \cdot \mu \cdot a + \left(\frac{2 \cdot \mu \cdot H}{a^*} \right) \right]} \quad \dots(22)$$

Onde:

Q = Vazão de água no solo (cm^3/s);

a = Raio do buraco;

C = Fator forma retirado da Figura (28a) ($C \times H/a$);

H = carga aplicada;

$\alpha^* = K / \phi_m$ = Parâmetro de acordo com o tamanho dos poros (valor encontrado na Tabela 10);

$2.\pi.H/\alpha^*$ = Fator relacionado com a capilaridade, sendo que um valor menor de H reflete em uma menor influência de α^* .

Os parâmetros físicos de permeabilidade dos materiais do maciço da barragem, podem ser estimados (Quadro 4), para estudos de rede de fluxo e programas de análise de percolação. A estimativa, correlaciona a granulometria (D_{10} é o diâmetro que na curva granulométrica, corresponde à porcentagem que passa igual a 10%) e o valor de permeabilidade. Para estimativa inicial da permeabilidade de pedregulhos e britas tem-se $k > 10\text{cm/s}$ e para areias grossas tem-se $k = 1$ a 10cm/s . (SOUZA, 2013).

Quadro 4 – Estimativa inicial de permeabilidade.

$D_{10}(\text{mm})$	$k(\text{cm/s})$
0,1	2×10^{-2}
0,2	6×10^{-2}
0,3	1×10^{-1}
0,5	2×10^{-1}
0,7	3×10^{-1}
1,0	5×10^{-1}
2,0	1

Fonte: Souza (2013).

2.13 Levantamento patológico em barragens de terra

Conforme Costa (2012), Cruz (1996) e Carvalho (2008), como toda obra de engenharia, as barragens também sofrem com a ação do tempo com a ocorrência de processos de erosão, assoreamento resultantes do intemperismo, contribuindo para o desgaste da construção. Na fase de projeto deve-se prever o surgimento de problemas patológicos que possam comprometer a segurança da barragem, através dos métodos avaliativos de construção, características dos materiais e estabilidade de taludes.

Conforme dados levantados pelo GOV-RS (2019), com um GT (grupo de trabalho) para avaliar a segurança das barragens de terra de pequeno a grande porte em 19 municípios, incluindo a região de Alegrete, 837 barragens foram classificadas com Dano Potencial Associado Alto.

Conforme Salinas (2017), durante um levantamento patológico realizado em 8 barramento no município de Alegrete, ambos apresentaram anomalias perante o estudo realizado. Conforme vistoria nos locais e as informações coletadas em campo, a patologia que mais se destacou foi a fuga d'água, ou seja, uma infiltração excessiva pelo maciço dos barramentos ou pela fundação, seguida por erosão nas ombreiras, árvores e arbustos. A fuga d'água, representou 80%, erosão nas ombreiras 10%, árvores e arbustos 10%, onde os resultados foram computados com a Ficha para Inspeção Regular de Barragem, proposta pela Agência Nacional das Águas, publicado em 2002, a mesma utilizada pelo GOV-RS (2019).

Salinas (2017), avaliou outras patologias, sendo que durante a avaliação das classes do PR (potencial de risco), apenas um barramento apresentou Dano Potencial Associado Alto e os demais com Dano Potencial Associado Normal. Apesar da maioria dos barramentos apresentarem PR Normal, as anomalias constatadas com a Ficha para Inspeção Regular de Barragens, não descartou ações corretivas dos Danos Patológicos encontrados em situação de alerta e, futuras vistorias no decorrer dos períodos futuros.

No preenchimento da ficha de inspeção de barragem de terra é feito um X nas colunas correspondentes à situação e à magnitude da anomalia que possa estar ocorrendo em relação ao item examinado e registrado na coluna NP um número de 0 a 3 correspondente ao nível de perigo que esta anomalia representa para a segurança da barragem. Para o preenchimento das fichas de inspeção é adotado um sistema de legendas para cada um dos itens de classificação, cujos significados são descritos a seguir:

SITUAÇÃO:

A primeira parte da tabela se refere à situação da barragem em relação ao item que esteja sendo examinado, ou seja:

NA – Este item Não é Aplicável: O item examinado não é pertinente à barragem que esteja sendo inspecionada.

NE – Anomalia Não Existente: Quando não existe nenhuma anomalia em relação ao item que esteja sendo examinado, ou seja, sob o aspecto em questão, a barragem não apresenta falha ou defeito e não foge às normas.

PV – Anomalia constatada pela Primeira Vez: Quando da visita à barragem, aquela

anomalia for constatada pela primeira vez, não havendo indicação de sua ocorrência nas inspeções anteriores.

DS – Anomalia Desapareceu: Quando em uma inspeção, uma determinada anomalia verificada na inspeção anterior, não mais esteja ocorrendo.

DI – Anomalia Diminuiu: Quando em uma inspeção, uma determinada anomalia apresente-se com menor intensidade ou dimensão, em relação ao constatado na inspeção anterior, conforme pode ser verificado pela inspeção ou informado pela pessoa responsável pela barragem.

PC – Anomalia Permaneceu Constante: Quando em uma inspeção, uma determinada anomalia apresente-se com igual intensidade ou a mesma dimensão, em relação ao constatado na inspeção anterior, conforme pode ser verificado pela inspeção ou informado pela pessoa responsável pela barragem.

AU – Anomalia Aumentou: Quando em uma inspeção, uma determinada anomalia apresente-se com maior intensidade, ou dimensão, em relação ao constatado na inspeção anterior, capaz de ser percebida pela inspeção ou informada pela pessoa responsável pela barragem.

NI – Este item Não foi Inspeccionado: Quando um determinado aspecto da barragem deveria ser examinado e por motivos alheios à pessoa que esteja inspecionando a barragem, a inspeção não foi realizada. Neste caso, na parte reservada para comentários, deverá haver uma justificativa para a não realização da inspeção.

MAGNITUDE:

A definição da magnitude da anomalia procura tornar menos subjetiva a avaliação da dimensão do problema ou da falha encontrada:

I – Insignificante: Anomalia que pode simplesmente ser mantida sob observação pela Administração Local.

P – Pequena: Quando a anomalia pode ser resolvida pela própria Administração Local.

M – Média: Anomalia que só pode ser resolvida pela Administração Local com apoio da Administração Regional.

G – Grande: Anomalia que só pode ser resolvida pela Administração Regional com apoio da Administração Central.

NÍVEL DE PERIGO:

Com esta informação procura-se quantificar o nível de perigo causado pela anomalia e indicar a presteza com que esta anomalia deva ser corrigida.

0 – Nenhum: Não compromete a segurança da barragem, mas pode ser entendida como descaso e má conservação.

1 – Atenção: Não compromete a segurança da barragem a curto prazo, mas deve ser controlada e monitorada ao longo do tempo.

2 – Alerta: Risco a segurança da barragem, devendo ser tomadas providências para a eliminação do problema.

3 – Emergência: Risco de ruptura iminente, situação fora de controle.

2.13.1 Avaliação do potencial de risco

Conforme o Ministério da Integração Nacional (2002), o objetivo de avaliar o Potencial de Risco é obter a classificação da barragem, quanto à segurança estrutural, importância estratégica e riscos a população a jusante.

Compõe a matriz um primeiro conjunto de parâmetros ou características técnicas do projeto que, pela sua magnitude, permitem retratar o grau de Periculosidade (P) que está apresentada na Tabela 20.

Para o cálculo da periculosidade (P) dos barramentos, deve-se utilizar a equação 23 demonstrada a seguir:

$$P = a + b + c + d + e \quad \dots(23)$$

Com este somatório podemos identificar seu nível, sendo este elevado para (P) maior que 30, significativo para (P) entre 20 e 30 e baixo a moderado para (P) entre 10 e 20.

Tabela 20 – Níveis de periculosidade.

Dimensão da barragem (a)	Volume Total do Reservatório (b)	Tipo de Barragem (c)	Tipo de Fundação (d)	Vazão de Projeto (e)
Altura ≤ a 10 m e Comprimento ≤ a 200 m 1	Pequeno < 20 hm ³ 3	Concreto 4	Rocha 1	Decamilenar 1
10 m Altura < 20 m e Comprimento ≤ a 200 m 3 20 m Altura ≤ 50 m ou Comprimento de 200 a 3000 m	Médio até 200 hm ³ 5 Regular 200 a 800 hm ³	Alvenaria de pedra/ concreto rolado 6 Terra enrocamento	Rocha alterada Saprolito 4 Solo Residual/aluvião até 4 m	Milenar 2 500 anos
6 Altura > 50 m e Comprimento > 500 m 10	7 Muito grande > 800 hm ³ 10	8 Terra 10	7 Aluvião arenoso espesso/Solo orgânico 10	4 Inferior a 500 anos ou desconhecida 10

Fonte: Adaptado de Ministério da Integração Nacional (2002).

Um segundo conjunto, envolvendo aspectos relacionados com o estado atual da barragem, com a sua história e com a operacionalidade e/ou facilidade de manutenção de suas estruturas hidráulicas, permite avaliar o grau de Vulnerabilidade (V) atual, que está demonstrado na Tabela 21 deste trabalho.

Para o cálculo da vulnerabilidade (V) dos barramentos, deve-se realizar a equação 24 demonstrada a seguir:

$$V = f + g + h + i + j + k + l \quad \dots(24)$$

Com este somatório podemos identificar seu nível, sendo este elevado para (V) maior que 35, moderada a elevada para (V) entre 20 e 35, baixo a moderado para (V) entre 5 e 20 e muito baixa para (V) menor que 5.

Tabela 21 – Níveis de vulnerabilidade.

Tempo de operação (f)	Existência de projeto (As Built) (g)	Confiabilidade das Estruturas Vertedoras (h)	Tomada de água (i)	Percolação (j)	Deformações afundamentos e assentamentos (k)	Deterioração do Talude/Paramento (l)
> 30 anos	Existem as built Projetos e avaliação do desempenho	Muito satisfatória	Satisfatória controle a montante	Totalmente controlada pelo sistema de drenagem	Inexistente	Inexistente
0 de 10 a 30 anos	1 Existem projetos e as built	2 Satisfatória	1 Satisfatória controle a jusante	1 Sinais de umedecimento nas áreas de jusante, talude ou ombreiras	0 Pequenos abatimentos da crista	1 Falhas no rip-rap e na proteção de jusante
1 de 5 a 10 anos	3 Só projeto básico	3 Suficiente	2 Aceitável	4 Zonas úmidas em taludes de jusante, ombreiras, área alagada a jusante devido ao fluxo	2 Ondulações pronunciadas. fissuras	3 Falha nas proteções, drenagens insuficientes e sulcos nos taludes
2 < 5 anos	5 Não existe projeto	6 Não satisfatória	3 Deficiente	6 Surgimento de água nos taludes, ombreiras e área a jusante	6 Depressão na crista, afundamentos nos taludes, ou na fundação/trinca	7 Depressão no rip-rap, escorregamento, sulcos profundos de erosão, vegetação
3	7	10	5	10	10	10

Fonte: Adaptado de Ministério da Integração Nacional (2002).

O terceiro conjunto, Importância (I), demonstrado pela Tabela 22, reúne parâmetros que, por seu vulto ou magnitude, conferem o valor estratégico associável à barragem no caso de eventual ruptura. Para o cálculo da importância (I) dos barramentos, deve-se aplicar a equação 25 a seguir:

$$I = \frac{m+n+o}{3} \quad \dots(25)$$

Tabela 22 – Níveis de importância.

Volume útil hm³	População a jusante	Custo da barragem
(m)	(n)	(0)
Grande > 800	Grande	Elevado
2	2,5	1,5
Médio 200 a 800	Média	Médio
1,5	2	1,2
Baixo < 200	Pequena	Pequeno
1	1	1

Fonte: Adaptado de Ministério da Integração Nacional (2002).

Finalmente, com os dados obtidos anteriormente é possível calcular o Potencial de Riscos (PR) que sugere a classificação da barragem segundo o nível de risco à sua segurança demonstrado no Quadro 5. Essa classificação está associada a índices do Potencial de Risco (PR) e de Vulnerabilidade (V).

Quadro 5 – Classificação do potencial de risco.

Classe	Potencial de risco (PR)
A	> 65 (ou V=10) - Alto
B	40 a 65 - Médio
C	25 a 39 - Normal
D	14 a 24 - Baixo
E	< 15 - Muito Baixo

Fonte: Adaptado de Ministério da Integração Nacional (2002).

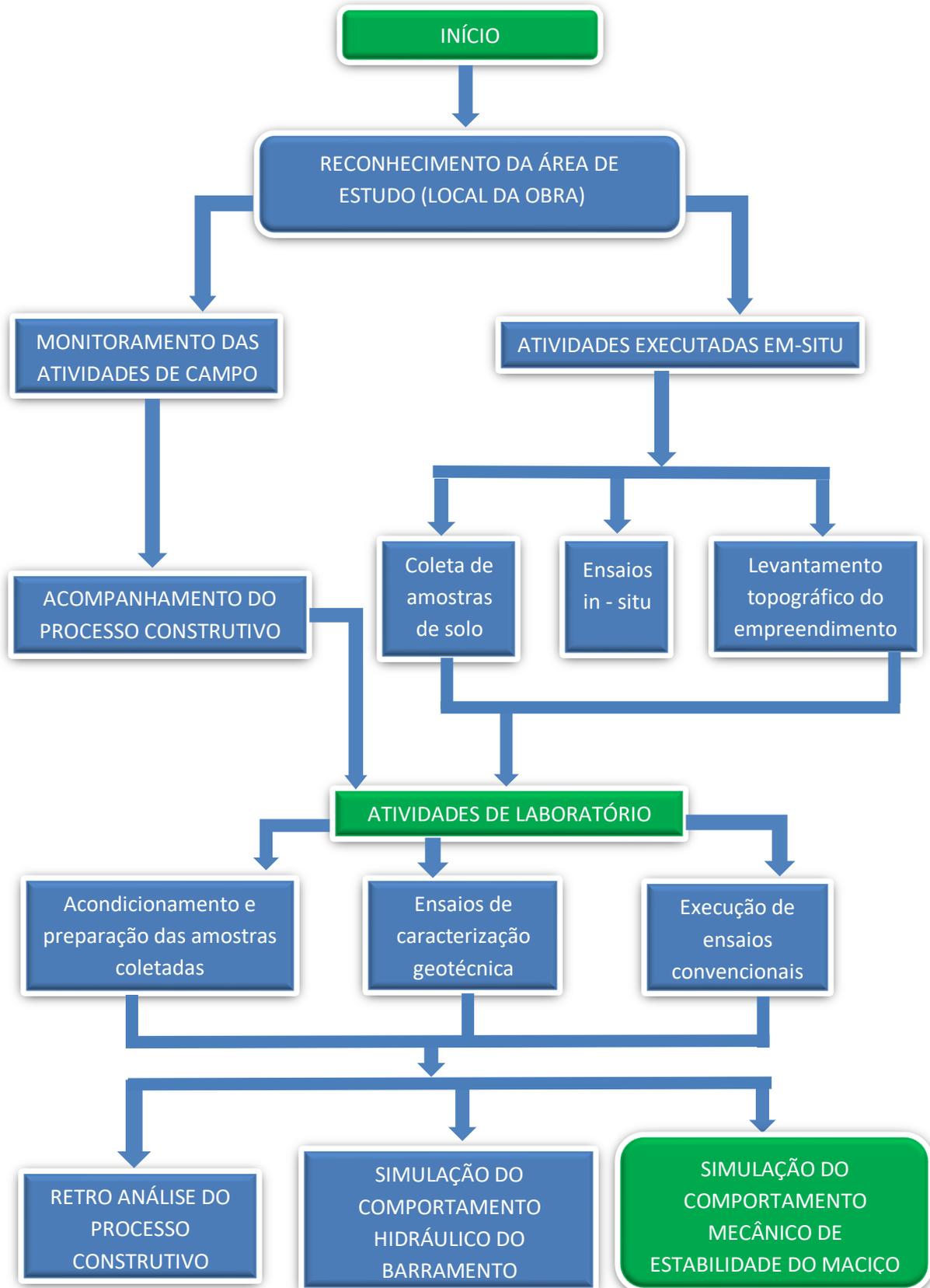
Para a o cálculo do potencial de risco (PR) é necessário utilizar a equação 26.

$$PR = \frac{(P+V)}{2 \times I} \quad \dots(26)$$

3 METODOLOGIA PROPOSTA

A seguir o fluxograma da Figura 22, descreve os procedimentos realizados durante a execução da barragem, durante este estudo de caso, entre a fase início e fim, na qual foi finalizado este trabalho, após a simulação do comportamento mecânico de estabilidade dos taludes do barramento.

Figura 22 – Fluxograma das atividades realizadas durante o estudo de caso.



Fonte: Elaboração própria.

O fluxograma representado pela Figura 22, apresenta a descrição metodológica ao qual se refere o trabalho proposto, a partir do local da obra, envolvendo o monitoramento das atividades de campo e acompanhamento do processo construtivo. Foram realizadas atividades *in situ*, procedidas através do controle da compactação na região do núcleo e a infiltração da barragem através do ensaio de permeabilidade das regiões do núcleo e espaldares do maciço. Após as atividades executadas *in-situ*, foram realizados ensaios de laboratório, para determinar a caracterização geotécnicas dos materiais, nas quais os resultados foram utilizados para avaliar a segurança da barragem. A segurança do empreendimento foi calculada pelo Seep/W e Slop/w do pacote de dados do *software* GEO-SLOOP, realizando uma análise para avaliar a estabilidade do talude, quanto ao comportamento hidráulico e geotécnico mecânico.

3.1 Área de estudo e características geométricas da barragem

A área de estudo onde edificou-se a barragem está localizada próxima ao município de Alegrete - RS, situada no 5º subdistrito do Inhanduí. A Figura 23, mostra a região onde a barragem está inserida.

Figura 23 – Localização da região de estudo.



Fonte: Geografia do Rio Grande do Sul – InfoEscola (2022).

Conforme acompanhamento já realizado do processo construtivo, a barragem construída é do tipo zonada, constituída de núcleo central com solo de textura fina e espaldares de solo granular grosso com altura máxima de barramento de 9,50 m. O local onde a barragem foi construída é mostrada em vista panorâmica na Figura 24, onde observa-se a seção do barramento em planta, vista de cima e o eixo do barramento. Conforme relato do proprietário, o reservatório destina-se a irrigação de arroz, com o objetivo de atender a demanda hídrica em períodos de estiagem, ficando na condição de reserva, para abranger uma área de irrigação aproximada de 47 hectares.

Figura 24 – Planta baixa da seção do barramento.



Fonte: Google Earth Pro, adaptado pelo autor (2022).

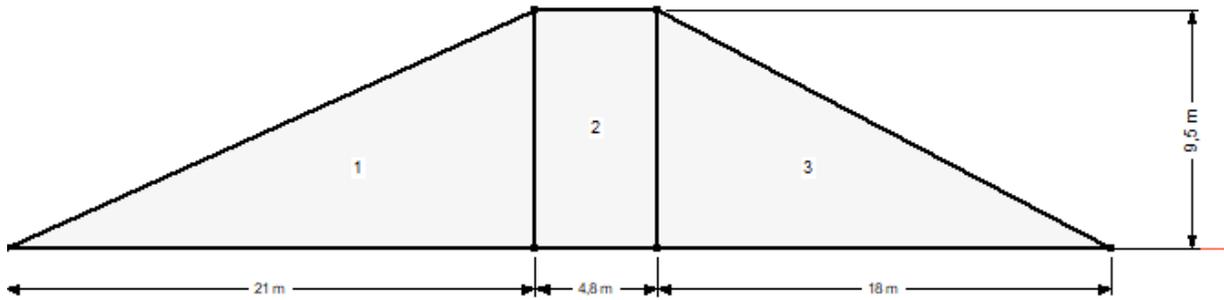
Como não foi possível ter acesso ao projeto básico do barramento, perante levantamento topográfico realizado com Estação Total, obtiveram-se as principais características geométricas da barragem as quais são mostradas no Quadro 6 e na Figura 25.

Quadro 6 – Dados relativos à barragem

Cota do nível máx. d'água (montante)	109.700 m - acima do nível do mar
Cota da crista da barragem	110.500 m- acima do nível do mar
Cota mínima na base do maciço	101 m – acima do nível do mar
Comprimento do eixo da barragem	327 m
Altura máxima da barragem	9,50 m

Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 – Aterro com talude de montante e jusante.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 25, mostra a região “1”, com inclinação média do talude de montante 1:2,21 (V:H), a região “2”, com largura da crista 4,80 m e a região “3”, obtendo-se inclinação média do talude de jusante 1:1,89 (V:H). A altura máxima do barramento é de 9,50 m, correspondendo a largura da base com 43,8 m. Segundo informação verbal do proprietário da barragem, o barramento foi construído com um volume de solo utilizado de 25.000 m³.

3.2 Equipamentos utilizados na construção da barragem

A construção do maciço da barragem, foi realizada por uma equipe de trabalho na qual representou uma empresa de prestação de serviço terceirizada, formada por cinco conjuntos *Scraper Madal-Trator*, com capacidade para 4 m³ de material e uma escavadeira *Hyundai R220LC-9*, com capacidade de caçamba de escavação de 1,20 m³. Os tratores para compor o conjunto *Scraper Madal* foram da série CBT 2600 e 2105, motor Mercedes, com potência 130 CV, acoplado com sistema hidráulico para vascular em movimento.

3.3 Processo construtivo

Durante o acompanhamento da construção da barragem, não foi possível ter acesso ao projeto básico do empreendimento, apenas informações fornecidas pelo proprietário. Devido à falta do projeto básico, este estudo não obteve informações referentes a geometria da seção do barramento, localização e distribuição dos materiais retirados das jazidas, inclinações dos taludes e distribuição dos materiais utilizados no maciço da barragem.

O principal objetivo do monitoramento do processo construtivo do maciço da barragem foi avaliar a disposição das camadas de material (processo de compactação e espessura das camadas), alteração dos materiais utilizados na construção do barramento (espaldares e núcleo). As visitas foram realizadas semanalmente, a partir da data início da obra 04/09/2021, até a data de término da construção da barragem (03/10/2021). Durante as visitas realizadas no local do

empreendimento, observou-se que a disposição das camadas não seguia uma espessura uniforme, variando entre 30-40 cm, nas quais a compactação foi desuniforme durante a disposição dos materiais de solo. Os rodados com pneus dos conjuntos *Scraper Madal-trator*, não realizavam aleatoriamente as passagens dos conjuntos rodados-pneus até completar a compactação na largura total da camada disposta, sendo distribuídas sucessivas camadas adotando-se as mesmas manobras de compactação.

Na área das jazidas, não se observou a retirada e descarte dos materiais impróprios para a construção do maciço da barragem, ou seja, os materiais orgânicos foram utilizados na construção do núcleo. A não retirada destes materiais indesejáveis, quando em excesso, pode interferir no adensamento dos materiais dispostos entre as camadas, reduzindo o grau de compactação do solo. A Figura 26, mostra algumas imagens referentes ao processo construtivo da barragem.

Figura 26 – Material escavado na fundação (a), disposição das camadas no maciço (b) e observações dos materiais utilizados na construção do maciço da barragem (c).



Fonte: Elaboração própria.

Segundo relatos do proprietário, a Figura 26(a), mostra o material escavado na fundação do terreno natural (trincheira de vedação) até encontrar o material rochoso com 2 m de profundidade, 2 m de largura e 100 m de comprimento. A escavação foi realizada na base do maciço servindo como base de sustentação para o suporte do núcleo, sendo retirado o material permeável (pedregulhos) e solos orgânicos, dos quais foram substituídos por material impermeável (solos finos). A Figura 26(b) representa a disposição dos materiais em camadas na região do núcleo e a compactação realizada pelos pneus dos rodados do conjunto *Scraper Madal-Trator* e a Figura 26(c), a retira do material das jazidas localizadas na área de alague da barragem.

A Figura 27, apresenta a projeção em planta baixa do barramento alocada no vale, representada com o comprimento do eixo da barragem pela linha vermelha, juntamente com a área das jazidas onde foi retirado o material para a construção do barramento.

Figura 27 – Locais utilizados como jazidas para retirada dos materiais.



Fonte: Google Earth Pro, adaptado pelo autor, 2022.

A coleta dos materiais utilizados na construção do barramento foi retirada em pontos aleatórios, da área de inundação da barragem (Figura 27), sem ter obedecido um estudo preliminar ou projeto base. A Figura 34, na qual representa o local das jazidas, mostra a distância percorrida durante o transporte dos materiais entre 0-500 m, ocupando uma área aproximada de 35.000 m³.

Para construir o barramento, construiu-se previamente um canal de desvio do talvegue principal (vale), considerando o desnível alto das ombreiras, o empreiteiro responsável prosseguiu a escavação cortando o eixo da barragem próximo ao pé de uma das encostas do vale. Com o desvio escavado, construiu-se o barramento da barragem de forma parcial não sendo dispostos os materiais ou solo ao longo de todo o comprimento do eixo principal (327 m), permitindo drenar a água da área de inundação das chuvas e das nascentes, conforme descreve a Figura 28.

Figura 28 – Dreno do talvegue principal e área de inundação.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 28, mostra que a abertura do dreno no talvegue principal, serviu para desviar o fluxo de água das vertentes naturais e drenar a água proveniente das chuvas da área de inundação do reservatório. Caso o dreno não fosse construído, a construção do barramento seria interrompida por encharcamento das camadas iniciais de material de solo dispostas na fase inicial de construção, devido a obstrução do leito principal do talvegue.

Após atingir a cota 5 m de altura do barramento, procedeu-se com a disposição dos materiais ou solo, fechando por completo o canal escavado, dando-se sequência na construção do maciço a partir da base da superfície do terreno natural até o término da obra. A Figura 29 mostra o dreno fechado, dando-se sequência na construção do barramento:

Figura 29 – Fechamento do dreno principal.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 29, mostra o dreno fechado, motivo pelo qual o reservatório começou acumular água na área de inundação, o que não interrompeu o seguimento da obra, devido dias decorridos até o termino da construção do barramento se manterem sem chuvas sucessivas.

Segundo informação verbal do empreiteiro, as inclinações no talude de montante do barramento, corresponderia 1:2,5 (V:H) e talude de jusante 1:2 (V:H). Conforme vistorias de campo, foi possível verificar que a barragem construída é constituída de seção zonada de terra, constituída de núcleo central com solo fino e material pedregulhoso utilizado nos espaldares de montante e jusante. A Figura 30, descreve os materiais utilizados nos espaldares e na região do núcleo.

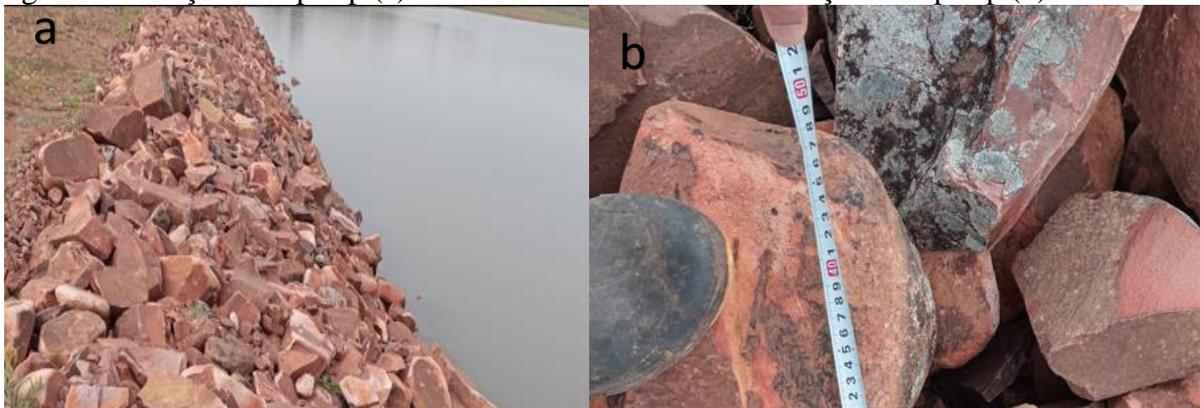
Figura 30 – Materiais de pedregulhos utilizados nos espaldares (a) e materiais com pedregulhos e solos finos utilizados no núcleo (b).



Fonte: Elaboração própria.

As dimensões médias dos materiais (matacões) utilizados na construção do rip-rap, foram de 30 x 20 x 40 cm, compreendendo (largura-espessura-comprimento), com dimensões variadas ao longo de sua extensão no lado de montante do barramento com altura média de 1 m. A Figura 31, descreve a seção do rip-rap e os materiais com medidas desuniformes.

Figura 31 – Seção do rip-rap (a) e materiais utilizados na confecção do rip-rap (b).



Fonte: Elaboração própria.

A seção que representa o canal de fuga, Figura 32, possui uma largura aproximada de 8 m, tendo sua seção inicial no maciço da barragem, sem obedecer a um distanciamento mínimo, com altura aproximada de 1,60 m. Devido ao canal de fuga não estar distanciado do barramento, observou-se o surgimento de carreamento de material no pé do maciço da barragem.

Figura 32 – Seção do vertedouro.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 33, expõe o barramento finalizado durante uma vistoria realizada no local da barragem.

Figura 33 – Barramento da barragem.



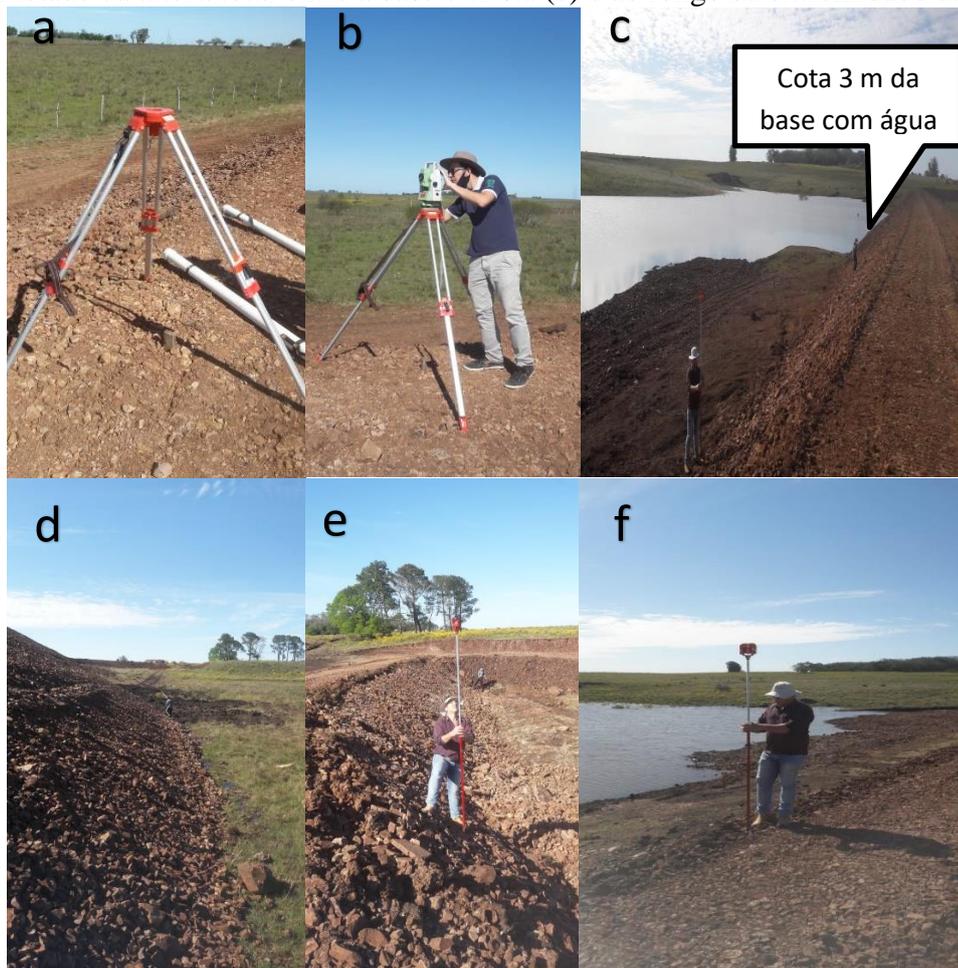
Fonte: Elaboração própria.

3.4 Levantamento topográfico do barramento

Após o término da construção do maciço da barragem, foi realizado o levantamento topográfico por meio da Estação Total, modelo Leica TS02 Power 7". Por meio da Estação Total, obteve-se as cotas altimétricas (Z) e as coordenadas planas UTM, E (leste) e N (norte), para confeccionar as curvas de níveis e, após realizar o cálculo do volume de material utilizado na construção do maciço. Após o levantamento topográfico, projetou-se o barramento da

barragem, com o intuito de obter-se a geometria das seções transversais e conferir as inclinações de montante e jusante, através do *Software Autocad Civil 3D*. Para a instalação da Estação total, foi priorizado um local com boas condições para o operador (Técnico da UNIPAMPA - Campus Alegrete), para realizar a leitura altimétrica na régua do prisma. Os intervalos das coletas dos pontos realizados foram pré-estabelecidos com distâncias 10 em 10 m para maior obtenção de pontos e precisão ao realizar o ajuste da malha entre os pontos e confecção das curvas de níveis. O caminhamento da coleta de pontos, realizou-se ao longo da base do barramento, ao longo da metade do talude e sobre a extremidade da crista em todo o seu comprimento, tanto no lado da jusante, como de montante, conforme descreve a Figura 34. Em decorrência do levantamento topográfico, em vista 3D, na Figura 35, mostra-se a projeção do barramento.

Figura 34 – Instalação do equipamento (a), leitura e gravação dos pontos no prisma (b), água no lado da montante (c), caminho percorrido ao longo da base do maciço da barragem (d), ao longo da metade da altura total entre a base e crista (e) e ao longo da extremidade da crista.

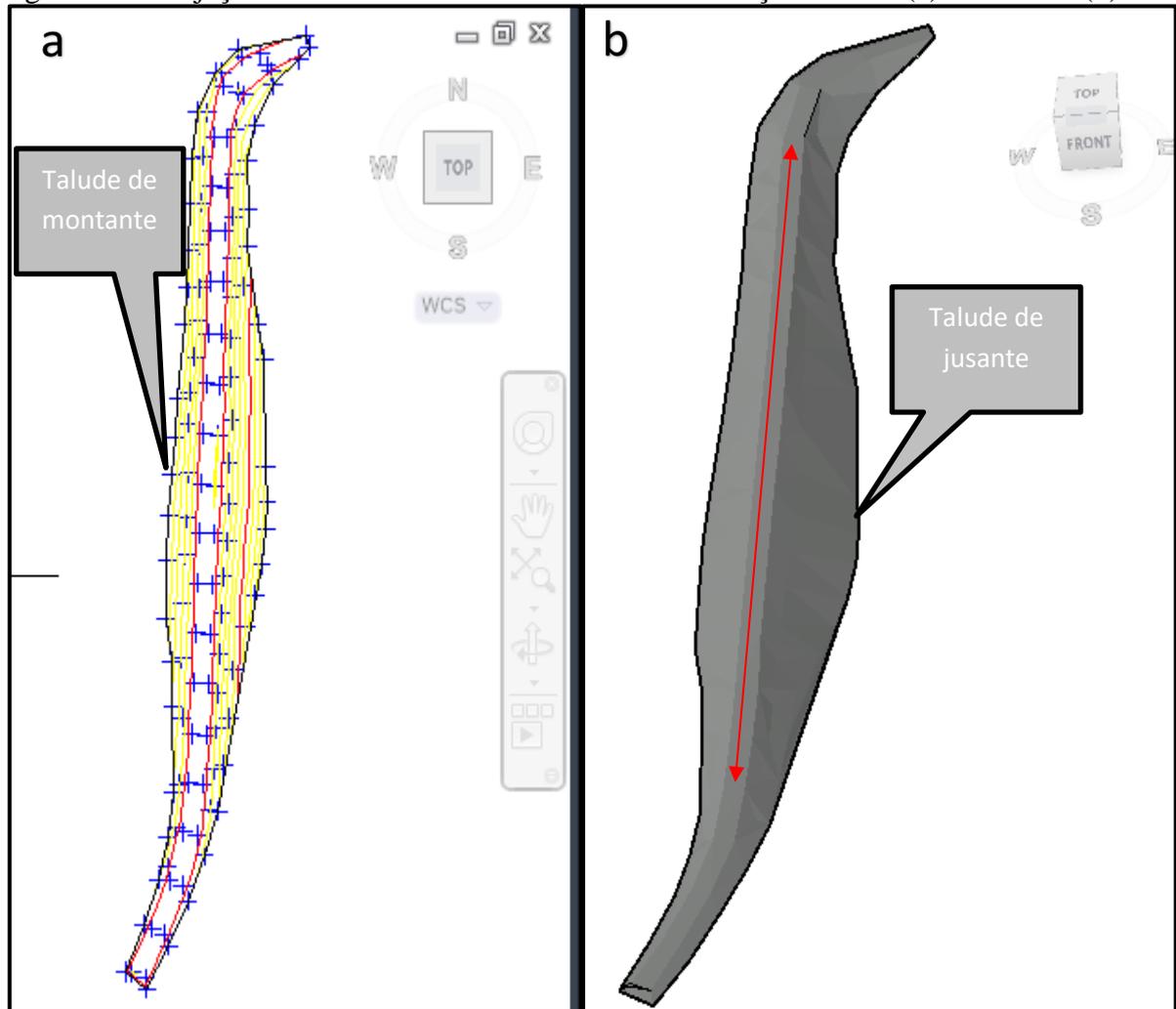


Fonte: Elaboração própria.

Conforme mostra a Figura 34(c), devido a ocupação da água em um determinado trecho no talude de montante, foi necessário realizar um ajuste topográfico, obedecendo as respectivas

cotas altimétricas (z), fornecidas pela topografia do terreno natural, em relação ao nível do mar obtidas através do levantamento topográfico. As seções transversais corrigidas, seguiram um modelo matemático, utilizado pela trigonometria.

Figura 35 – Projeção do barramento no Autocad Civil em seção normal (a) e vista 3D (b).



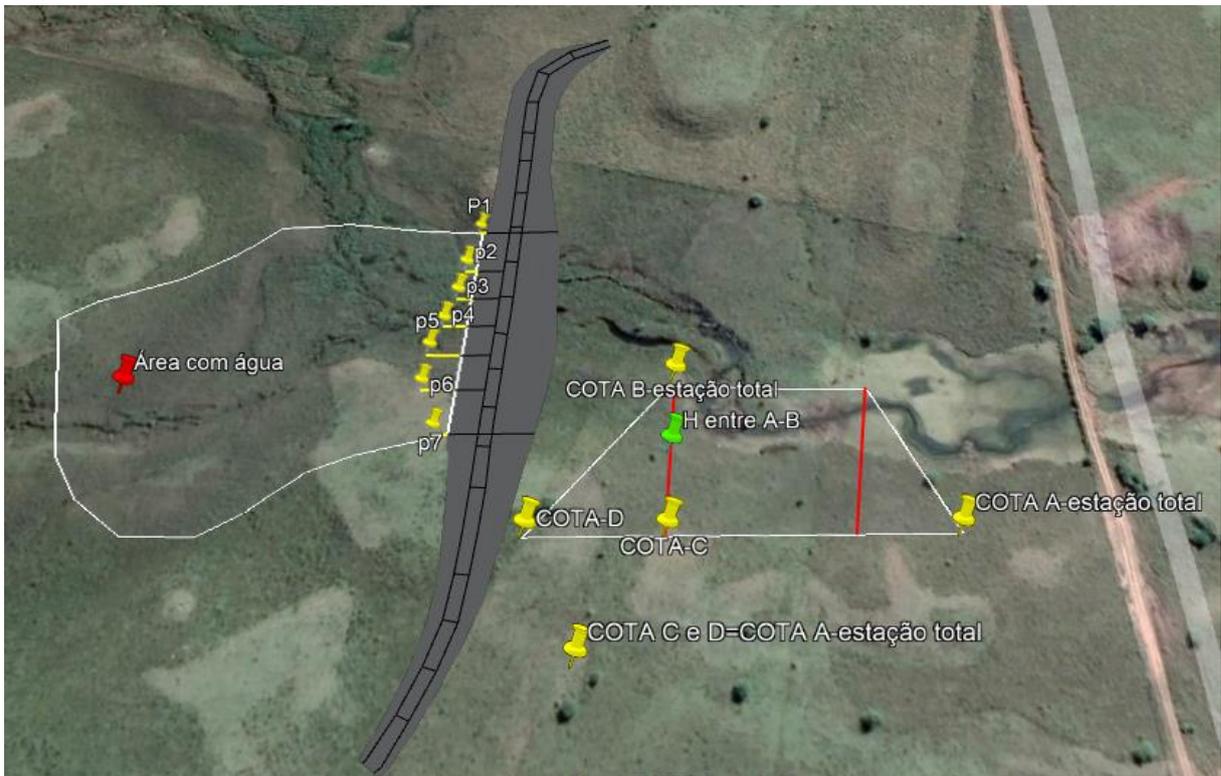
Fonte: Autocad Civil 3D, adaptado pelo autor, 2022.

Na projeção normal do barramento item da Figura 35(a), mostra as curvas de nível na cor amarela, equidistante de 1 em 1 m e na cor vermelha, as curvas de nível equidistante de 5 em 5m. Na Figura 35(b), no qual representa o maciço da barragem em vista 3D, a seta dupla em sentidos opostos, sinaliza a crista, com largura média de 4,80 m.

Para o ajuste topográfico realizado no talude de montante, utilizou-se a cota altimétrica “A”, em cada ponto de interesse, abaixo da crista, conforme ilustra a imagem do item “C” da Figura 34, após obtendo-se as respectivas alturas em cada ponto, entre a cota “B e C”. Ao ser determinada a altura “H” dos pontos de interesse, com o uso da trigonometria, calculou-se a

distância necessária a ser estendida rente à superfície do solo, entre a cota “C e D”, obedecendo o ângulo de inclinação obtido em cada ponto de interesse e a cota altimétrica “D”. Para o ajuste do cateto adjacente em cada ponto de interesse, foi necessário transferir a projeção topográfica obtida no Autocad Civil 3D, para o Google Earth Pro e obter-se apenas as respectivas coordenadas planas Norte (N), pois as coordenadas Leste (E), adotou-se as mesmas do levantamento topográfico, conforme descrito na Figura 36.

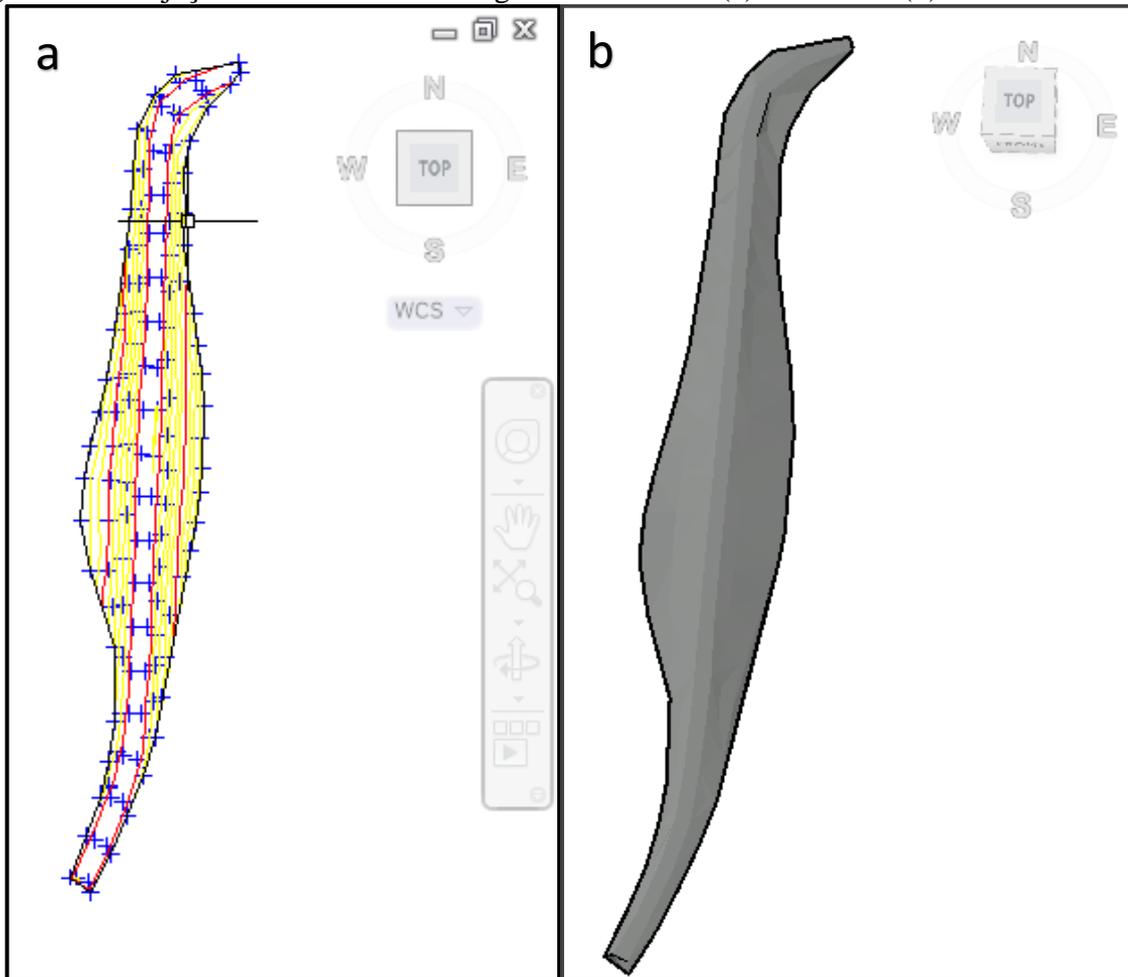
Figura 36 – Ajuste da projeção topográfica original nos pontos de interesse, realizada no Google Earth Pro.



Fonte: Google Earth Pro, adaptado pelo autor, 2022.

Conforme mostra a Figura 36, o ajuste realizado no talude montante entre os pontos 1-7, através da trigonometria, considerou a base de cada seção ajustada (B), sem inclinação do terreno, pois uma análise realizada pelo Google Earth e durante visitas realizadas no local, observou-se uma superfície plana, nos pontos referentes aos ajustes das seções transversais. Após o ajuste realizado nos 7 pontos de interesse, foram inseridas no bloco de notas com os dados obtidos do levantamento topográfico realizado com a Estação Total, as coordenadas planas (N) e (E) e as cotas altimétricas (Z). Com o ajuste obtido, será possível projetar a maior seção transversal conforme novo projeto do barramento confeccionado através do *software* Autocad Civil 3D (Figura 37) e realizar as simulações de estabilidade de taludes, utilizando-se o *software* GeoStudio.

Figura 37 – Projeção do barramento corrigido no Civil 3D (a) e vista 3D (b).



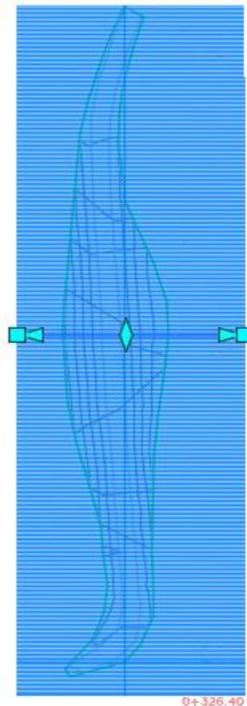
Fonte: Autocad Civil 3D, adaptado pelo autor, 2022.

Observa-se na projeção corrigida do barramento na Figura 37(a), que as curvas de nível equidistantes de 5 em 5 m na cor vermelha, permaneceram iguais no talude de montante e jusante, porém as curvas de nível equidistante de 1 em 1 metro, mostraram-se diferentes. Observa-se 3 curvas de nível a partir da base do talude de montante até a linha vermelha e 4 curvas de nível da base na jusante até a linha vermelha. A diferença em gerou na projeção da seção do barramento ajustado, uma curva de nível a menos na montante, foi devido a uma pequena declividade média do terreno, sobre o centro do maciço da barragem, de aproximadamente 0,017 m/m, ao longo da seção transversal, com maior base, de 43,80 m. Justifica-se, que mesmo considerando-se as seções ajustadas sem inclinações, a pequena declividade ocorreu devido um ajuste realizado na rede de malha de pontos dentro do levantamento topográfico no Autocad Civil 3D, alteração muito pequena, uma vez que uma precisão exata, só pode ser obtida com Estação Total. A Figura 37(b), mostra o barramento

corrigido em vista 3D, com as mesmas características originais obtidas no levantamento topográfico.

Após o ajuste do levantamento topográfico, realizou-se a verificação do volume por comparação de superfície no Autocad civil 3D, utilizando-se o método das seções transversais pela opção “criar corredor”, na qual adotou-se uma distância de 1 m entre cada seção transversal, totalizando 326 seções transversais. Foi adotado seções transversais de 1 em 1 m, para dar melhor consistência nos resultados obtidos do volume acumulado do aterro utilizado na construção do maciço da barragem. A Figura 38, mostra a confecção das seções transversais, para obter-se o volume acumulado ao longo do eixo principal do barramento da barragem.

Figura 38 – Confecção das seções transversais, para o cálculo do volume de materiais acumulado no barramento.



Fonte: Autocad civil 3D, adaptado pelo autor, 2022.

A Figura 38, mostra a confecção das seções transversais no Autocad civil 3D, equidistante de 1 m, conforme mostra o traço horizontal sobre o centro do barramento. Percebe-se na parte inferior da figura um referencial em quantas seções transversais foram geradas pela configuração no *software*, ou seja, 0+326,40 m ao longo do eixo principal entre a ombreira esquerda e direita do talude da barragem.

3.5 Coleta das amostras e execução de testes de laboratório

3.5.1 Coleta de amostras

As coletas de amostra de solo deformadas foram realizadas durante o processo construtivo, quando realizadas as visitas realizadas semanalmente, totalizando “quatro amostras” do início ao término da obra. As amostras foram pesadas com uma balança digital com capacidade de 40 kg de carga máxima. O peso de cada amostra, foi estimado para ser utilizados nos ensaios de laboratório, ou seja, 30 kg, peso mínimo recomendado pelos autores, Cruz (1996), Matos, Silva e Pruski (2000) e Costa (2012), no caso em que haja a necessidade de repetir alguns ensaios. Foram retiradas amostras de material das regiões de montante e jusante dos espaldares e do núcleo próximo ao centro do maciço da barragem nas cotas a 1,5 m da base, 5 m da base, 6 m da base e 9 m da base.

O material coletado, após a chegada do campo ficou estocado em sacos plásticos, fechados e etiquetado, acondicionados em um local seco e livre de chuva para preservar suas características originais.

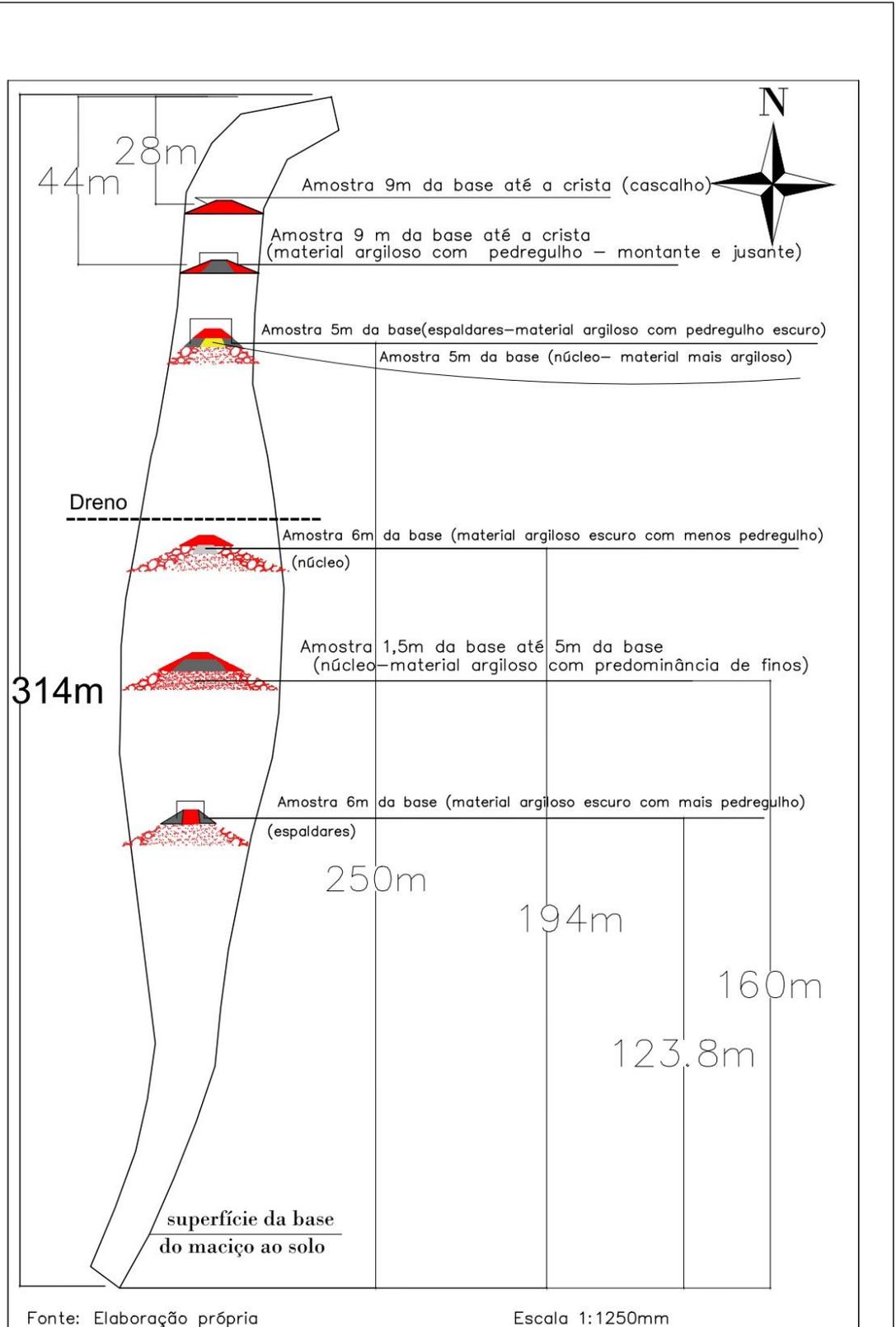
As atividades, nas quais representam a coleta de amostras de solo, são descritas na Figura 39 e a Figura 40, que descreve o mapeamento dos locais de coleta das amostras durante o processo construtivo do barramento.

Figura 39 – Coletas das amostras no maciço da barragem (a), pesagem e acondicionamento das amostras no local das coletas em sacos plástico de 25 kg (b).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 – Mapa descritivo dos pontos de coletas das amostras de solo no barramento da barragem.



Fonte: Autocad Civil 3D, adaptado pelo autor, 2022.

3.5.2 Ensaios de caracterização geotécnica

3.5.2.1 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

Os ensaios de caracterização geotécnica, deram seguimento após a preparação das amostras, conforme orientações técnicas da NBR 6457 (ABNT, 2016).

A execução dos testes para análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, (Figura 41), foram procedidos conforme orientações descritas na NBR 7181 (ABNT, 2016).

Figura 41 – peneiramento grosso (a), ensaio de sedimentação (b) e peneiramento fino (c).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 41(a) e 41(c), mostra a separação dos materiais grossos e finos, retido em cada peneira, dos quais foram realizadas as respectivas pesagens separadamente. A Figura 41(b) prescreve a realização do ensaio de sedimentação das amostras, com partículas de solo iguais ou menores que 0,075 mm.

3.5.2.2 Limites de Atterberg (LL e LP)

De acordo com as normas da ABNT, NBR 6457/2016, NBR 6459/2016, e NBR 7180/2016, foram realizados os ensaios dos limites de Atterberg: limite de liquidez e limite de plasticidade.

O ensaio de limite de liquidez, foi realizado para determinar o teor de umidade correspondente a 25 golpes através do aparelho de Casagrande.

O ensaio do limite de plasticidade, foi determinado através do teor de umidade, quando a rolagem de um cilindro com o solo homogeneizado em uma placa de vidro, atendesse as dimensões do gabarito de metal e, começasse a criar fissuras.

Os ensaios que determinaram os Limites de Atterberg das amostras de solos, foram realizados em laboratório, conforme registros da Figura 42, a seguir:

Figura 42 – Amostras homogeneizadas (a), limite de liquidez (b) e limite de plasticidade (c).



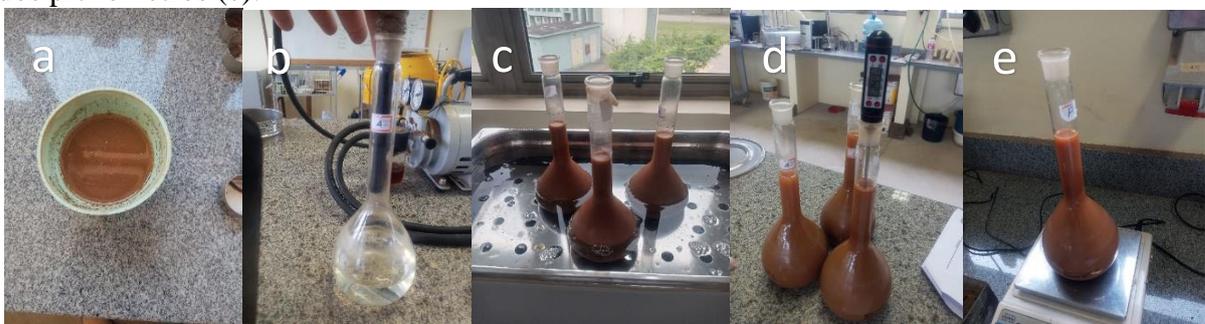
Fonte: Elaboração própria.

3.5.2.3 Massa específica dos grãos que passam na peneira 4,8 mm

O ensaio do peso específico real dos grãos, foi realizado conforme orientações descritas na ABNT NBR 6457/2016 e NBR 6508/1984 através do método do picnômetro.

A Figura 43, mostra as principais atividades do ensaio, realizadas com as amostras de solo coletadas no maciço da barragem:

Figura 43 – Material em repouso com defloculante (a), vácuo dos picnômetros (b), banho maria dos picnômetros (c), calibração da temperatura dos picnômetros (d) e determinação das massas dos picnômetros (e).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 43(a), representa três pesagens de massa úmida de solo em repouso por 12 horas. A Figura 43(b), mostra a realização do vácuo dos picnômetros para retirada de bolhas de

ar. A Figura 43(c), mostra o banho maria dos picnômetros para retirada de possíveis bolhas de ar, que poderiam estar contidas no interior dos recipientes mesmo após a realização do vácuo, podendo alterar os resultados do ensaio quanto a variação da massa específica, devendo ser mínima para não anular o ensaio. A Figura 43(d), representa a medida de temperatura dos picnômetros, tanto na calibração com água e solo e, apenas com água. A Figura 43(e), mostra a pesagem dos picnômetros para determinar as respectivas massas dos conjuntos.

3.5.2.4 Massa específica, massa específica aparente e da absorção de água dos grãos de pedregulhos retidos na peneira 4,8 mm

As atividades do ensaio, no qual representa este ensaio, foram realizadas perante as orientações técnicas da ABNT NBR 6457/2106, NBR 6458/2016 e NBR 6508/1984. O objetivo do ensaio, foi determinar as massas específicas dos grãos retidos e passados na peneira 4,8 mm e a massa específica dos grãos retidos na peneira 4,8 mm de cada uma das amostras coletadas no barramento, condicionadas aos grãos de pedregulho.

Os procedimentos nos quais representam as atividades realizadas em laboratório, são descritos a seguir na Figura 44, nas quais descrevem os principais procedimentos realizados durante cada ensaio.

Figura 44 - Preparação da amostra (a), imersão da amostra em água com o cesto (b), pesagem da amostra imersa (c), medição da temperatura da água (d), enxugando os pedregulhos (e) e pesagem da amostra (f).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 44(a), mostra a pesagem da amostra para a execução do ensaio, a Figura 44(b), a imersão da amostra ensaiada em água por 24 horas, e a Figura 44(c), a pesagem da amostra após imersão em água. A Figura 44(d), representa a medida da temperatura da água de cada amostra ensaiada, a Figura 44(e), o material de pedregulho sendo enxugado para posterior pesagem, conforme mostra a Figura 44(f).

3.5.2.5 Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio

A determinação da composição granulométrica dos materiais graúdos utilizados nos espaldares de montante e jusante no barramento da barragem, foram determinadas pelas orientações técnicas e normativas descritas na NBR 17054 (ABNT, 2022). As atividades referentes a este ensaio, foram realizadas no laboratório de Materiais e estruturas, devido a disponibilidade das peneiras grandes e agitador mecânico, conforme descrito na Figura 45.

Figura 45 – Separação das peneiras (a), peneiramento no agitador mecânico (b), separação dos materiais após o peneiramento (c) e pesagem dos materiais peneirados (d).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 45(a), mostra a determinação das medidas diâmetro e altura do recipiente e a pesagem do mesmo, Figura 45(b), a pesagem do recipiente preenchido com o material coletado dos espaldares e a Figura 45(c), o material homogeneizado, após a determinação granulométrica.

3.6 Ensaios convencionais

3.6.1 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação das amostras de solo, foram realizados por meio dos procedimentos descritos nas normas da ABNT NBR 6457/2016 e NBR 7182/2016.

O principal objetivo do ensaio de compactação, foi obter-se o resultado da massa específica aparente seca máxima ($\rho_{d.máx}$), na qual foi condicionada pelo teor de umidade ótima (W), aplicando-se uma energia de compactação normal, semelhante a utilizada no campo.

Com o ensaios de compactação, foi realizada uma análise comparativa através dos resultados entre as massas específicas aparentes secas máximas obtidas em laboratório e as massas secas aparentes medidas in situ (no barramento), por meio do ensaio Frasco de Areia.

As atividades representadas pelos ensaios de compactação, foram realizadas no laboratório de solos, conforme os principais procedimentos descritos na NBR 7182/2016, descritos a seguir na Figura 46:

Figura 46 - Preparação dos instrumentos (a), ajustes realizados (b), preparação da amostra (c), separação dos materiais para o ensaio (d), execução do ensaio (e) e determinação dos teores de umidade (f).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 46(a), representa a aferição dos equipamentos que serão utilizados no ensaio. A Figura 46(b) mostra o ajuste dos materiais através das porcentagens retidas e passantes através das peneiras 76.2, 19.1 e 4.8 mm, conforme orientações da NBR 7182/2016, de forma a priorizar a quantidade necessária de material para a realização dos ensaios.

A Figura 46(c), mostra o material pesado após o ajuste realizado para ensaiar os corpos de prova, Figura 46(d) a calibração da umidade do solo para cada corpo de prova a ser ensaiado, Figura 46(e), a execução do ensaio em cada corpo de prova e a Figura 46(f), as coletas das amostras de cada corpo de prova ensaiado, conduzidos a estufa, para determinar o teor de umidade correspondente em cada corpo de prova ensaiado.

3.6.2 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Foi utilizado como orientação para o ensaio a norma internacional *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions* sugerida pela ABNT, D3080 (ASTM, 2011) e também, as considerações de Oliveira (2019) e Dias (2018).

É importante destacar, que nesta pesquisa foi executado o ensaio de cisalhamento direto para duas amostras de solos coletadas do núcleo do barramento, das quais os resultados obtidos foram aproveitados na simulação de estabilidade dos taludes do barramento.

Ressalta-se ainda que, a preparação dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto, obedeceu a uma sequência aleatória na seguinte ordem: homogeneização do solo umedecido, determinação da massa de solo do corpo de prova, compactação da amostra e saturação dos corpos de prova.

A homogeneização do solo para confeccionar o corpo de prova, obedeceu ao teor de umidade (W) obtido através da massa específica *in-situ* com o ensaio (Frasco de Areia) realizado no barramento da barragem. Após determinar o teor de umidade das amostras de solo, procedeu-se a homogeneização da massa de solo, das amostras 1,5 e 6 m da base. Foi adicionada uma massa de água, considerando a massa úmida natural de cada amostra de solo para confeccionar o corpo de prova, adicionando-se água até obter-se o teor de umidade correspondente ao encontrado no ensaio realizado in situ no barramento. A Figura 47, descreve as principais atividades realizadas durante a homogeneização das amostras.

Figura 47 – Pesagem da massa de solo a ser homogeneizada (a) e pesagem da massa de água (b).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 47(a), mostra a pesagem da massa de solo, correspondente ao produto do volume da célula de ensaio pela massa específica aparente seca, nas condições de campo e Figura 47(b), a calibração da massa de água, até atingir o teor de umidade obtido no campo.

Para a confecção dos corpos de prova, utilizou-se como referência o teor de umidade e a massa específica encontrada *in-situ* no barramento da barragem (núcleo).

A célula do ensaio, possui as seguintes dimensões: 5 cm x 5 cm x 2 cm, resultando em 50 cm³ o seu volume e a massa específica obtida “in situ” de 1,72 g/cm³. O produto do volume da célula pela massa específica aparente seca, foi de 86.0 g de massa de solo umedecido para cada CP.

Após ser determinada a massa de solo para cada CP, realizou-se uma nova pesagem, pois o acréscimo da massa de água foi realizado para obter o teor de umidade sob as condições reais do teor de umidade encontrada no campo. Após a pesagem, a massa de solo umedecida estava acima da necessária para atender o volume compacto da célula de ensaio, calibrando-se a mesma até atingir aproximadamente 86.0 g. Adotou-se 86.20 de massa de solo, devido ao ajuste realizado com o estilete, até o CP encaixar na célula de ensaio.

Os corpos de prova submetidos ao cisalhamento direto, foram compactados previamente, de forma a atingirem as características desejadas. Para a verificação da influência da compactação sobre a resistência ao cisalhamento, optou-se pelo método de compactação estática. Ambas foram realizadas com o auxílio de um molde de compactação, com dimensões adequadas à célula de ensaio do equipamento de cisalhamento direto.

A massa de solo a ser determinada previamente foi posicionada no interior do molde entre duas placas metálicas quadradas que ficam encaixadas uma na parte superior e outra na parte inferior da amostra. O molde é composto por duas placas “L” metálicas fixadas por

parafusos. As duas placas quadradas (superior e inferior), tem a função de distribuição das tensões uniformemente. A compactação dos corpos de prova, foi realizada com o auxílio de um macaco hidráulico, comprimindo-os de forma a obter-se o volume da célula de ensaio. A Figura 48, descreve os principais procedimentos para confeccionar os corpos de prova para o ensaio de resistência.

Figura 48 – Gabarito para confeccionar os CPs (a), prensagem com macaco hidráulico dos CPs (b), ajustes dos CPs (c) e CPs prontos para o ensaio (d).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 48(a), mostra o molde utilizado para confeccionar os CPs utilizados na célula de ensaio, figura 48(b), prensagem de cada CP com o macaco hidráulico, Figura 48(c), ajuste do CP com estilete até obter as condições cabíveis da célula utilizada na prensa automatizada e Figura 48(d), CPs prontos para o ensaio, envolvidos com papel filme de modo a impedir a perda de umidade para o ambiente externo.

A saturação das amostras foi realizada com a imersão em água, dentro de um recipiente capaz de comportar o conjunto células de ensaio + amostra. O recipiente contém um orifício para conectar uma mangueira, pelo qual realizou-se o vácuo de forma a expulsar as bolhas de ar de cada CP, por um tempo aproximado de 30 minutos. Após o término do processo, admitiu-se que o solo estava completamente saturado, prosseguindo-se com o ensaio de cisalhamento direto. A atividade que representa a realização do vácuo e saturação de cada CP, é mostrada a seguir na Figura 49.

Figura 49 – Recipiente para saturação dos CPs.



Fonte: Elaboração própria.

O ensaio de cisalhamento direto, foi realizado no Laboratório de Solos e Pavimentação da Unipampa, com uma prensa de cisalhamento direto da marca Contenco, ligada ao computador que registra automaticamente as leituras obtidas durante o ensaio com o software Pavitest. Os ensaios de cisalhamento direto foram executados na condição consolidado-drenado com a amostra inundada, motivo pelo qual evitou a perda de umidade dos CPs, durante um período aproximado de 12 horas. A fase de adensamento foi realizada com tensões normais adotadas de: 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa e 400 kPa. Conforme Oliveira (2019) e Dias (2018), durante o uso do equipamento, a velocidade constante foi de 0,025 mm/min, de forma a evitar o excesso de poropressão em cada CP ensaiado.

Cada corpo de prova (CP), permaneceu na prensa até ser observado o comportamento de ruptura, quando atingiram a tensão de cisalhamento máxima e, posteriormente, manifestaram a estabilização das tensões cisalhantes (tensão residual). Os dados foram coletados de forma digital.

O principal objetivo do ensaio, foi obter-se a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo, por meio de um gráfico cartesiano, sendo os pontos referentes às respectivas tensões σ (normais adotadas no plano de cisalhamento) e τ (tensões medidas de resistência ao cisalhamento do material). Posteriormente os valores interpolados foram representados graficamente por uma reta, a fim de definir a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, nos quais foram obtidos os parâmetros de resistência do solo (ângulo de atrito e coesão). Esses parâmetros foram utilizados como dados de entrada, para o software Sloop/w, permitindo calcular o “FS” da barragem, no talude de montante e jusante.

A Figura 50, mostra detalhes da prensa de cisalhamento direto.

Figura 50 – Prensa de cisalhamento direto automatizada.



Fonte: Elaboração própria.

3.7 Testes de avaliação “*in-situ*”

3.7.1 Ensaio de permeabilidade pelo método de uma altura de carga

O procedimento adotado para a realização dos ensaios de permeabilidade foi segundo orientações propostas pelos autores Fernandes (2017) e Lisboa (2006). A partir da aplicação de uma carga constante por meio do Permeâmetro, obteve-se as vazões de água infiltrada no solo e, portanto, pode-se calcular a condutividade hidráulica de campo do material ensaiado.

Para medir a condutividade hidráulica em campo, foram realizados ensaios de permeabilidade a carga constante utilizando-se o Permeâmetro Guelph (modelo 2800K1) na zona não-saturada.

A configuração do ensaio em campo consistiu na análise e seleção dos locais a serem ensaiados e abertura de furos de 20 cm de profundidade, feito com auxílio de um trado manual. Optou-se por realizar os ensaios sempre a uma mesma profundidade, buscando assim uma padronização na amostragem.

As leituras foram realizadas através da variação do nível d’água em função do tempo, encontrando-se a taxa de vazão.

Nos ensaios realizados na região de montante e jusante foi estabelecida uma única altura de carga de 5 cm ($H_1 = 5$). Não foi possível utilizar-se mais de duas alturas de cargas H , devido à capacidade de armazenar água no reservatório do equipamento ser insuficiente para atingir três regimes permanentes em solos com permeabilidade média a alta.

A condutividade hidráulica do campo saturado pelo método do permeâmetro de Guelph pode ser calculada por meio de diferentes equações, conforme descreve o item 2.12.1.8. Neste

estudo foi utilizado um método para cálculo de uma altura de carga hidráulica, (Reynolds & Elrick, 1989). A partir destes métodos obteve-se o parâmetro (K_f), em dois pontos no centro do maciço, percorrendo a superfície da crista e dois pontos, (um sobre a montante e outro sobre a cota 5 m da base), na região central no lado da jusante. Os resultados obtidos, foram utilizados como parâmetros de entrada para simular o comportamento hidráulico do maciço da barragem, na região dos espaldares e núcleo central.

A Figura 51, mostra os principais procedimentos realizados durante a execução do ensaio no barramento para determinar o (K) da região do núcleo e espaldares.

Figura 51 – Instalação do equipamento (a), anotações das leituras realizadas “região do núcleo” (b), montante para região dos espaldares (c) e jusante para região dos espaldares (d).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 51(a), mostra a instalação do equipamento, de forma o permeâmetro no furo ajustado com o tripé, ficasse nivelado e a Figura 51(b), a execução do ensaio com leituras realizadas (tempo em min. versus lâmina de água infiltrada em cm), Figura 51(c) e Figura 51(d), ensaio realizado no talude de montante e jusante.

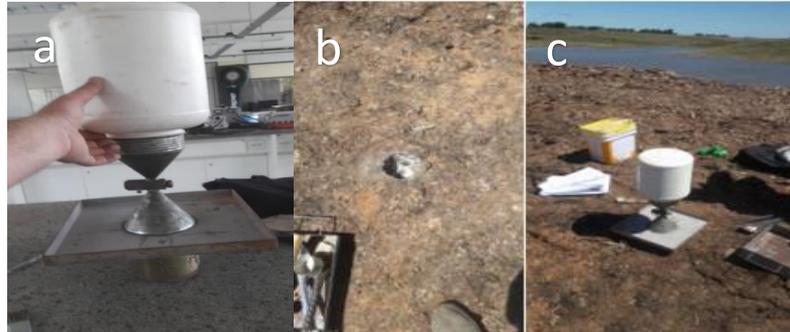
3.7.1.1 Ensaio de controle da massa específica aparente “*in-situ*”

O Ensaio para o controle da massa específica aparente obtida no maciço da barragem, foi procedido conforme orientações técnicas da ABNT NBR 7185/1986.

Os locais escolhidos para determinar a massa específica aparente seca, foram próximos ao núcleo do maciço na região central do talude da barragem, anotando-se as coordenadas geográficas nos pontos ensaiados. A referência de identificação dos locais ensaiados, servirão para futuras avaliações no barramento que possam ter ligações com a compactação.

Os principais procedimentos realizados durante a execução deste ensaio, são descritos na Figura 52, a seguir:

Figura 52 – Aferição do frasco de areia no laboratório (a), abertura do orifício (b) e determinação da massa específica in situ (c).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 52(a), representa a aferição do conjunto Frasco de Areia em laboratório. As Figuras 52(b) e 52(c), descrevem a realização do ensaio Frasco de Areia em campo, para determinar a massa específica seca aparente e o teor de umidade.

3.8 Inspeção de campo e análise patológica

Nesta etapa foram realizadas inspeções em campo para avaliar as condições patológicas do barramento, em sucessivas datas, após o término da obra.

Para a realização do levantamento patológico da barragem foi utilizado o modelo de ficha de inspeção de barragem de terra, desenvolvido e proposto pela Agência Nacional das Águas - ANA (2016).

Com a ficha de inspeção, perante vistoria realizada no local, teve como itens inspecionados o talude da montante, região de montante, crista, talude da jusante, região a jusante e vertedouro.

Realizou-se duas inspeções de campo sendo uma na data 12/03/22 e 17/08/22, sendo que as anomalias foram classificadas a partir da Ficha de Inspeção de barragens de terra, quanto a situação, magnitude e nível de perigo, além de serem fotografadas para registros e acompanhamento da evolução das patologias encontradas.

4 Resultados e processamento de dados

Este capítulo, reúne os dados obtidos ao logo das atividades realizadas para um estudo de caso, envolvendo uma retro análise do processo construtivo de uma barragem de terra de pequeno porte, abordando discussão através da pesquisa realizada com os resultados apurados.

4.1 Análise comparativa do processo construtivo

O Quadro 7, apresenta um resumo comparativo entre as exigências básicas requeridas durante um processos construtivo de uma barragem de terra comparando os resultados obtidos com o estudo de caso ao qual se refere este trabalho:

Quadro 7 – Análise comparativa entre exigências requeridas em um processos construtivo de uma barragem de terra.

Planejamento requerido em uma construção de barragem de terra	Exigências requeridas	Estudo de caso
Viabilidade do projeto	estudos hidrológicos, geológicos, geotécnicos e topográficos	x
Equipamentos de transporte dos materiais de construção da barragem	caminhões, pás carregadeiras, retroescavadeira, escavadeira, scrapers, tratores de esteira, etc.	Conjuntos <i>scraper madal-trator</i> e escavadeira
Equipamentos utilizados na compactação do maciço da barragem	rolo pé de carneiro, conjunto <i>scraper madal-trator</i> e rolo liso	conjunto <i>scraper madal-trator</i>
Espessura da camada compacta	entre 10 e 25 cm	entre 30 e 40 cm
Teor de umidade sugerida na compactação do solo	(W) teor de umidade ótima	(W) acima da ótima
Inclinação dos taludes de montante e jusante em barragens de terra zoneadas com altura entre 5-10 m	Areias e cascalhos montante - 3,00:1 jusante - 2,5:1	2, 5:1 montante 1,90:1 jusante

Fonte: Carvalho (2008), Lopes e Lima (2005), Costa (2012) e Cruz (1996).

Conforme o observado no Quadro 7 (planejamento requerido envolvendo uma barragem de terra), quanto a “viabilidade do projeto”, apenas o levantamento topográfico foi realizado, como sendo um estudo prévio envolvendo o processo construtivo, onde as demais exigências não foram realizadas, pois as mesmas asseguram perante estes estudos, resultados que priorizam

a segurança da barragem. Quanto aos “equipamentos de transporte”, o conjunto *scraper madal-trator* e escavadeira atenderam as exigências mínimas requeridas durante a construção do barramento da barragem, pois a distância percorrida durante a retirada dos materiais das jazidas e o tempo de carregamento das *scrapers* mostraram-se eficientes. Já os equipamentos utilizados na “compactação” do maciço da barragem, o conjunto *scraper madal-trator* atendeu a exigência mínima requerida, porém observou-se perante vistorias no local que o processo de compactação realizado foi desuniforme quanto ao número de passagens necessárias entre as camadas dispostas.

As “espessura das camadas compactas” estiveram entre 25-40 cm, não atendendo o recomendado pela bibliografia deste trabalho, um procedimento adotado que inviabiliza a densificação dos materiais, podendo ser uma das causas do excesso de infiltração encontrado no talude de jusante, quando a barragem entrou em regime de operação. Observou-se que com o passar do tempo, estas infiltrações diminuíram, o que pode ter sido influenciado pelo recalque ocorrido no maciço da barragem.

Quanto ao “teor de umidade sugerida no processo de compactação”, encontrou-se durante o ensaio realizado “in situ”, na cota 7 m da base do maciço (36,7 %), acima da ótima quando comparado ao ensaio realizados com a amostra coletadas do núcleo através do ensaio de compactação realizado no laboratório (28%). Salienta-se que a desuniformidade quanto ao teor de umidade sugerida (ótima), se deve a não realização de nenhum teste de verificação da mesma, conforme o observado durante acompanhamento do processo construtivo. Por fim, quanto a exigência requerida da “inclinação dos taludes” do maciço da barragem envolvendo este estudo de caso, ambos os taludes (montante e jusante), encontram-se abaixo do recomendado, conforme dados levantados através do levantamento topográfico realizado com a Estação Total. Observa-se que as inclinações dos taludes, é uma das medidas adotadas em projeto que aumenta o fator de segurança do barramento da barragem, uma vez que a estabilidade da obra, é condicionada quando diminui-se as inclinações no talude de jusante e montante.

Quanto a realização de sondagens no local da construção do barramento (subsolo), Carvalho (2008), sugere realizar este ensaio afim de conhecer a caracterização dos materiais abaixo da superfície. Conforme Cruz (1996) e Costa (2012), este estudo geológico, prevê as condições favoráveis quanto a caracterização dos materiais, resistência, compactação e permeabilidade através dos ensaios de laboratório. Nenhuma sondagem para conhecer os parâmetros físicos dos materiais foi realizado, apenas uma pequena trincheira de vedação até encontrar o material rochoso, conforme conversa verbal com o proprietário da barragem.

Durante a abertura da trincheira de vedação, não foi possível realizar o acompanhamento, devido a obra começar sem aviso prévio, motivo pelo à região que corresponde ao subsolo, não foi confeccionada durante as análises de estabilidade do talude, uma vez que se necessita conhecer os parâmetros físicos destes materiais.

Quanto a qualidade dos materiais utilizados na confecção do maciço, Mattos, Silva e Pruski (2000), orientam conhecer a capacidade do suporte de carga através de estudos geotécnicos, porém nenhum estudo foi realizado, aos materiais de fundação e maciço. Adotou-se apenas conhecimentos corriqueiros do empreiteiro.

Cruz (1996), prioriza realizar um estudo geotécnico dos materiais utilizados na confecção do barramento, quanto a compactação, um problema muito comum quanto as condições aceitáveis durante o processo construtivo. Irregularidades durante a compactação, afeta a produtividade em solos muito úmidos e solos secos, a não aderência do material por falta de umidade, uma verificação ignorada entre todo o período do processo construtivo do maciço do reservatório, que pode ter favorecido surgência de áreas úmidas e outras com excesso de infiltração no talude de montante. Perante vistorias realizadas no local, observou-se que estas anomalias diminuíram, com o reservatório em regime normal de operação, supondo-se que o recalque do maciço favoreceu a estanqueidade do problema, não sendo uma questão de interesse neste trabalho.

Quanto a distribuição das camadas utilizadas no processo construtivo, Salinas (2017) e Carvalho (2008), orientam que as mesmas estejam entre 15-25 cm, sendo preferencialmente a utilização do rolo pé-de-carneiro para compactar solos argilosos e siltosos, ou o conjunto scrap madal-trator, respeitando os critérios de distribuição das camadas. Verificou-se que nesta etapa do processo construtivos, as camadas foram dispostas em alturas superiores descritas pelos autores, o que empobreceu a compactação do maciço da barragem, uma vez que a compactação não era realizada na largura total entre cada camada disposta. Outra agravante ocorreu devido a não verificação de qual energia de compactação a ser empregada no campo, devido a não realização deste ensaio de laboratório.

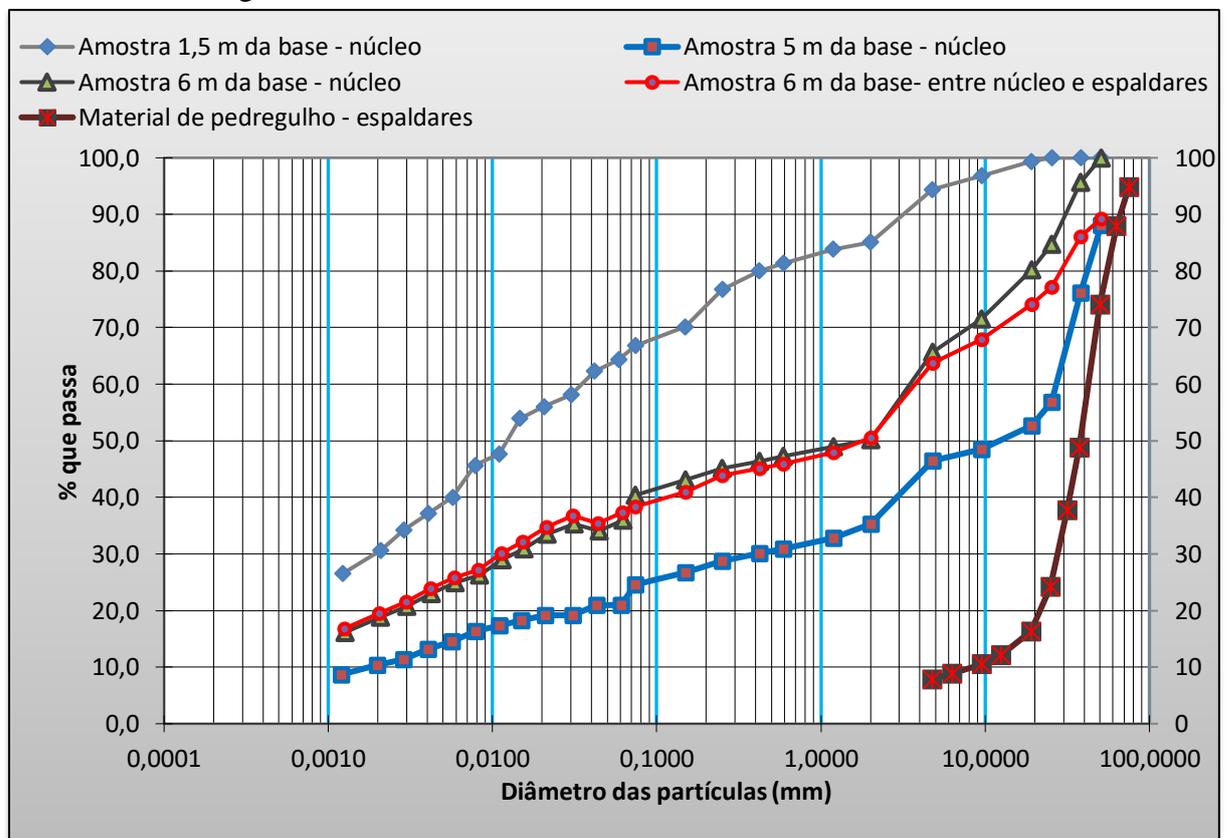
Quanto aos ensaios de resistência de cisalhamento dos materiais utilizados na construção do barramento, Marangon (2018), Cruz (1996) e Costa (2012), orientam realizar o mesmo para definir a máxima tensão que pode atuar no solo, sem que haja ruptura. Por fim, o cálculo de estabilidade do talude da barragem não foi realizado, averiguando-se um projeto básico, uma vez que o empreendimento foi construído com recursos próprios. Está condição impossibilitou realizar uma análise comparativa entre o fator de segurança do reservatório em

condições de regime normal de operação e rebaixamento rápido, através dos dados compilados entre um projeto básico e a metodologia utilizada neste trabalho.

4.2 Caracterização geotécnica dos materiais de solos

A partir dos ensaios de caracterização geotécnica, executados nas amostras que compõem o barramento, coletadas no barramento da barragem (núcleo e espaldares), O Gráfico 1 e o Quadro 8, apresentam os resultados com as respectivas curvas granulométricas e os resultados obtidos dos ensaios de caracterização geotécnica a seguir:

Gráfico 1 – Curva granulométrica.



Fonte: Elaboração própria.

Pelo observado no Gráfico 1, a amostra 1,5 m da base mostra o comportamento de um material argiloso com predominância de finos, o que é bom para a região do núcleo. Já as amostras 6 m da base e 6 m da base entre - entre núcleo e espaldares, mostraram um comportamento semelhante, sendo materiais não recomendados para o núcleo e sim para regiões entre espaldares e o núcleo, sendo a mesma consideração para a amostra 5 m da base.

Já o material dos espaldares, apresentaram um comportamento bem graduado, sendo um material apropriado para estas regiões.

Quadro 8 – Resultados dos ensaios de caracterização geotécnica 1,5, 5, e 6 m da base e pedregulhos.

AMOSTRAS	(LL)	(LP)	(IP)	ϒ do solo que passa na 4,8 mm (g/cm ³)	ϒ dos grãos retidos na 4,8 mm (g/cm ³)	ϒ dos grãos retidos e passados na 4,8 mm (g/cm ³)	SIGLA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
1,5 m da base (núcleo)	56	38	19	2,82	2,77	2,81	MH - silte elástico arenoso
5 m da base (núcleo)	65	44	21	2,94	2,73	2,87	GM - pedregulho siltoso com areia
6 m da base (núcleo)	66	45	22	2,71	2,61	2,74	GM - pedregulho siltoso com areia
6 m da base entre núcleo e espaldares	64	42	21	2,76	2,56	2,80	GM - pedregulho siltoso com areia
AMOSTRA	ϒ nat. (g/cm³)		Cu	Cc	MF	D.máx. (mm)	GW - pedregulho bem graduado "F"
Material de pedregulho (espaldares)	1,17		5,38	2,28	6,77	75	

Fonte: Elaboração própria.

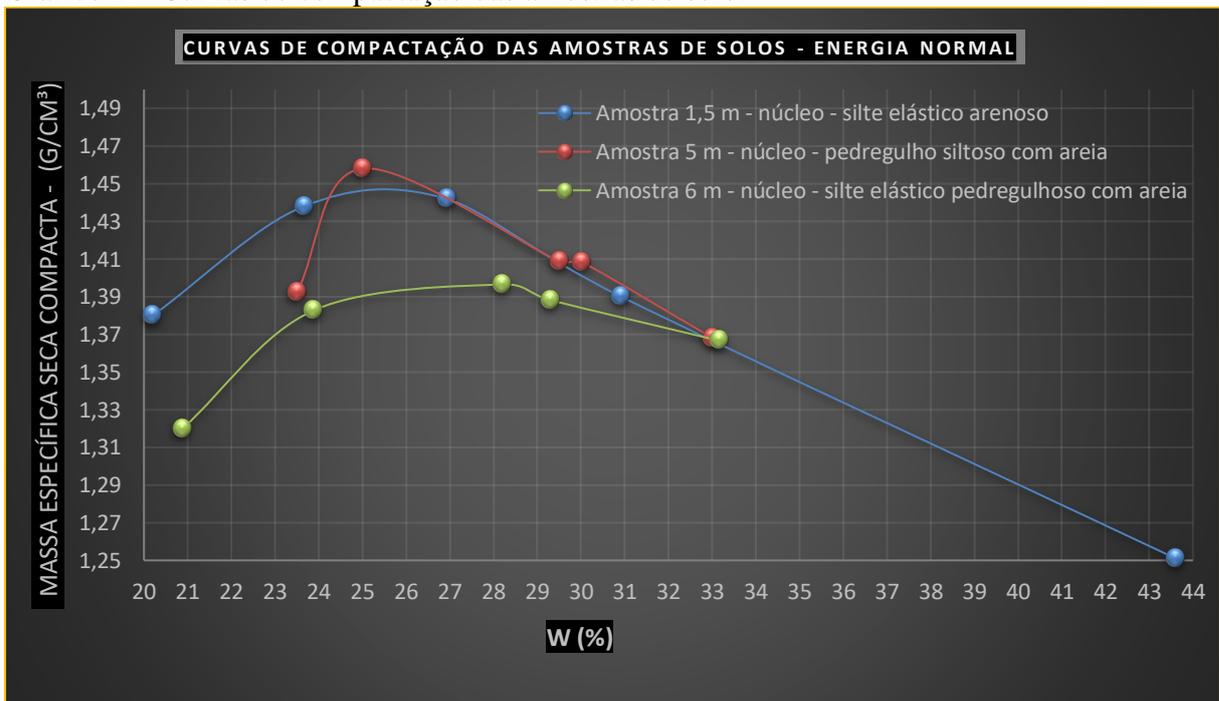
Com base nos resultados dos ensaios de caracterização (Gráfico 1 e Quadro 8), utilizando-se a metodologia SUCS, classificou-se o solo 1,5 m da base em um silte elástico arenoso. O solo da amostra 5 m da base, 6 m da base do núcleo e 6 m da base entre núcleo e espaldares como pedregulho siltoso com areia. Já. Finalmente, o material utilizado nos espaldares de montante e jusante, em pedregulho bem graduado, conforme classificação da SUCS, o Cu (coeficiente de não uniformidade) e Cc (coeficiente de curvatura), sendo um material bem graduado, apropriado para estas regiões.

4.3 Resultados dos ensaios convencionais

4.3.1 Ensaio de compactação e permeabilidade

A partir das atividades realizadas em laboratório, dos ensaios de compactação das amostras de solo, 1,5 m, 5 m e 6 m da base do maciço (núcleo), foram computados os resultados obtidos na curva de compactação. A amostra 6 m da base entre o núcleo e os espaldares, devido a quantidade de material ser insuficiente, não foi realizado o ensaio de compactação. Após obter-se os resultados computados, confeccionou-se as curvas de compactação, sob energia normal. O Gráfico 2 mostra o comportamento das curvas de compactação para as três amostras ensaiadas.

Gráfico 2 – Curvas de compactação das amostras de solo.



Fonte: Elaboração própria.

Pelo observado no Gráfico 2, a amostra 1,5 e 5 m, apresentam massas específicas máximas e teores de umidades ótimas semelhantes com 1,45 e 1,46 g/cm³ e teores de umidade ótima com 25 e 25,5%. Já a amostra 6 m, apresenta massa específica máxima seca menor, quando comparadas as demais com 1,392 g/cm³ e teor de umidade ótima com 27,5%.

O Quadro 9, apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de laboratório da massa específica seca máxima e dos teores de umidade ótimos sob energia de compactação normal, retirados do Gráfico 2. Para fins avaliativos desta pesquisa, no Quadro 9, será mostrada a massa

específica aparente seca do solo *in-situ*, obtida pelo ensaio realizados na cota 7 m da base do maciço da barragem (núcleo).

Quadro 9 – Parâmetros de compactação das amostras de solo.

AMOSTRA	Energia de compactação	Massa específica aparente seca máxima (g/cm³)	Teor de umidade ótima (W) em %
1,5 m da base (núcleo)	Normal	1,445	25,5
5 m da base (núcleo)	Normal	1,46	25
6 m da base (núcleo)	Normal	1,395	28,3
AMOSTRA	TIPO DE SOLO	Massa específica aparente natural do solo "in situ" (g/cm³)	Teor de umidade do solo (W) em %
TESTE 1	Material com predominância de cascalho	1,26	36,7

Fonte: Elaboração própria.

Em virtude de obter-se dados não convincentes no TESTE 2 do controle da massa específica aparente natural do solo “in situ”, optou-se por trabalhar apenas com o resultado obtido através do TESTE 1. A massa específica aparente natural do TESTE 1 foi menor quando comparada as amostras 1,5, 5 e 6 m da base, assim como o teor de umidade acima da ótima, conforme mostra os resultados obtidos dos ensaios de laboratório.

Com o intuito de realizar-se uma análise de estabilidade de taludes no barramento da barragem, sob condições de fluxo permanente, foram apresentados os resultados obtidos dos ensaios de permeabilidade (carca constante), para as regiões do núcleo e espaldares. Os resultados do Quadro 10, correspondem aos ensaios de permeabilidade com carga constante, executados através do ENSAIO 1 (centro da crista para região do núcleo) e ENSAIO 2 (centro da crista, lado da montante e jusante na cota 5 m da base para as regiões dos espaldares).

Quadro 10 – Parâmetros de permeabilidade para regiões do núcleo e espaldares.

	LOCAL	Coefficiente de permeabilidade (cm/s)
ENSAIO 1	Centro da crista	1,274 x 10 ⁻⁵
ENSAIO 2	Centro da crista no lado de montante e/jusante	0,047/0,03

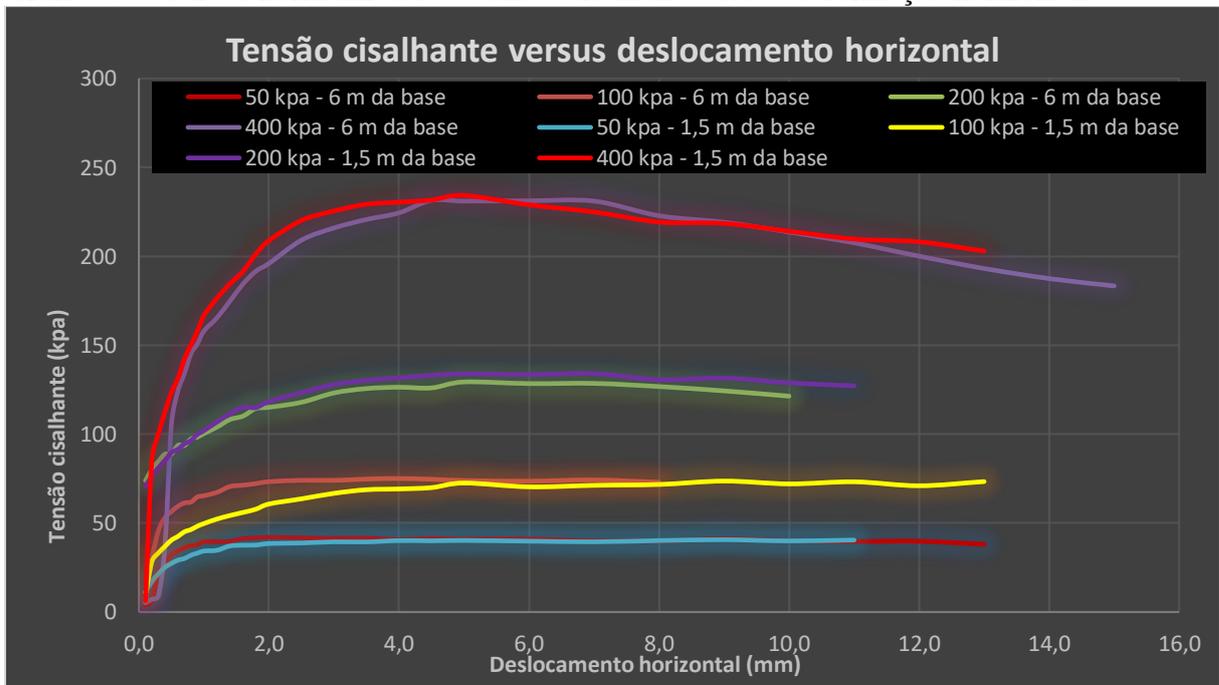
Fonte: Elaboração própria.

Conforme os valores de permeabilidade no ENSAIO 1 (centro da crista), o resultado obtido é menor quando comparado ao ENSAIO 2 (centro da crista no lado de montante e/jusante). Conforme Souza (2013), o coeficiente de permeabilidade do ENSAIO 1, está dentro do estimado, comparado a porcentagem de 10% que passa na curva granulométrica com diâmetro entre 0,1 e 1,0 mm, do resultado das amostras ensaiadas do núcleo, no qual a permeabilidade $1,274 \times 10^{-5}$ cm/s é menor que 5×10^{-1} cm/s. O mesmo procede para o ENSAIO 2, pois o autor estima para solos com porcentagem passante na curva granulométrica (10% e diâmetro de 2 mm), uma permeabilidade de 5×10^{-1} cm/s, sendo que a permeabilidade obtida nas regiões dos espaldares (pedregulho com granulometria uniforme), valores de 0,047 e 0,03 cm/s.

4.4 Ensaio de cisalhamento direto

A seguir serão apresentados os resultados obtidos das amostras 1,5 e 6 m da base (núcleo), com as curvas normalizadas (tensão cisalhante *versus* deformação horizontal) aplicadas durante a realização do ensaio de cisalhamento direto através do Gráfico 3 a seguir:

Gráfico 3 – Curvas normalizadas da tensão cisalhante *versus* deformação horizontal.



Fonte: Elaboração própria.

Analisando-se o Gráfico 3 é constatado que para as amostras de solo ensaiadas 1,5 e 6 m da base do maciço (núcleo), para a tensão normal aplicada 400 kPa, observa-se o pico de

tensão cisalhante máxima evidente, em consequência da ruptura do corpo de prova com comportamento semelhante de uma argila (PA). Os carregamentos 50, 100 e 200 kPa, apresentaram um pico de tensão cisalhante menor, em consequência da ruptura plástica, comportamento típico de um solo Normalmente Adensado (NA).

De maneira geral, os resultados para o ângulo de atrito (ϕ') e a coesão (c') foram semelhantes para tensões superiores a 50 KPa para os quatro pontos analisados, em cada amostra de solo submetida ao ensaio.

O Quadro 11, apresenta os valores de tensão normal e tensão cisalhante para a amostra 1,5 e 6 m da base do maciço (núcleo), ou seja, tensão normal adotada e tensão cisalhante obtida do ensaio de cisalhamento direto. A partir das tensões normais e tensões cisalhantes máximas, pode-se traçar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, das amostras 1,5 e 6 m da base (núcleo) representada no Gráfico 4.

Quadro 11 – Tensões normais *versus* tensões cisalhantes máximas, sob energia de compactação obtida a campo.

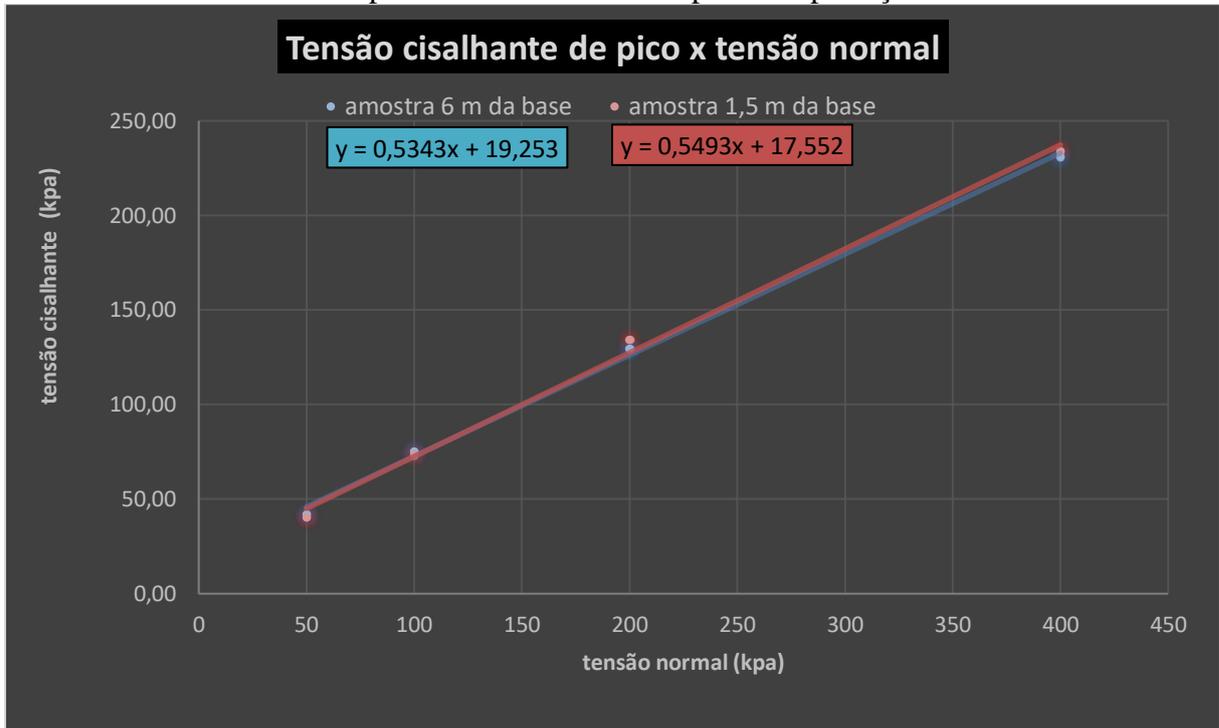
			Com área de cisalhamento constante	
Amostra	γ do solo (gm/cm ³)	CP	Tensão Vertical (kPa)	Tensão de Cisalhamento Máxima de Pico (kPa)
1,5 m da base (núcleo)	Obtida a campo (frasco de Areia)	1	50	40,5
		2	100	73,3
		3	200	134,1
		4	400	234,3
6 m da base (núcleo)	Obtida a campo (frasco de Areia)	1	50	42,07
		2	100	75,06
		3	200	129,36
		4	400	231,23

Fonte: Elaboração própria.

Conforme o observado no Quadro 11, as tensões de cisalhamento máxima de pico obtidas através das amostras 1,5 e 6 m da base (núcleo), apresentaram resultados aproximados. Estes valores aproximados fizeram com que os valores do ângulo de atrito (ϕ') e a coesão (c'), apresentem valores semelhantes para tensões superiores a 50 KPa para os quatro pontos analisados, em cada amostra de solo submetida ao ensaio, de forma a constatar que estes materiais são adequados para a região do núcleo da barragem.

Perante análise realizada com os dados obtidos através do *software* Pavitest em conjunto com o equipamento de ensaio de cisalhamento direto (tensão cisalhante x tensão normal), traçou-se a envoltória de ruptura de Mohr-Coloumb, conforme elaborada no Gráfico 4, a seguir:

Gráfico 4 – Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para compactação estática.



Fonte: Elaboração própria.

É possível observar no Gráfico 4, para os corpos de prova da amostra 1,5 e 6 m da base do maciço da barragem, as envoltórias de ruptura, com área constante, obtiveram o intercepto coesivo igual a 17,5 e 19,2 kPa e ângulo de atrito interno de 28,7° e 28,1°, através da equação da linha de tendência linear “y” entre os termos analisados.

4.4.1 Parâmetros de resistência obtidos através da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb.

No Quadro 12, são apresentados os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento direto, das amostras 1,5 e 6 m da base do maciço (núcleo), obtidos das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb do Gráfico 4 da Equação “y” com linha de tendência linear e dos resultados obtidos através do *software* Pavitest, após a execução do ensaio de cisalhamento

direto. Devido a não disponibilidade dos equipamentos para realizar o ensaio de resistência dos materiais dos espaldares, para obter os parâmetros de resistência, optou-se utilizar a bibliografia imposta por Cruz (1996). Foram utilizados no Quadro 12, as médias calculadas dos valores do ângulo de atrito (ϕ') e a coesão (c'), dos ensaios triaxiais dos materiais granulares “basalto” de amostras de enrocamento da Barragem Capivara.

Quadro 12 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento das amostras 1,5 e 6 m da base (núcleo) e enrocamento da Barragem Capivara.

Amostra	Energia de compactação	Com área de cisalhamento constante	
		C (kPa)	ϕ (°)
1,5 m da base (núcleo)	Obtida a campo (frasco de Areia) Equação "y"	17,5	28,7
1,5 m da base (núcleo)	Obtida a campo (Frasco de Areia) "equipamento"	20	28,6
6 m da base (núcleo)	Obtida a campo (Frasco de Areia) Equação "y"	19,25	28,11
6 m da base (núcleo)	Obtida a campo (Frasco de Areia) "equipamento"	20	28,24
Média obtida dos Parâmetros de Resistência		C (kPa)	ϕ (°)
1,5 m e 6 m da base (núcleo)		19,18	28,41
Barragem Capivara (enrocamento)		0,4	41,85

Fonte: Elaboração própria.

Pelo observado no Quadro 12, houveram variações nos valores interceptos coesivos, obtidos através do equipamento e calculados a partir das envoltórias de ruptura com área de cisalhamento constante. Isso pode ser justificado devido o ajuste realizado através da linha de tendência linear, na qual tem influência na Equação “y”, e o pico de tensão cisalhante máxima evidente, para o carregamento com 400 kPa. Já para os carregamentos 50, 100 e 200 kPa, ocorreu picos de tensão cisalhante mais brandos, uma vez que o *software* Pavitest, exprime resultados mais coerentes as leituras realizadas durante o ensaio de cisalhamento em cada corpo

de prova ensaiado.

Foram utilizadas as médias obtidas dos Parâmetros de Resistência das amostras 1,5 e 6 m da base do Quadro 12, afim de aproveitar e impor consistência nos resultados utilizados através do *Software* GeoSlope (Slop/W), para o cálculo de estabilidade de taludes da barragem que se propõe esta pesquisa. Já para os materiais utilizados nos espaldares, os dados de entrada foram os parâmetros de resistência (ϕ e c), obtidos através dos ensaios realizados por Cruz (1996) do enrocamento da barragem Capivara.

4.5 Inspeções de campo e análises patológicas

Os resultados obtidos nas inspeções de campo, foram estruturados conforme o Guia de Orientação e formulários para Inspeções de Segurança de Barragem de terra, fornecida pela ANA (2016), de acordo com sua localização/anomalia, situação, magnitude e nível de perigo. Os itens situação, magnitude e nível de perigo presentes na ficha de inspeção, estão representadas neste tópico pelas abreviações SI, MG e NP respectivamente.

O item situação SI, tem como opções de respostas os itens NA, NE, PV, DS, DI, PC, AU e NI, que significam respectivamente, não aplicável, anomalia não existente, anomalia constatada pela primeira vez, anomalia desapareceu, anomalia diminuiu, anomalia permaneceu constante, anomalia aumentou e este item não foi inspecionado.

O item magnitude (MG), possui as siglas I, P, M e G como opção de respostas e estas significam respectivamente a insignificante, pequena, média e grande. Já o item nível de perigo NP, tem como opções de respostas os números 0, 1, 2 e 3, que significam respectivamente a nenhum, atenção, alerta e emergência.

As anomalias encontradas durante as inspeções de campo foram: rip-rap incompleto, deslocado ou destruído, desabamentos/afundamentos, ou seja, leves recalques pontuais em pontos isolados na crista da barragem na região de montante, falha na proteção vegetal no talude de montante, erosões lineares na região de montante e jusante. Após o reservatório entrar em nível de operação, durante a segunda inspeção de campo, encontrou-se sinais de fuga d'água no pé do maciço, áreas úmidas (surgências) na cota 0,6 m de altura da base no centro do barramento da barragem no lado da jusante e erosão progressiva no canal de fuga próximo ao pé do barramento. As anomalias diminuiram quando comparadas entre a primeira e segunda vistoria de campo, com um domínio muito pequeno comparadas as citadas que se mantiveram estáveis, conforme será mostrado nos resultados das Inspeções de campo e Análises Patológicas.

As principais atividades, referentes a primeira inspeção de campo realizada no local da barragem, na qual prescreveu a data 12/03/2022, são descritas nas Figuras 53, 54 e 55, a seguir:

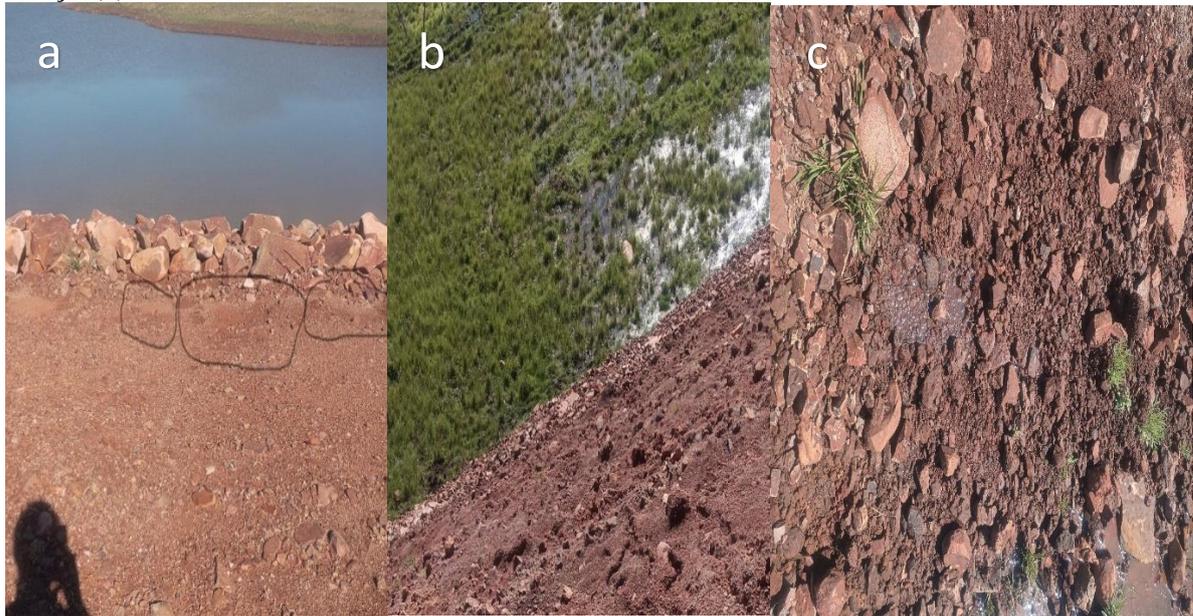
Figura 53 – Talude de montante (a) e região do talude a montante (b).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 53(a), mostra o Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado em 2,5 m de extensão no talude de montante, não aplicado no nível da água entre o volume morto e útil. Deslocamento do Rip-rap, por falta de banquetas e deficiência da compactação no barramento. A Figura 53(b), mostra sulcos, que formaram erosões lineares, ocasionada pelas chuvas na região da montante.

Figura 54 – Crista (a), talude da jusante (b) e região do talude a jusante próxima ao centro do maciço (c).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 54(a), mostra desabamentos/afundamentos, ou seja, leves recalques pontuais na crista, em regiões com transição no talude da montante, com um desnível pequeno no sentido jusante-montante, o que diminuí as irregularidades que estão ocasionando erosões lineares. A água das chuvas, amortece tal efeito ao direcionar o seu fluxo entre a superfície no barramento e do Rip-rap no lado da montante, Figura 54(b), falha na proteção vegetal no talude de jusante, sinais de fuga de água no pé do maciço e Figura 54(c), áreas úmidas (surgências) na cota 0,6 m da base do talude, sobre o centro do barramento.

Figura 55 – Região do talude a jusante (a) e vertedouro (b).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 55(a), mostra sulcos, que formaram erosões lineares, ocasionada pelas chuvas na região da jusante, devido falha na proteção vegetal, Figura 55(b), o vertedouro, onde a distância do canal de fuga próximo ao barramento, encontra-se muito curta.

Durante a segunda inspeção realizada no local da barragem, observou-se que maior parte das anomalias constatadas na primeira vistoria, se mostraram em um comportamento característico estável, com diminuição progressiva, entre as datas 12/03/2022-17/08/2022.

Perante a segunda vistoria no local referente a data 17/08/2022, o reservatório encontrava-se em regime de operação, ou seja, nível máximo da água.

As principais atividades, referentes a segunda inspeção de campo realizada no local da barragem, são descritas nas Figuras 56, 57 e 58, a seguir:

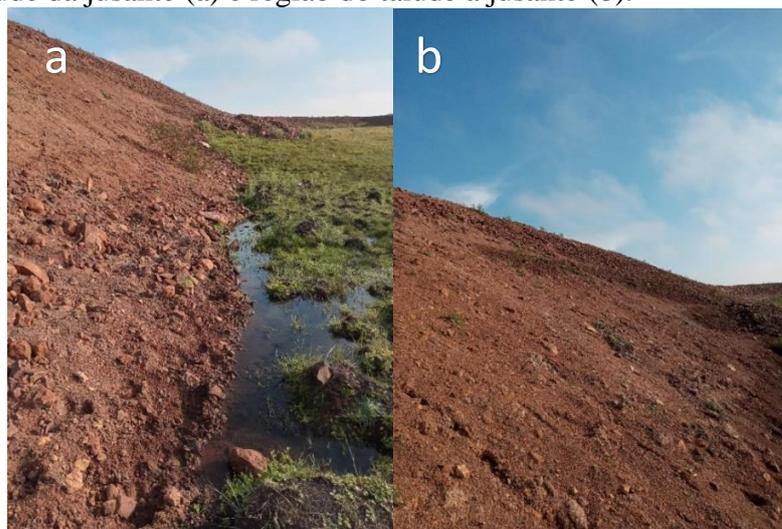
Figura 56 – Talude de montante (a), regiões do rip-rap (b) e crista (c).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 56(a), mostra correção de falhas no rip-rap, com material retirado da fundação, Figura 56(b), pontos isolados no talude de montante, sem proteção rip-rap e Figura 56(c), transição com talude na montante, com um desnível pequeno no sentido jusante-montante, regiões com recalques pontuais estáveis, comparados a primeira inspeção. Erosões lineares nas regiões no talude de montante inexistentes, devido a cheia do reservatório.

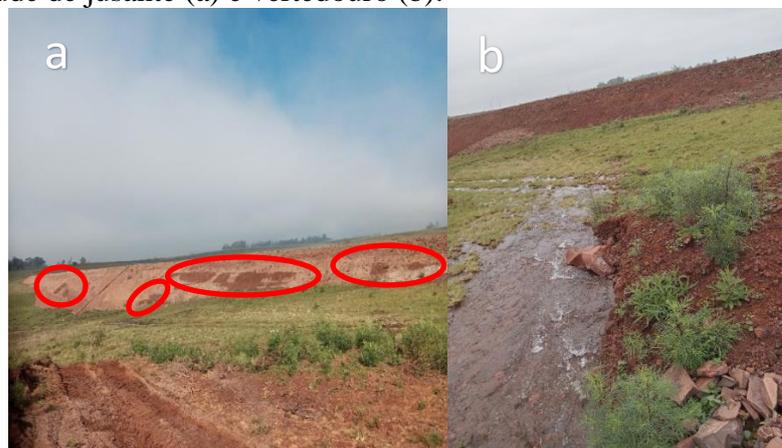
Figura 57 – Talude da jusante (a) e região do talude a jusante (b).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 57(a), mostra falha na proteção vegetal no talude de jusante e sinais de fuga de água no pé do maciço e Figura 57(b), sulcos com erosões lineares, ocasionada pelas chuvas na região da jusante, devido falta de proteção vegetal que se mostraram estáveis entre as duas vistorias realizadas.

Figura 58 – Talude de jusante (a) e vertedouro (b).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 58(a), mostra regiões isoladas, representada pelos círculos vermelhos, onde encontraram-se úmidas e não mais com vertentes, nas quais a anomalia diminuiu progressivamente, conforme análise feita entre a primeira e a segunda inspeção, pressupondo-se devido ao assentamento (recalque), do maciço. A Figura 58(b), mostra a drenagem do reservatório, através do vertedouro, ocorrendo uma erosão progressiva próxima ao pé do barramento, devido ao canal de fuga não respeitar um distanciamento aceitável.

Com base na estruturação da lista de inspeção de segurança de barragem de terra são apresentados nos Quadros, 13, 14, 15 e 16, os resultados referentes ao levantamento patológico do talude de montante, crista, talude de jusante e vertedouro, marcados na cor amarela.

Quadro 13 – Resultados do levantamento patológico do talude de montante: Não aplicável (NA), anomalia não existente (NE), anomalia diminuiu (DI), anomalia permaneceu constante (PC) e média (M).

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
B	BARRAGEM DE TERRA													
B.1	Talude de Montante													
1	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Escorregamentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Fissuras/afundamento (face de concreto)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Rip-rap incompleto, destruído ou deslocado	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1
5	Afundamentos e buracos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Erosão nos encontros das ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Deslocamento de blocos de rocha pelo efeito de ondas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 14 – Resultados do levantamento patológico da crista: Não aplicável (NA), anomalia não existente (NE), anomalia diminuiu (DI), anomalia aumentou (AU) e média (M).

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO										MAGNITUDE	NP	
B	BARRAGEM DE TERRA													
B.2	Crista													
1	Erosões	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Fissuras longitudinais e transversais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Falta de revestimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Falha no revestimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
5	Desabamentos/afundamentos (recalques)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1
6	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Defeitos na drenagem	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Defeitos no meio fio	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
9	Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Desalinhamento do meio-fio	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Depressões devido à falta de sobrelevação	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 15 – Resultados do levantamento patológico do talude de jusante: Não aplicável (NA), anomalia não existente (NE), anomalia constatada pela primeira vez (PV), anomalia diminuiu (DI), anomalia permaneceu constante (PC), anomalia aumentou (AU), média (M) e grande (G).

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE		NP		
	BARRAGEM DE TERRA													
B.3	Talude de jusante													
1	Erosões ou ravinamentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1
2	Escorregamentos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Fissuras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Falha na proteção granular	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	2
5	Falha na proteção vegetal	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	2
6	Afundamentos e buracos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
7	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Erosão nos encontros das ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1
9	cavernas e buracos nas ombreiras	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
10	Canaletas quebradas ou obstruídas	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
11	Formigueiros, cupinzeiros ou tocas de animais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
12	Sinais de movimento	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
13	Sinais de fuga de água ou áreas úmidas (surgências)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1
14	Carreamento de material na água dos drenos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 16 – Resultado do levantamento patológico do vertedouro: Não aplicável (NA), anomalia não existente (NE), anomalia constatada pela primeira vez (PV), anomalia permaneceu constante (PC), pequena (P) e média (M).

FICHA DE INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA														
	LOCALIZAÇÃO/ ANOMALIA	SITUAÇÃO								MAGNITUDE		NP		
C	VERTEDOURO													
C.1	Canais de Aproximação e Restituição													
1	Árvores e arbustos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
2	Obstrução ou entulhos	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
3	Desalinhamento dos taludes e muros laterais	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
4	Erosões ou escorregamentos nos taludes	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1
5	Erosão na base dos canais escavados	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
6	Erosão na área a jusante (erosão regressiva)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1
7	Instabilidade/queda de blocos de rocha do talude lateral	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	
8	Construções irregulares (aterro/estrada, casa, cerca)	NA	NE	PV	DS	DI	PC	AU	NI	I	P	M	G	1

Fonte: Elaboração própria.

Para fins comparativos é apresentado no Quadro 17, um resumo da localização/anomalia e nível de perigo encontradas durante as vistorias realizadas na primeira e segunda inspeção. Os resultados referentes ao levantamento patológico são apresentados através do Gráfico 5, com a variação obtida ao nível de perigo nas duas inspeções de campo.

Quadro 17 – Localização/anomalia versus nível de perigo.

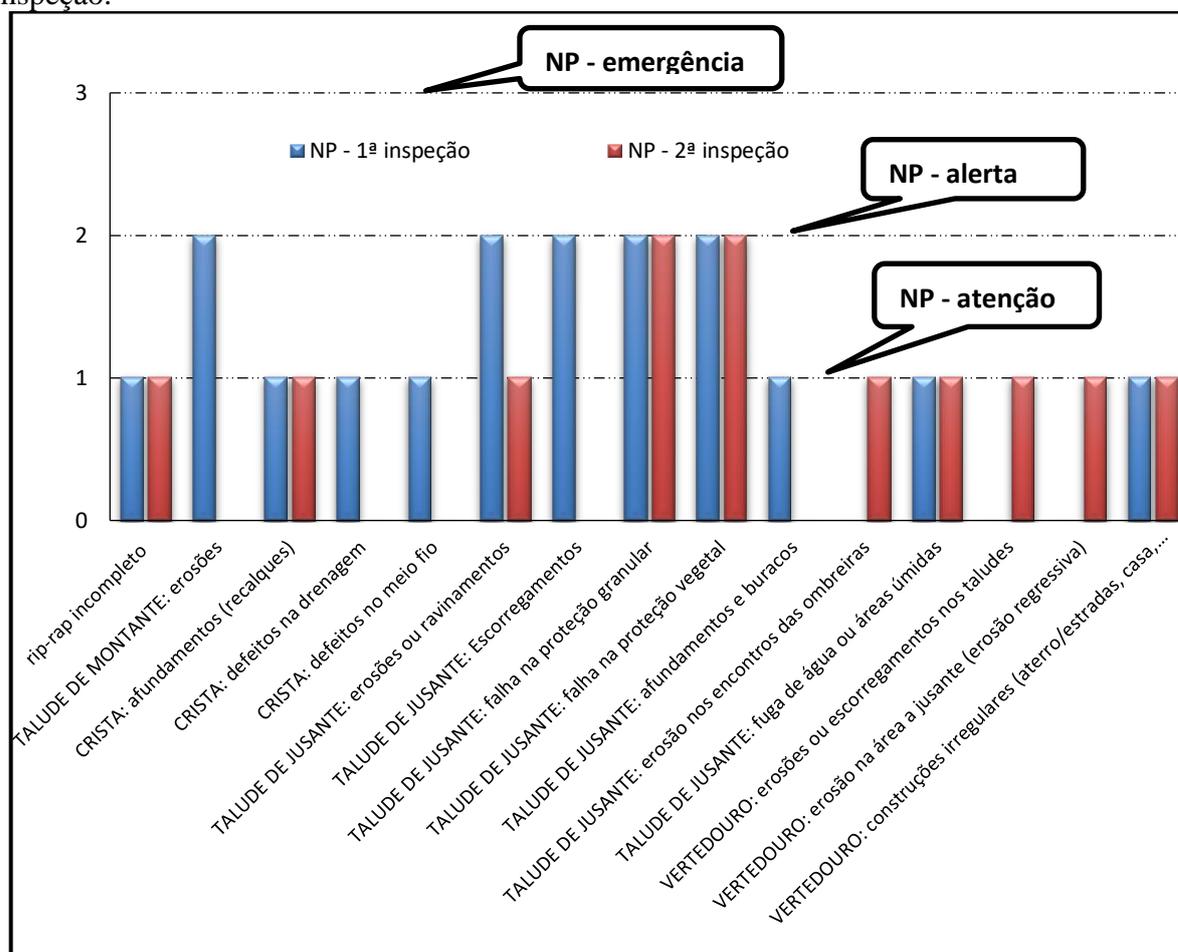
Localização/anomalia	NP – 1ª inspeção	NP – 2ª inspeção
TALUDE DE MONTANTE: rip-rap incompleto ou destruído	1	1
TALUDE DE MONTANTE: erosões	2	0
CRISTA: desabamentos/afundamentos (recalques)	1	1
CRISTA: defeitos na drenagem	1	0
CRISTA: defeitos no meio fio	1	0
TALUDE DE JUSANTE: erosões ou ravinamentos	2	1
TALUDE DE JUSANTE: Escorregamentos	2	0
TALUDE DE JUSANTE: falha na proteção granular	2	2
TALUDE DE JUSANTE: falha na proteção vegetal	2	2
TALUDE DE JUSANTE: afundamentos e buracos	1	0
TALUDE DE JUSANTE: erosão nos encontros das ombreiras	0	1
TALUDE DE JUSANTE: fuga de água ou áreas úmidas	1	1
VERTEDOURO: erosões ou escorregamentos nos taludes	0	1
VERTEDOURO: erosão na área a jusante (erosão regressiva)	0	1
VERTEDOURO: construções irregulares (aterro/estradas, casa, cerca)	1	1

Fonte: Elaboração própria.

Pelo observado no Quadro 17, quanto a localização/anomalia entre a primeira e segunda inspeção de campo, o NP regrediu progressivamente, não descartando-se uma 3ª inspeção de campo com o Guia de Orientação e formulários para Inspeções de Segurança de Barragem de terra, fornecida pela ANA (2016). Uma 3ª inspeção de campo seria avaliar no talude de montante o rip-rap, a proteção granular, vegetal e fuga de água ou área úmidas no talude de jusante. Por fim, devido a barragem se encontrar em nível de operação, avaliar o comportamento do vertedouro, quanto as erosões ou escorregamento nos taludes, erosão na área a jusante e uma construção irregular encontrada a jusante do talude, uma cerca divisória de inverno de campo.

A seguir é apresentado o Gráfico 5, para melhor entendimento quanto ao NP-1 (atenção), NP-2 (alerta) e NP-3 (emergência), com o resumo final das anomalias encontrada durante a 1º e 2º inspeção de campo.

Gráfico 5 – Localização/anomalia versus variação obtida ao nível de perigo perante 1ª e 2ª inspeção.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme o Guia de Orientação e formulários para Inspeções de Segurança de Barragem de terra, fornecida pela ANA (2016), perante análise do Gráfico 5, constata-se que as anomalias com NP-1, encontram-se em situação de atenção e NP-2 em situação de alerta, conforme dados levantados durante a 1ª e 2ª inspeção realizada no local. As anomalias que se encontram em situação de atenção, correspondem ao rip-rap incompleto, na crista pequenos recalques (afundamento e buracos), defeitos na drenagem e no meio fio. No talude de jusante, em situação de atenção, encontram-se erosões ou ravinamentos, afundamentos-buracos, erosões nos encontros das ombreiras e fuga de áreas úmidas no pé do maciço da barragem. No vertedouro as anomalias que se encontram NP-1, correspondem erosões nos taludes, na área a jusante e construções irregulares, ou seja, uma cerca divisória abaixo da construção do barramento da barragem.

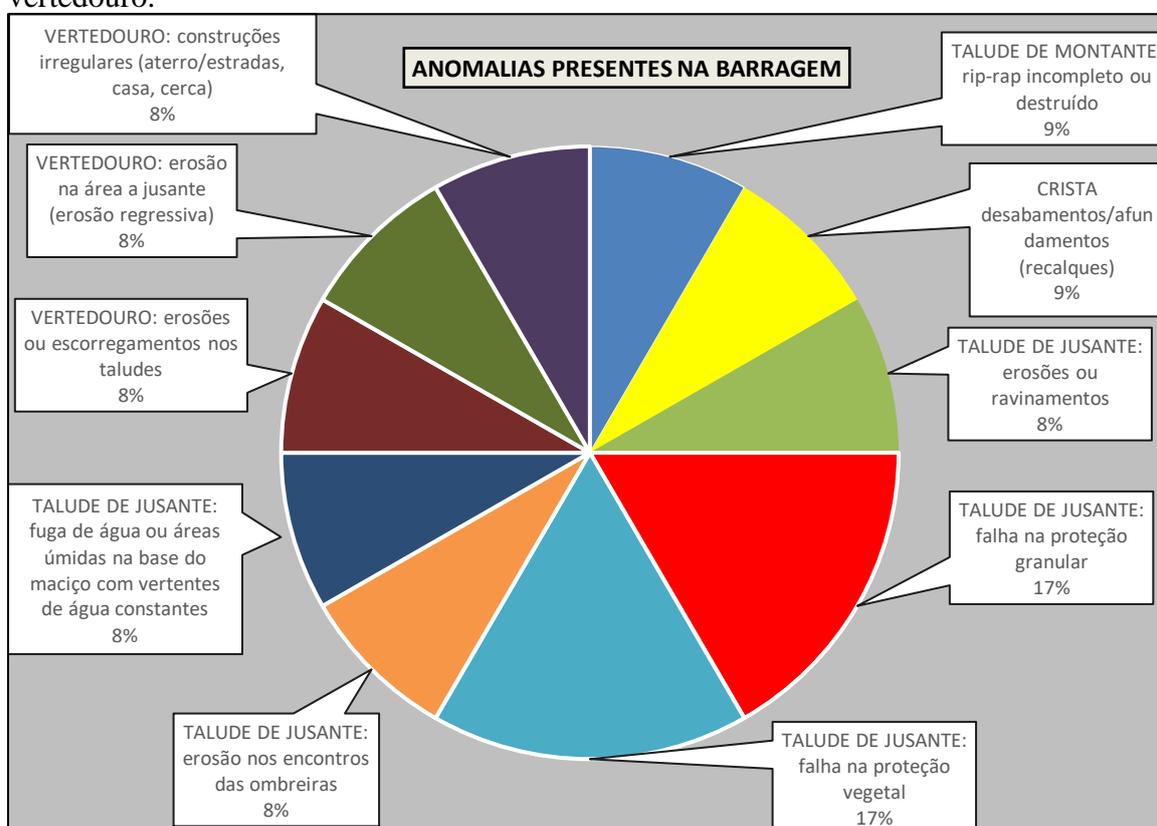
Quanto ao NP-2, no qual atende uma situação de alerta, as anomalias apresentadas no Gráfico 5, correspondem a erosões no talude de montante. Já no talude de jusante, encontram-

se erosões, escorregamentos, falha na proteção granular e vegetal, sendo esta situação o motivo de realizar-se uma nova vistoria no local, como forma de priorizar a segurança da barragem.

Caso haja interesse do proprietário, orienta-se que o mesmo contrate um engenheiro da área, para realizar uma 3ª avaliação com a Ficha de Inspeção de Barragens de Terra e avaliar o comportamento das anomalias obtidas na 2ª inspeção. Outro fator importante é atentar-se as anomalias, falha na proteção granular e falha na proteção vegetal poderão passar de NP-2 para NP-3 em situação de emergência e a fuga de água ou áreas úmidas de NP-1 para NP-2 e NP-3 podendo levar a ruptura da barragem.

Com base nos resultados obtidos através da última inspeção de campo, é possível fazer uma análise percentual das anomalias encontradas no barramento, considerando-se os locais de talude de montante, crista, talude de jusante e vertedouro. Apresenta-se a seguir os percentuais das anomalias encontradas através do Gráfico 6, em decorrência do NP-1 e NP-2, obtidos perante inspeção de campo e análises patológicas realizadas no local da barragem, conforme o Guia de Orientação e formulários para Inspeções de Segurança de Barragem de terra, fornecida pela ANA (2016).

Gráfico 6 – Anomalias presentes no barramento no talude de montante, crista, jusante e vertedouro.



Fonte: Elaboração própria.

Perante os resultados compilados através do Gráfico 6, as causas e as soluções dos problemas avaliados serão com base no estudo realizado por Salinas (2017), sob consulta e orientações do manual do Ministério da Integração Nacional (2002) e o Guia de Orientação e formulários para Inspeções de Segurança de Barragem de terra, fornecida pela ANA (2016).

Na sequência, são apresentadas as Figuras 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67 e 68, referentes as anomalias encontradas durante a 2ª e última inspeção realizada no barramento da barragem.

Figura 59 - Rip-rap incompleto ou destruído.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 59, mostra o deslocamento em algumas regiões do rip-rap, foi ocasionado pelo tipo de material utilizado na sua concepção, dos quais certificaram-se com dimensões aproximadamente iguais, permitindo que as ondas passem entre elas e venha a erodir a camada intermediária de proteção. Outro fator responsável foi o deslocamento da camada de apoio (transição) do rip-rap, descalçando-o e formando uma depressão quando o rip-rap recalca sobre o espaço vazio. Segundo o manual do Ministério da Integração Nacional (2002), a solução desta anomalia e conforme acompanhamento do processo construtivo de um rip-rap, deve-se escavar banquetas com uma pá de corte em conformidade com os materiais de dimensões maiores, utilizando-os como base, e alocar novamente o rip-rap com camadas intermediárias de proteção com materiais bem graduados.

Figura 60 - Desabamentos/afundamentos (recalques).



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com as inspeções realizadas em campo, a Figura 60, mostra a anomalia que foi ocasionada na crista em algumas regiões isoladas pela água proveniente das chuvas, devido ao desnível inadequado para drenar a água ao longo do tempo, fazendo com que a água da chuva crie suas próprias canaletas. Segundo a ANA (2016), a solução para o problema é estabelecer marcos ao longo da crista para determinar a exata localização e extensão do assentamento da crista. Restabelecer a cota da crista de maneira uniforme preenchendo as áreas com depressões, utilizando técnicas construtivas adequadas e monitorar os marcos da crista para detectar possível recalque no futuro. Durante as correções da terraplanagem, um engenheiro deve determinar a causa da depressão e monitorar as medidas necessárias para corrigir o problema.

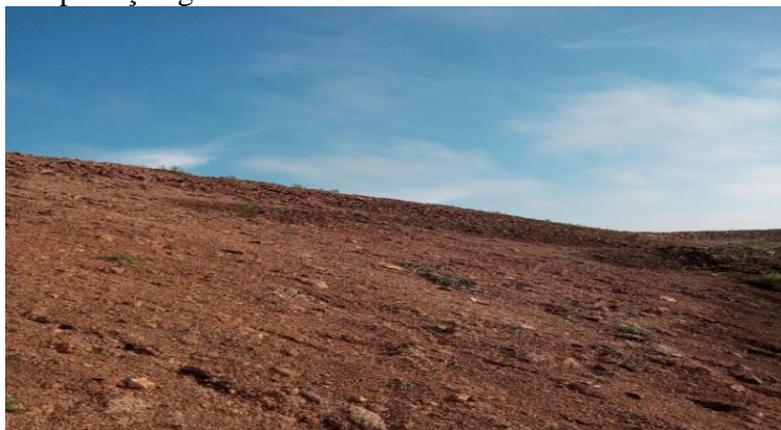
Figura 61 - Erosões ou ravinamentos.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 61, mostra a anomalia ocasionada no talude de jusante, que foi ocasionada pela ação do escoamento da água de chuva, sendo mais acentuada de forma localizada formando sulcos lineares bem definidos. Conforme a ANA (2016), uma forma para prevenir estes problemas é construir sistemas de drenagem ao longo do talude de montante e implantar uma proteção vegetal logo no início do problema, com gramíneas adaptadas as condições climáticas da região.

Figura 62 - Falha na proteção granular.



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se na Figura 62, que esta anomalia surgiu devido a deficiência do sistema de drenagem superficial, ocasionando falhas no material de pedregulho da camada de proteção granular do talude de jusante. Segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), para prevenir eventuais falhas na proteção granular, deve-se implantar a proteção vegetal após o término da construção do barramento e construir pequenos diques para canalizar a água da chuva, com pequeno desnível em queda livre.

Figura 63 - Falha na proteção vegetal.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme registro fotográfico da Figura 63, constatou-se durante a inspeção de campo, que este tipo de problema foi devido a erosão superficial a jusante, que provoca a perda de material e conseqüentemente a vegetação natural da área. A vegetação natural foi prejudicada pela falta de umidade decorrente da estação seca, prejudicando a germinação que se encontrava em fase de dormência, devido ao barramento ser construído recentemente. Conforme Salinas (2017), orienta que para resolver este problema é necessário realizar o plantio de uma vegetação rasteira, com ciclo curto de germinação, que seja adaptada as condições climáticas em períodos de estiagem após o término da obra.

Figura 64 - Erosão no encontro das ombreiras.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 64, mostra está anomalia constatada pela primeira vez na ombreira esquerda, na qual a causa provável do problema foi devido o escoamento da água da chuva pelo canal de fuga no encontro com a estrutura, após a barragem entrar em regime de operação. Segundo a ANA (2016), este problema pode ser resolvido através do plantio de uma vegetação adequada, preferencialmente logo no início da surgência da anomalia.

Figura 65 - Sinais de fuga d'água ou áreas úmidas.



Fonte: Elaboração própria.

Perante a 1ª e 2ª inspeção realizada no local, constatou-se sinais de fuga d'água localizada em pontos isolados em quantidades excessiva, conforme mostrado na Figura 65, porém com aspecto limpo e sem carreamento de materiais.

Conforme Salinas (2017), segundo o Ministério da Integração Nacional (2002), essa anomalia constatada (Figura 65), é ocasionada por uma erosão interna no maciço da barragem, devido uma falha atribuída a energia de compactação e situações internas que facilitam o fluxo de água em excesso através do interior do maciço da barragem.

Segundo a ANA (2016), sinais de fuga d'água localizada ou áreas úmidas é sinal que a água encontrou ou abriu uma passagem através do maciço da barragem e a continuação do fluxo pode ampliar a erosão e levar a ruptura da barragem. Para a solução deste problema, segundo a ANA, deve-se monitorar os pontos isolados e observar o aumento da vazão de água e se há transporte de materiais. Se houver carreamento de materiais, um dique de areia deve ser construído em volta da surgência para reduzir a velocidade da água e a capacidade erosiva do fluxo. Caso a erosão se acentue, o nível do reservatório deverá ser rebaixado e um engenheiro qualificado deve inspecionar o problema e tomar outras medidas para solucionar o problema.

Figura 66 - Erosões ou escorregamento nos taludes.



Fonte: Elaboração própria.

Perante a 2ª inspeção realizada no barramento da barragem, constatou-se erosões no canal do vertedouro, sob a base do barramento, na qual a Figura 66, mostra esta anomalia. Segundo a ANA (2016), esta anomalia constatada pela primeira vez foi devida o solo ou rocha onde foi cortado o canal do vertedouro não suficientemente resistente a erosão pode atingir o reservatório, provocando seu rápido esvaziamento. Segundo a ANA (2016), a solução deste problema é substituir o material erodido por aterro compacto e proteger a área colocando enrocamento ou revestindo de forma apropriada.

Figura 67 - Erosão na área a jusante (erosão regressiva).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 67, apresenta essa anomalia constatada pela primeira vez, durante a 2ª inspeção realizada no local da obra. Segundo a ANA (2016), na saída do canal de restituição, pode aparecer erosão regressiva, que se desenvolve de jusante para a montante, principalmente na base do canal. Conforme observado em propriedades rurais durante algumas atividades realizadas na área agrícola e a ANA (2016), a solução para este problema é preencher a erosão na fase inicial com pedregulhos bem graduados, sem deixar solo exposto ou espaços vazios entre os rochedos. O preenchimento da erosão com materiais resistentes, evitará o carreamento do solo pelo fluxo d'água, sendo uma solução econômica para o problema.

Figura 68 - Construções irregulares (aterro, estradas, casa, cerca).



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 68, registra a anomalia encontrada, ou seja, uma cerca divisória de invernadas de campo, juntamente com um aterro de cascalho, utilizado para tráfego de veículos de rodagem a jusante do talude à acesso a granja do proprietário da barragem. Observou-se que as anomalias constatadas podem obstruir a passagem d'água do vertedouro elevando o nível em períodos de cheias, e dificultar a passagem de veículos na estrada de acesso, mesmo que o aterro neste local, se encontre com dutos de passagem de água abaixo da linha de rodagem. Conforme a ANA (2016) e acompanhamento de um estudo de caso, a solução para este problema é estimar a vazão de cheias e redimensionar os dutos de passagem de água oriundas do canal de fuga, evitando erosões no aterro da estrada de acesso à granja e interrupção do tráfego de veículos em períodos de cheias.

4.6 Avaliação do potencial de risco

Conforme o item 2.13.1, referente a metodologia imposta pela ANA (2016), o potencial de risco do barramento foi obtido com os resultados dos Níveis de Periculosidade, Níveis de Vulnerabilidade e Níveis de Importância, representados pela cor amarela

O resultado do conjunto de parâmetros ou características técnicas do projeto, que permitem pela sua magnitude retratar o grau de Periculosidade (P), está apresentada no Quadro 18.

Quadro 18 – Resultado do grau de periculosidade do barramento da barragem.

Dimensão da Barragem	Vol. Total do Reservatório	Tipo de barragem	Tipo de fundação	vazão de Projeto	(P)
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	
Altura \leq a 10 m e Comprimento \leq a 200 m	Pequeno < 20 hm ³	Barragem de Terra	Rocha alterada Saprolito	Inferior a 500 anos ou desconhecida	28
1	3	10	4	10	

Fonte: Elaboração própria.

O cálculo do segundo conjunto, envolvendo aspectos relacionados com o estado atual da barragem, com sua história e operacionalidade de suas estruturas hidráulicas, que permite avaliar o grau de Vulnerabilidade (V) atual.

O Quadro 19 a seguir, apresenta o resultado da Vulnerabilidade do barramento.

Quadro 19 – Resultado do grau de vulnerabilidade do barramento da barragem.

Tempo de operação	Existência de projeto (As Built)	Confiabilidade das estruturas vertedoras	Tomada de Água	Percolação	Deformações afundamentos e assentamento	Deterioração do Talude/ Paramento	(V)
> que 30 anos	não existe projeto	suficiente	aceitável	Zonas úmidas em talude de jusante e áreas alagadas a jusante devido ao fluxo	Pequenos abatimentos da crista	Falhas no rip-rap e na proteção de jusante	27
0	7	6	3	6	2	3	
(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	

Fonte: Elaboração própria.

O terceiro e último conjunto de dados, referente aos Níveis de Importância (I), reúne o somatório dos parâmetros que por seu vulto, conferem o valor estratégico associável à barragem no caso de ruptura, pelo qual o resultado obtido é apresentado através do Quadro 20.

Quadro 20 – Resultado do grau de importância do barramento da barragem.

Volume útil (hm³)	População a jusante	Custo da barragem	(I)
(m)	(n)	(o)	
Baixo < 200	Pequena	Pequeno	1
1	1	1	

Fonte: Elaboração própria.

Finalmente com os resultados obtidos anteriormente é possível calcular o Potencial de Risco (PR) da barragem, que sugere a classificação segundo o nível de risco à segurança demonstrado no Quadro 4, através da “Equação 26”, localizada no item 2.13.1 deste trabalho. Essa classificação está associada a índices do Potencial de Risco (PR) e de Vulnerabilidade (V).

O Quadro 21, apresenta o resultado do potencial de risco do barramento da barragem.

Quadro 21 – Resultado do potencial de risco do barramento da barragem.

CLASSE	Potencial de risco (PR)
C	27,5 - Normal

Fonte: Elaboração própria.

Apesar do (PR) não apresentar nenhum risco quanto a segurança da barragem, segundo o resultado obtido através do Quadro 21, não descartasse a possibilidade de orientar o proprietário a contratar um engenheiro responsável para futuras vistorias no local. Essas inspeções seriam importantes para avaliar possíveis anomalias futuras e avaliar o percentual obtido entre elas, conforme resultados obtidos e compilados no item 4.5, referente inspeções de campo e análises patológicas, demonstrados no Gráfico 6. Podem surgir novas anomalias e aumentarem os resultados do levantamento patológico do barramento, motivo pelo qual pressupõe-se futuras inspeções no local da barragem por um perito da área.

4.7 Simulação do comportamento hidráulico e estabilidade das seções do barramento

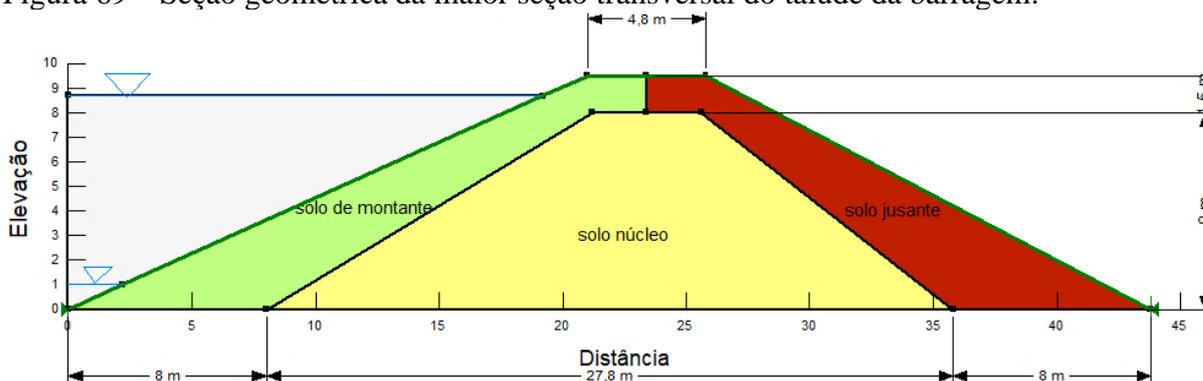
4.7.1 Regime normal de operação

A confecção da geometria da maior seção transversal de interesse, foi definida através do levantamento topográfico obtido com uma estação total, obtendo-se a geometria da seção principal através do *software* Autocad Civil 3D. A definição das regiões que compõe o núcleo e os espaldares da barragem, foram definidas perante observações durante o processo construtivo, uma vez que não foi possível o acesso a nenhum projeto de execução do barramento.

Através do *software* GeoStudio versão 2020, com licença plena de 14 dias, foi realizada as simulações das condições de fluxo em regime permanente de operação, fluxo transiente (regime normal de operação para condições de rebaixamento gradual) e cálculo do fator de segurança, ambas situações através de uma análise parente. A análise parente, significa unir as simulações compiladas no GeoStudio entre o SEEP/W (regime normal de operação e rebaixamento gradual), juntamente com o SLOOP/W (simulações do fator de segurança dos taludes de montante e jusante).

A Figura 69, mostra a seção típica da barragem zonada, geometria da maior seção transversal e as regiões que compõe o barramento do reservatório.

Figura 69 – Seção geométrica da maior seção transversal do talude da barragem.



Fonte: GeoStudio 2020, adaptado pelo autor.

A Figura 69, mostra as regiões do barramento, nas quais o solo de montante e jusante, representa os materiais permeáveis utilizados nos espaldares e o solo do núcleo, a região central do maciço composta por materiais finos impermeáveis.

A análise de estabilidade do talude da barragem, procedeu-se através dos parâmetros físicos, coeficiente de permeabilidade (k), peso específico saturado (γ_{sat}) e ângulo de atrito e

coesão (Φ e c'). Os parâmetros físicos foram adicionados na análise SEEP/W e SLOOP/W (equilíbrio limite) nas regiões do núcleo e espaldares do talude da barragem.

Os resultados obtidos no Quadro 22, fornecida pelo GeoStudio (2020), apresenta as regiões da simulação do talude, modelo de ruptura e os parâmetros físicos utilizados para a simulação do comportamento hidráulico e da estabilidade de taludes da barragem. Os resultados compilados para obter-se o Fator de Segurança foram através dos parâmetros físicos emitidos dos ensaios de laboratório, onde o Υ Sat. obteve-se através dos ensaios procedidos pela NBR 7185 (ABNT, 2016), NBR 6508 (ABNT, 1984), NBR 6457 (ABNT, 2016) e transformações matemáticas utilizando-se equações de mecânica dos solos. Já os parâmetros físicos (c' e Φ), ambos foram obtidos através dos dados coletados do ensaio de cisalhamento direto, após confeccionar a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb e mediante referência bibliográfica de Cruz (1996). Por fim, o coeficiente de permeabilidade (k), obteve-se os parâmetros físicos através dos ensaios realizados no talude de montante e jusante do barramento, seguindo a metodologia proposta por Fernandes (2017).

Quadro 22 – Materiais utilizados para simulação do comportamento hidráulico e Fator de Segurança.

Cor	Nome	Modelo de ruptura	Υ Sat. (KN/m ³)	C' (KPa)	Phi' (°)	K (m/s)
	solo de montante	Mohr-Coulomb	17,17	0,4	41,85	$4,7 \times 10^{-04}$
	solo de jusante	Mohr-Coulomb	17,17	0,4	41,85	3×10^{-04}
	solo do núcleo	Mohr-Coulomb	17,78	19,18	28,41	$1,274 \times 10^{-07}$

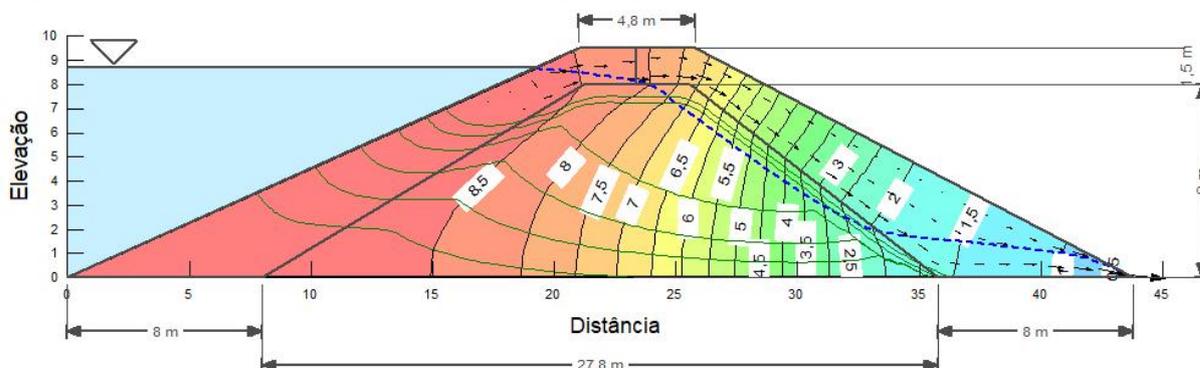
Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

Como a condição inicial de poropressão é obtida das análises de fluxo para a condição do regime permanente de operação da barragem. O estudo realizado através da plataforma SEEP/W, mostra o traçado da rede de fluxo e a linha de infiltração a partir da cota 8,70 m, sob condição do reservatório em sua capacidade máxima de nível d'água. Vale salientar que o R_u (parâmetro de poropressão) que indica um talude totalmente saturado, definido como a relação entre poropressão e tensão geostática efetiva. O parâmetro “ R_u ”, não foi utilizado nas simulações do comportamento hidráulico, ou seja, uma condição aplicada para o regime final de construção, adotando-se o valor de 0,15, conforme orienta Cruz (1996), somente em um *software* com licença plena.

A Figura 70, mostra os resultados obtidos, no qual representa o conjunto (caminhos de fluxo, isolinhas, linha de infiltração, vetores e carga total de água entre 8,5-0,5 m), com a

geometria da maior seção transversal do barramento, núcleo argiloso e espaldares de montante e jusante.

Figura 70 – Traçado da rede de fluxo em regime permanente de operação.



Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

Percebe-se na Figura 70, que o material utilizado nos espaldares, com granulometria uniforme, condicionou o fluxo da isolinha principal (azul), após o reservatório cheio (regime permanente de operação) em direção ao pé do talude de montante.

O material pedregulhoso utilizado nos espaldares, favoreceu o não surgimento de áreas úmidas acima deste ponto, devido ao material ser altamente permeável ao fluxo d'água. A condição da linha de infiltração (azul) na chegada do pé do maciço no lado da jusante, demonstra o seu fluxo através do maciço da barragem, devido a diferença do nível d'água entre o talude de montante e jusante que se movimenta pela ação da gravidade.

Esta diferença de nível e ação da gravidade, promove a percolação d'água no interior do maciço, pelo qual a água move-se quando ocorre a perda de carga das isolinhas, sendo o sentido desse movimento do ponto de maior carga hidráulica (8,5 m), para o ponto de menor carga hidráulica (0,5 m). A linha de fluxo é condicionada ao pé do maciço no lado da jusante, após a saturação das zonas internas mediante a barragem entrar e regime permanente de operação. Este comportamento hidráulico, demonstra que o núcleo argiloso, favorece a estabilidade do talude, conforme mostra um pico acentuado das isolinhas saindo do reservatório devido a impermeabilidade do solo. Já o fluxo associado ao comportamento dos vetores pela região dos espaldares, o material de pedregulho demonstra um comportamento similar de um filtro horizontal, direcionando o fluxo diretamente ao pé do maciço da barragem em decorrência da alta permeabilidade que favorece a rápida drenagem da água, ou seja, além de melhorar estabilidade da barragem.

Para o cálculo do fator de segurança dos taludes da barragem, utilizou-se o método de Bishop e Morgenstern-Price. Conforme Dias (2021) apud Morgenstern e Price (1965), perante

um parecer descritivo, o método Morgenstern-Price satisfaz as condições do equilíbrio limite, permitindo superfícies de rupturas em formatos não circular e circular. De acordo com Dias (2021), a barragem zonada deste estudo apresenta condições, em que a superfície não circular caracteriza a ruptura com núcleo coesivo e material granular nos espaldares. Já o método de Bishop, Cruz (1996), orienta que, seja considerado uma superfície de ruptura circular, podendo ser utilizado em análise comparativa com métodos mais rigorosos, a exemplo de Morgenstern Price.

O fator de segurança obtido pelo método de Bishop e Morgenstern-Price no lado da montante e jusante, é obtido pela análise parente (SEEP/W-SLOOP/W), tanto para o regime normal de operação, quanto para o regime do rebaixamento rápido e gradual.

Segundo Honório (2022), para garantir a estabilidade de taludes, deve-se empregar carregamentos sísmicos, mesmo em regiões assísmicas por conta da possibilidade de ocorrência de sismos induzidos pelo enchimento do reservatório. Para ambos os métodos, adicionou-se uma carga sísmica aumentando as forças horizontais em 10% (0,1) e verticais em 5% (0,05), permitiu através destes coeficientes de majoração verificar o Fator de Segurança com maior confiabilidade quanto a estabilidade da barragem sob sismos induzidos.

Para ambas as rupturas (circular e planar) a metodologia utilizada para determinar o círculo crítico de ruptura no talude montante e jusante, envolvendo a superfície de pesquisa, as condições de contorno foram definidas por uma malha de 12x12 centros e um incremento de 25 raios ao longo do aterro.

Os resultados do fator de segurança sob a condição de regime normal de operação do reservatório nos taludes de montante e jusante, são apresentados no Quadro 23, através do método de Bishop e Morgenstern-Price com carregamentos sísmicos e normal (forças horizontais, forças verticais e equilíbrio de momentos).

Quadro 23 – Resultados obtidos dos fatores de segurança no talude de montante e jusante em regime normal de operação do reservatório.

Método da análise	Região do talude			
	Carga sísmica		Sem carga sísmica	
Bishop	montante	jusante	montante	jusante
		1,38	1,37	2,17
Morgenstern-Price	1,39	1,38	2,17	1,69

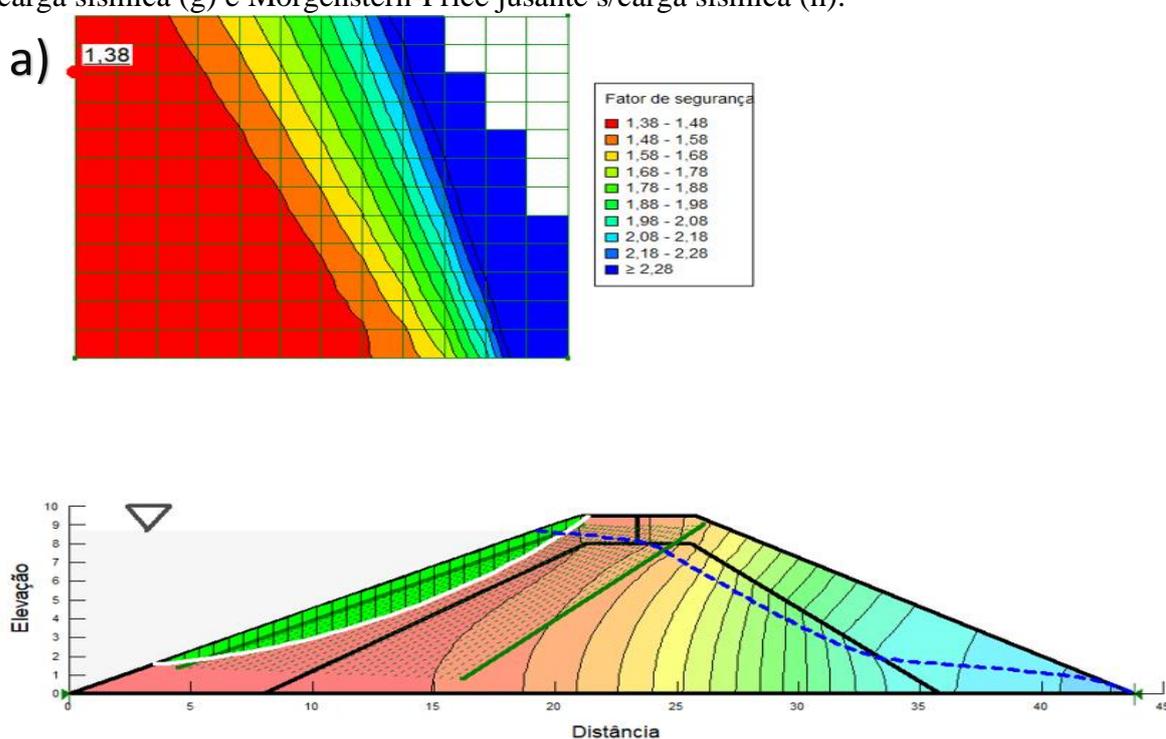
Fonte: Elaboração própria.

O FS é maior no lado da montante, conforme o observado no Quadro 23, para ambos os métodos, admitindo-se que o adensamento do solo tenha ocorrido e a percolação da água tenha

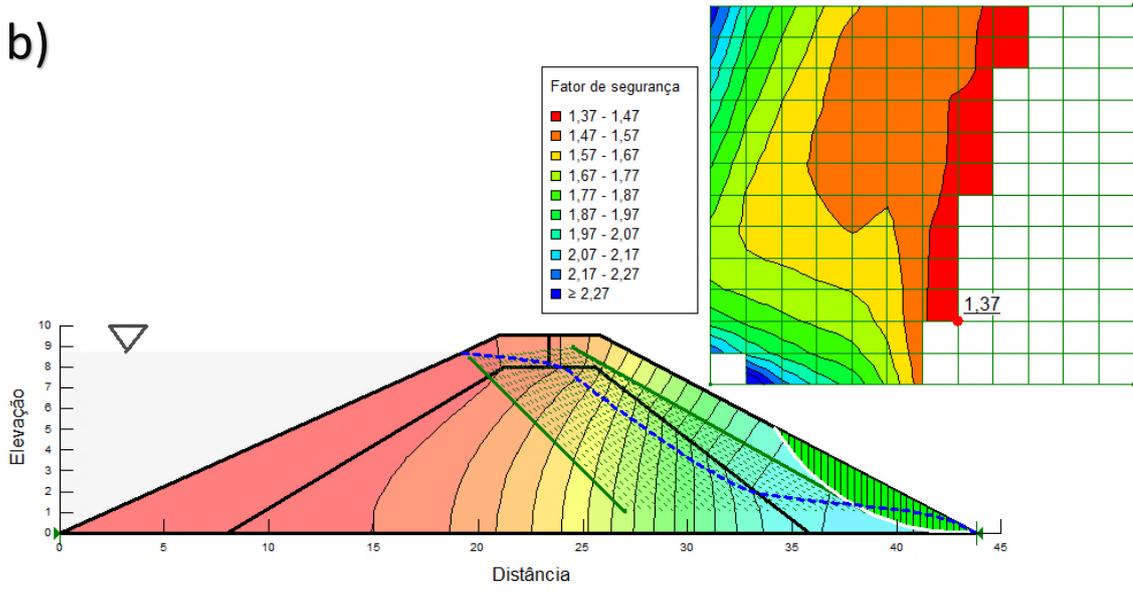
se estabilizado, após o reservatório entrar em nível máximo de operação. A força-peso da água, sobrepõe uma carga horizontal e vertical, interferindo no equilíbrio de momentos e consequentemente interferindo na estabilidade do talude, uma condição que resulta no aumento do FS.

A seguir, a Figura 71 apresenta as simulações realizadas nos taludes da barragem com o *software* GeoStudio (2020).

Figura 71 – Bishop montante c/carga sísmica (a), Bishop jusante c/carga sísmica (b), Bishop montante s/carga sísmica (c), Bishop jusante s/carga sísmica (d), Morgenstern-Price montante c/carga sísmica (e), Morgenstern-Price jusante c/carga sísmica (f), Morgenstern-Price montante s/carga sísmica (g) e Morgenstern-Price jusante s/carga sísmica (h).

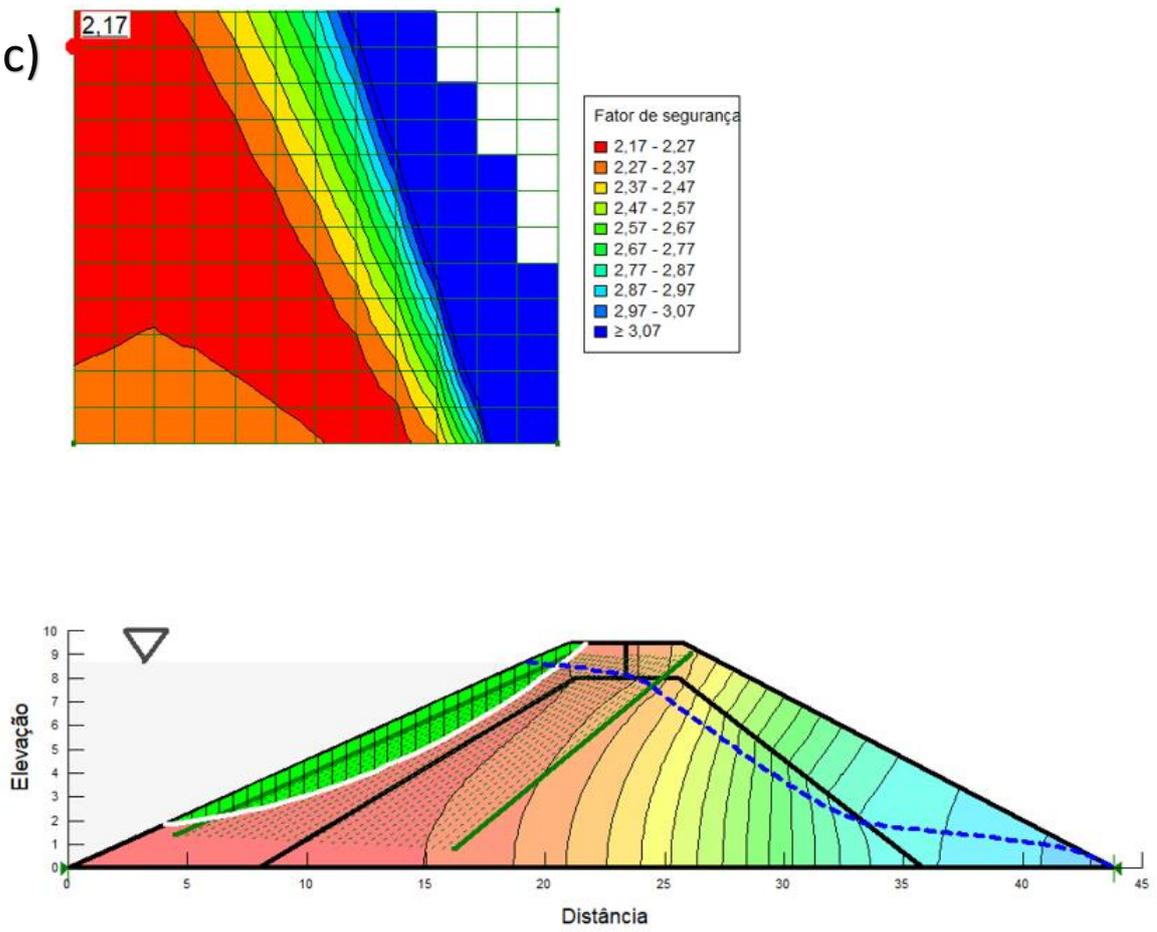


b)

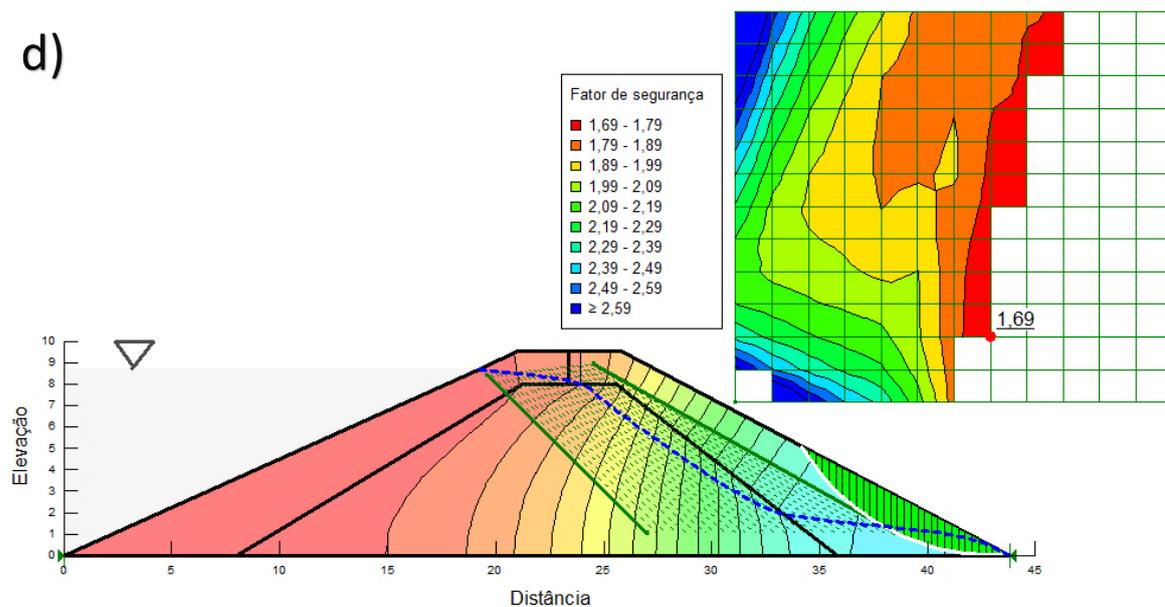


Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

c)

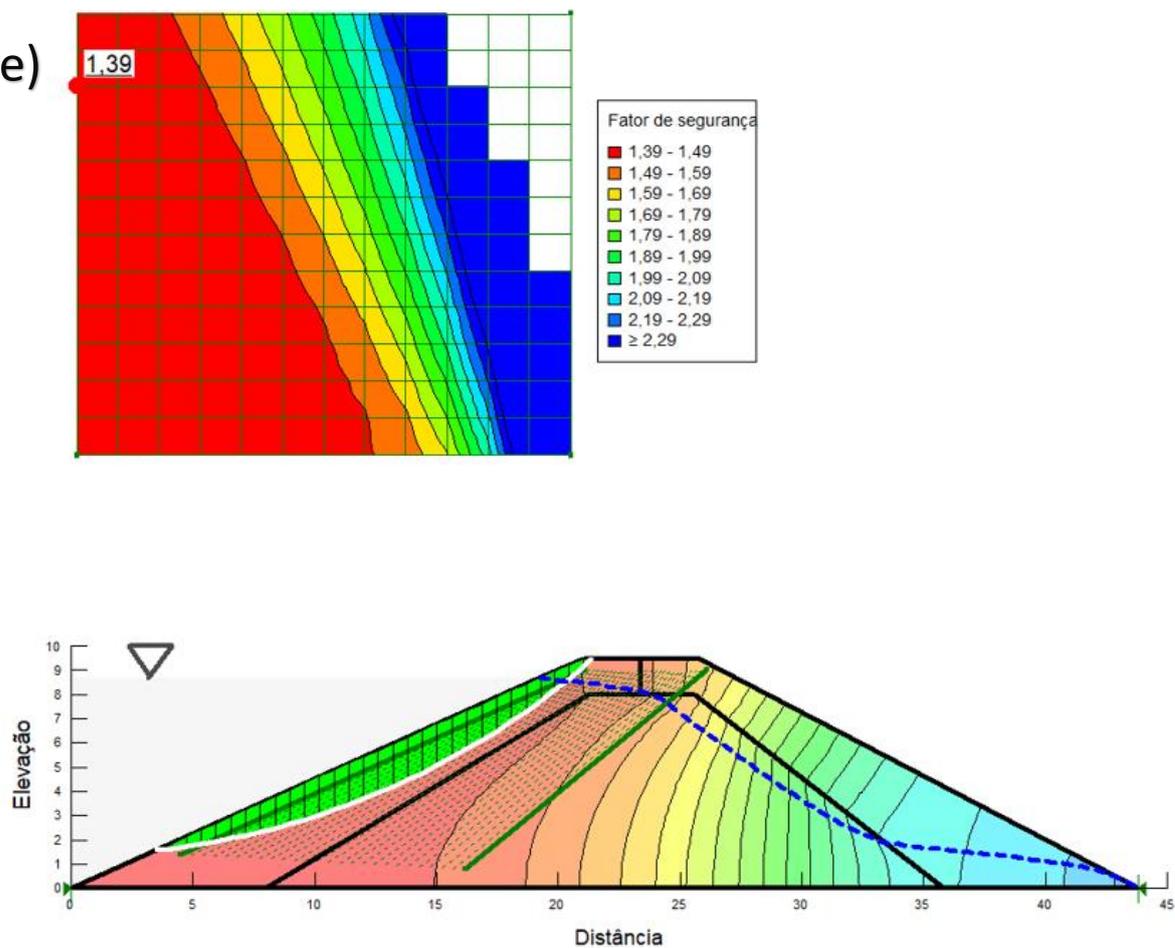


d)

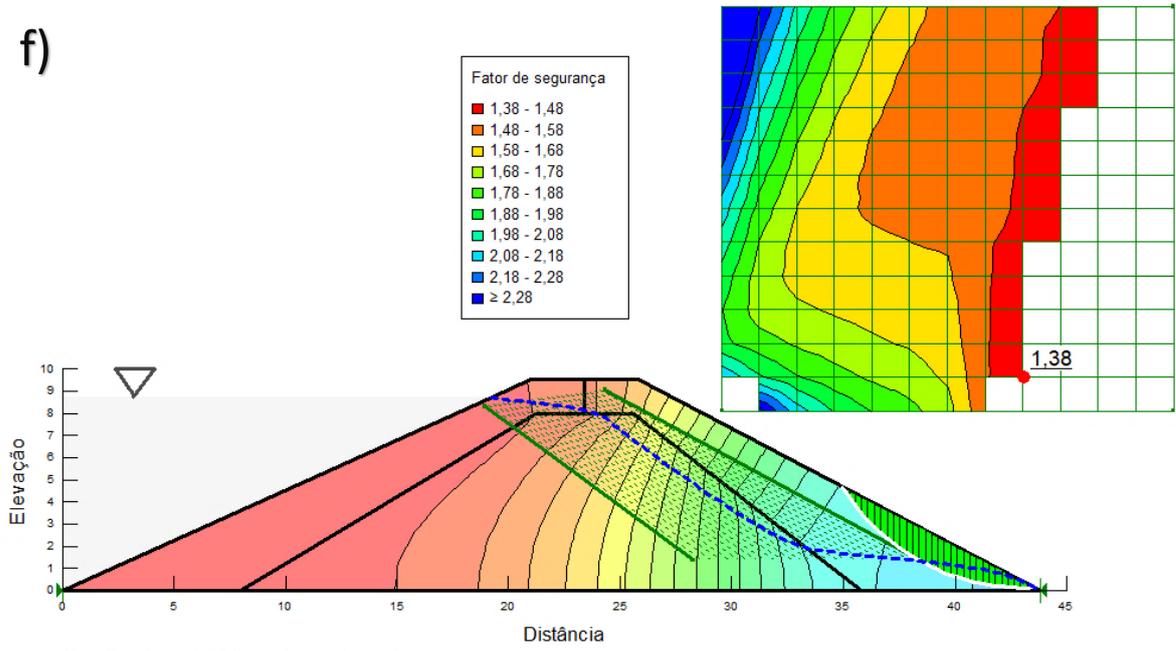


Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

e)

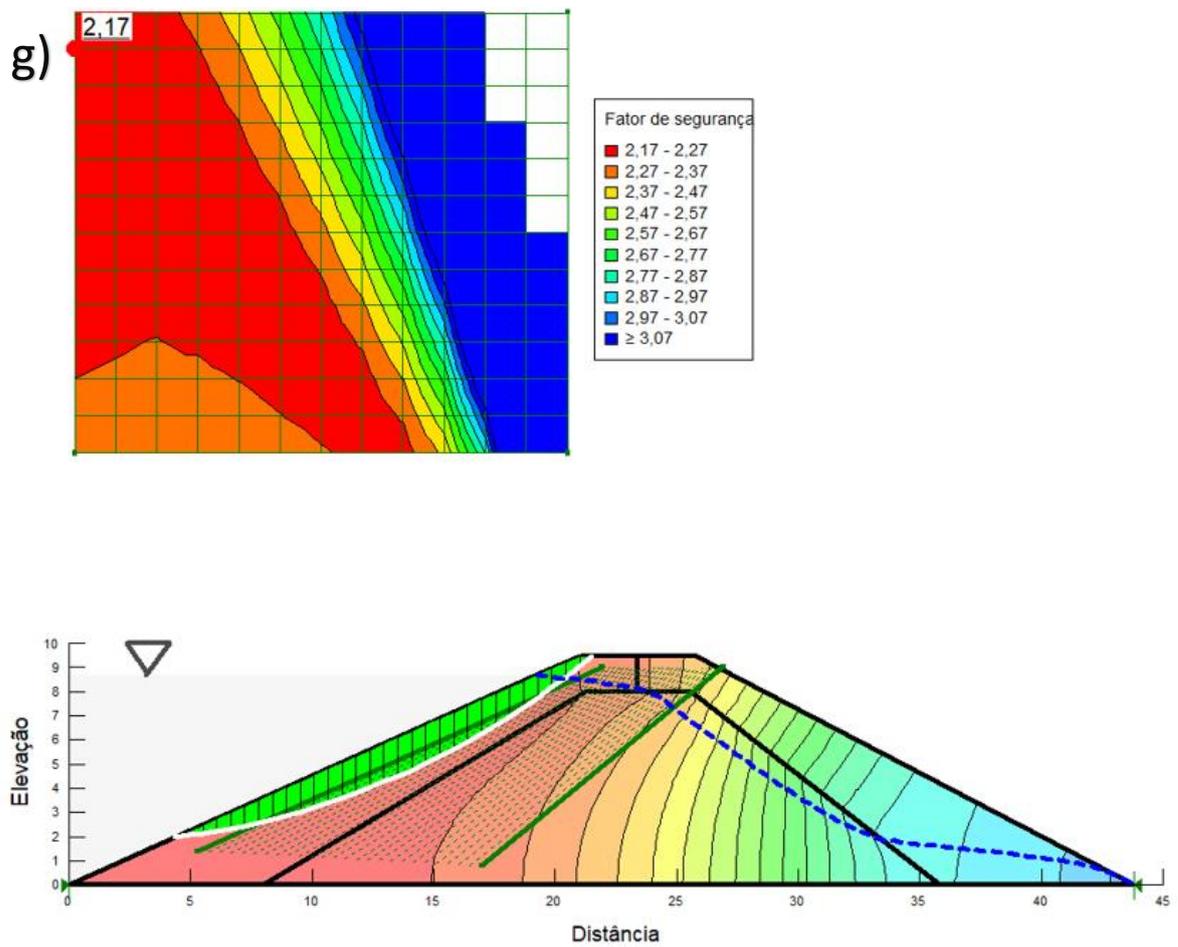


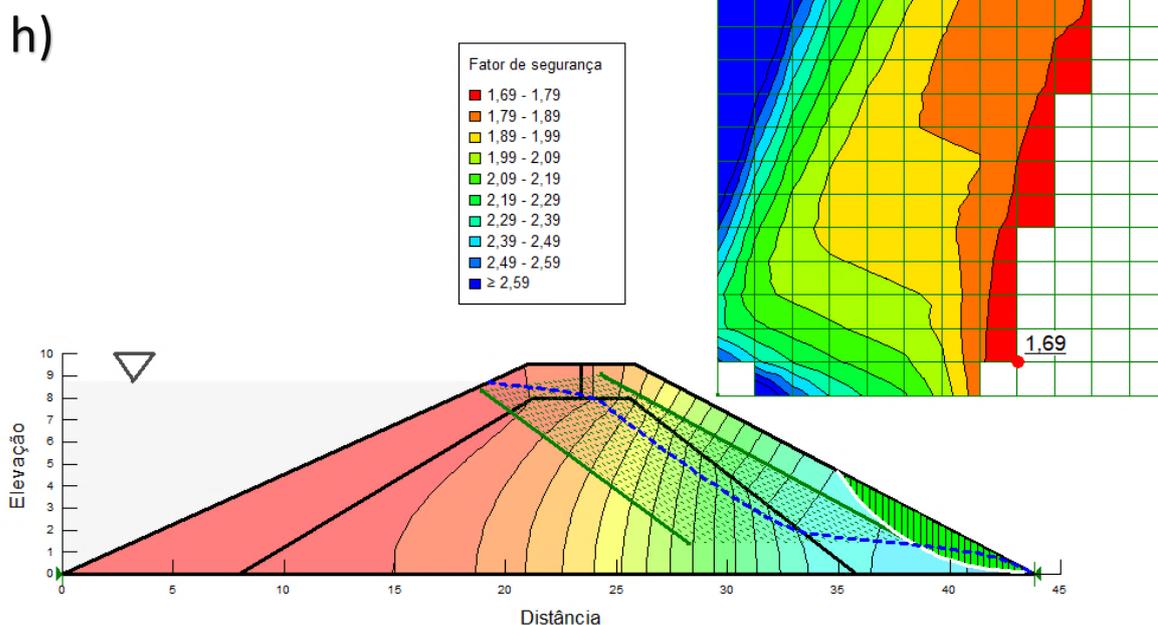
f)



Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

g)





Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

As análises realizadas através da Figura 71, com o método de Bishop, obteve-se o fator de segurança de 1,38 no talude de montante e 1,37 no talude de jusante e Morgenstern-Price 1,39 e 1,38, montante e jusante, com variação aproximada de 1% maior que Bishop, sob a condição de carga sísmica. Já para a simulação sem acréscimo de carga sísmica, Bishop e Morgenstern-Price, obtiveram-se os mesmos resultados, perante a simulação das análises de ruptura no talude de montante e jusante com 2,17 e 1,69.

4.7.2 Rebaixamento rápido e gradual do reservatório

A simulação do comportamento hidráulico a partir do regime normal de operação para o rebaixamento rápido e gradual do reservatório até o nível morto, foi simulada para uma eventual situação de retirada da água do reservatório, durante o período de irrigação.

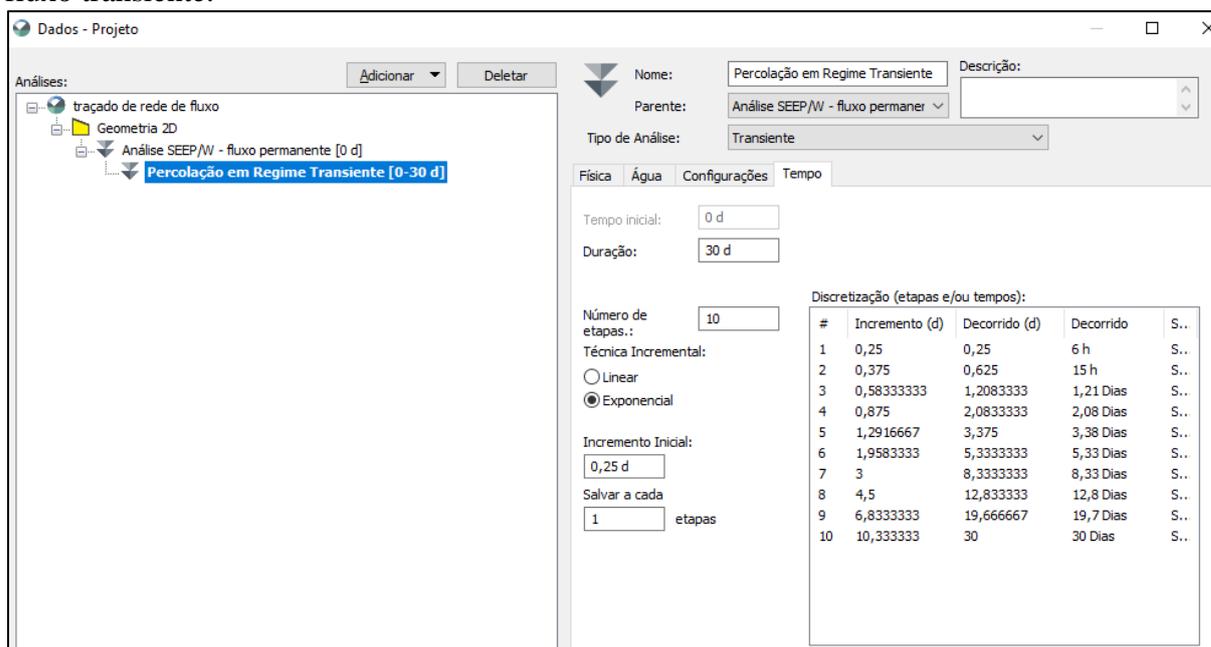
A simulação do fluxo transiente do reservatório, atendeu as configurações do pacote de dados SEEE/W do GeoStudio (2020), licença plena, simulação de projeto realizada em uma análise parente.

O rebaixamento gradual para 30 dias, foi configurado em 10 etapas, com incremento inicial de 0,25 dias, onde em cada incremento para o crescimento exponencial, o resultado dos incrementos das etapas de 1 a 10, foi multiplicado separadamente por 1,50, resultando um valor para cada etapa. Para fechar o valor decorrido dos dias (d) durante o rebaixamento, o *software* realizou uma soma acumulada da resolução dos incrementos (d), resultando na sequência de

dias decorridos entre 0,25 e 30 dias, simulando os cálculos para cada dia do incremento (d). O GeoStudio arredondou os valores para os decorridos dias, para simular o fluxo transiente do rebaixamento rápido do reservatório.

A Figura 72, mostra a caixa de configuração utilizada para simular o comportamento hidráulico durante o rebaixamento gradual do reservatório, atendendo uma formatação para um período de 30 dias, até chegar na cota 1 m d'água (nível morto):

Figura 72 – Configuração do projeto para análise do comportamento hidráulico da análise do fluxo transiente.

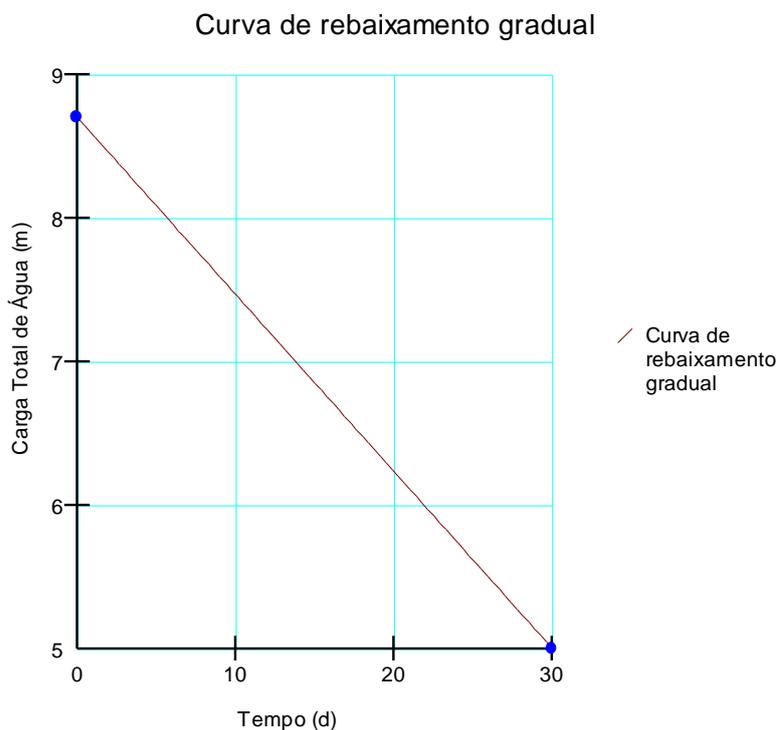


Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

Após simular o rebaixamento gradual do reservatório, as condições de contorno à montante em análise de fluxo transiente são do tipo carga total de água (m), porém não constante e sim em função da curva de rebaixamento inserida no software. Esta curva segue a condição de que o reservatório está na cota 8,70 m no início da análise até o final da análise para o tempo de 30 dias na cota 1 m. A duração do rebaixamento foi estimada sob a condição de água armazenada para irrigar 42 hectares, prevendo-se que o esvaziamento ocorrerá no tempo estimado de 30 dias.

Estimar um tempo específico, dependeria do volume do reservatório, sucção de bombeamento em m³ diários, reposição do volume drenado e capacidade de drenagem do vertedouro entre outros fatores climáticos. A curva de rebaixamento gradual é apresentada na Figura 73.

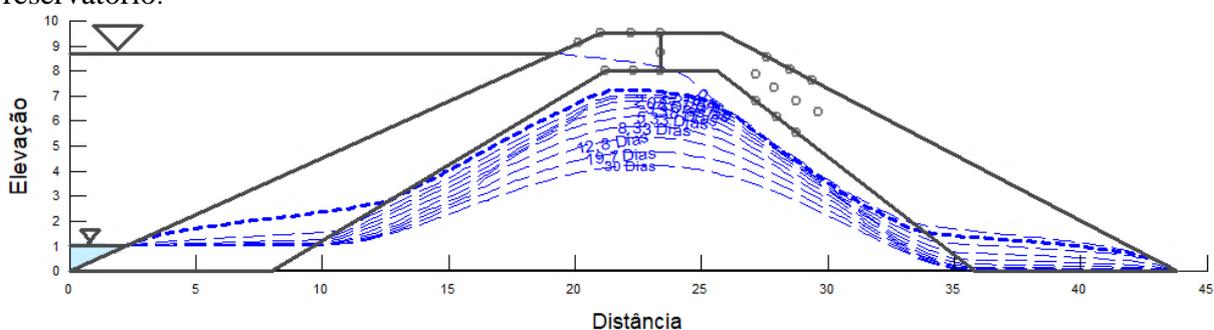
Figura 73 – Curva de rebaixamento gradual do reservatório.



Fonte: GeoStudio (2020).

O comportamento hidráulico das linhas de fluxo durante o período do rebaixamento gradual do reservatório, foi computado no GeoStudio para melhor entendimento deste item, onde as linhas de fluxo encontram-se alocadas no interior do maciço da barragem, entre 0-30 dias. A Figura 74, mostra a discretização temporal específica do fluxo transiente durante o esvaziamento da barragem até o (N.M) na cota 1 m, a partir do fluxo permanente em regime normal de operação na cota 8,70 m:

Figura 74 – Discretização temporal do comportamento hidráulico durante o rebaixamento do reservatório.



Fonte: GeoStudio (2020).

A Figura 74 da discretização temporal do comportamento hidráulico, mostra uma mudança acentuada entre a linha de fluxo em regime normal de operação e a linha de fluxo após o rebaixamento para 0,25 dias, situação pela qual irá representar o rebaixamento rápido e crítico do reservatório. Os demais comportamentos das linhas de fluxo, caracterizam um comportamento de rebaixamento gradual do reservatório, ou seja, uma situação a favorecer a estabilidade da barragem.

A metodologia utilizada e os métodos para avaliar a estabilidade do talude durante o rebaixamento rápido e gradual do reservatório, foram os mesmos para o regime normal de operação. Priorizou-se verificar a estabilidade do talude apenas no lado da montante, uma vez que o rebaixamento rápido e gradual do reservatório, é condicionado pela dissipação das poropressões, devido mudanças da carga hidráulica durante os dias do rebaixamento do nível do reservatório.

Os resultados dos fatores de segurança sob a condição de rebaixamento rápido e gradual de operação do reservatório entre 0-30 dias, são mostrados através do Gráfico 7 e Quadro 25, sob a condição do acréscimo de carga sísmica e sem abalo sísmico do talude de montante. A Figura 82 e Figura 83, apresentam as simulações realizadas para obter-se o fator de segurança em condições de rebaixamento crítico em 0,25 dias e rebaixamento gradual entre 0,625-30 dias:

Gráfico 7 – Fator de segurança obtido pelo método de Bishop e Morgenstern-Price durante o rebaixamento do reservatório entre 0-30 dias.



Fonte: Elaboração própria.

O Gráfico 7, mostra o resultado dos fatores de segurança obtidos no talude de montante da barragem, durante o rebaixamento rápido e gradual entre 0,25 dias e 0,625-30 dias. Observa-se que em 0,25 dias de rebaixamento crítico do reservatório, Bishop e Morgenstern-Price sob a condição de abalo sísmico simularam valores de fator de segurança semelhante com 1,11 e 1,17. O mesmo ocorreu para a simulação sem acréscimo de carga sísmica, obtendo-se 1,38 e 1,43. Observa-se que a partir de 0,625 dias de rebaixamento até 3,3 dias, em ambas as simulações os fatores de segurança aumentam gradativamente, conforme o observado no Gráfico 7. A partir de 5,3 dias de rebaixo do reservatório até 30 dias, quando atingiu o (nível morto na cota 1 m de nível d'água), o método de Bishop e Morgenstern-Price resultaram em fatores de segurança de 1,59 com acréscimo de abalo sísmico. Já sob as condições normais de carregamento, um fator de segurança de 2,03. Os maiores fatores de segurança obtidos foram na condição de regime normal de operação na cota 8,70 m, sem abalo sísmico com 2,19 sob condições normais de forças horizontais e verticais do maciço da barragem.

Conforme os resultados analisados no Gráfico 7, em ambas as simulações os fatores de segurança obtido durante o rebaixamento crítico e gradual do reservatório, estão acima do fator de segurança mínimo permitido. Conclui-se que no caso da necessidade de um esvaziamento rápido do reservatório, o mesmo pode ser condicionado para um número menor de dias, sem comprometer a estabilidade do barramento.

Quadro 25 – Resultado obtidos dos fatores de segurança obtidos durante o rebaixamento rápido e gradual do reservatório.

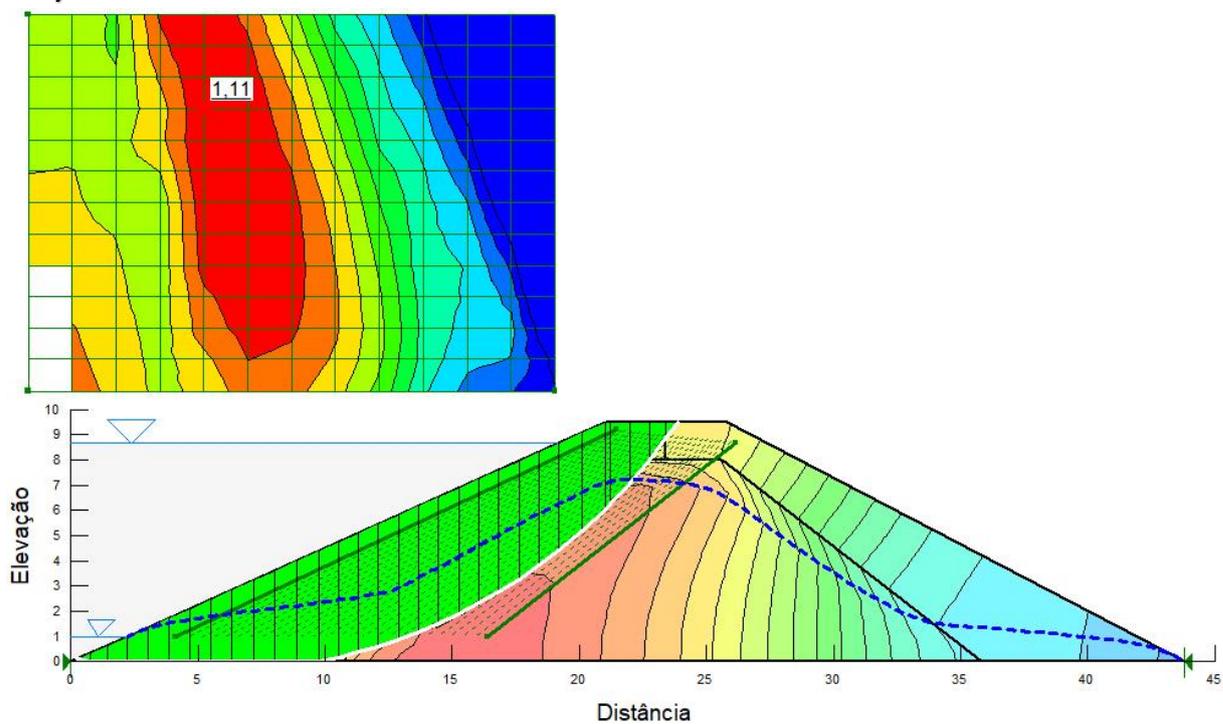
Bishop	Morgentern-Price
com carga sísmica	
0,25 dias - 1,11	0,25 dias - 1,17
30 dias - 1,58	30 dias - 1,58
sem carga sísmica	
0,25 dias - 1,38	0,25 dias - 1,43
30 dias - 2,03	31 dias - 2,03

Fonte: Elaboração própria.

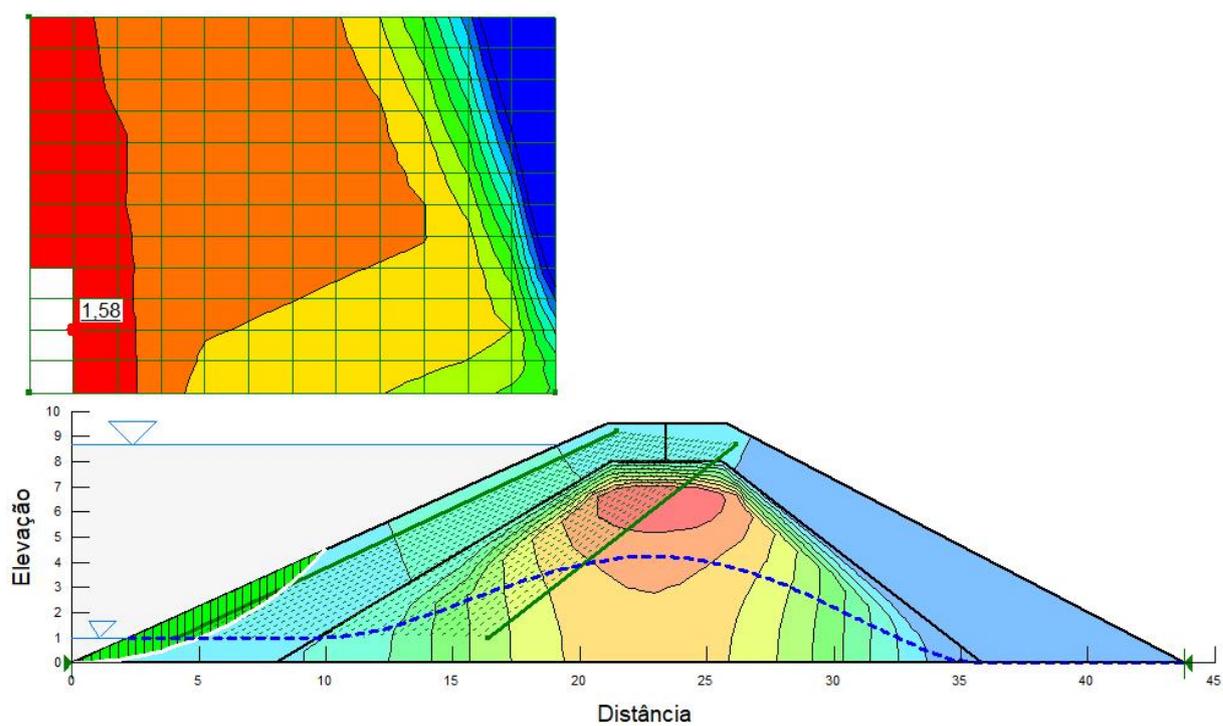
A seguir, a Figura 75 e 76, apresenta as simulações realizadas nos taludes da barragem com o *software* GeoStudio (2020), nas condições de rebaixamento rápido e gradual do reservatório, através do método de Bishop e Morgenstern-Price.

Figura 75 – Bishop 0,25 dias com abalo sísmico (a), Bishop com abalo sísmico 30 dias (b), Morgenstern-Price com abalo sísmico 0,25 dias (c) e Morgenstern-Price com abalo sísmico 30 dias (d).

a)

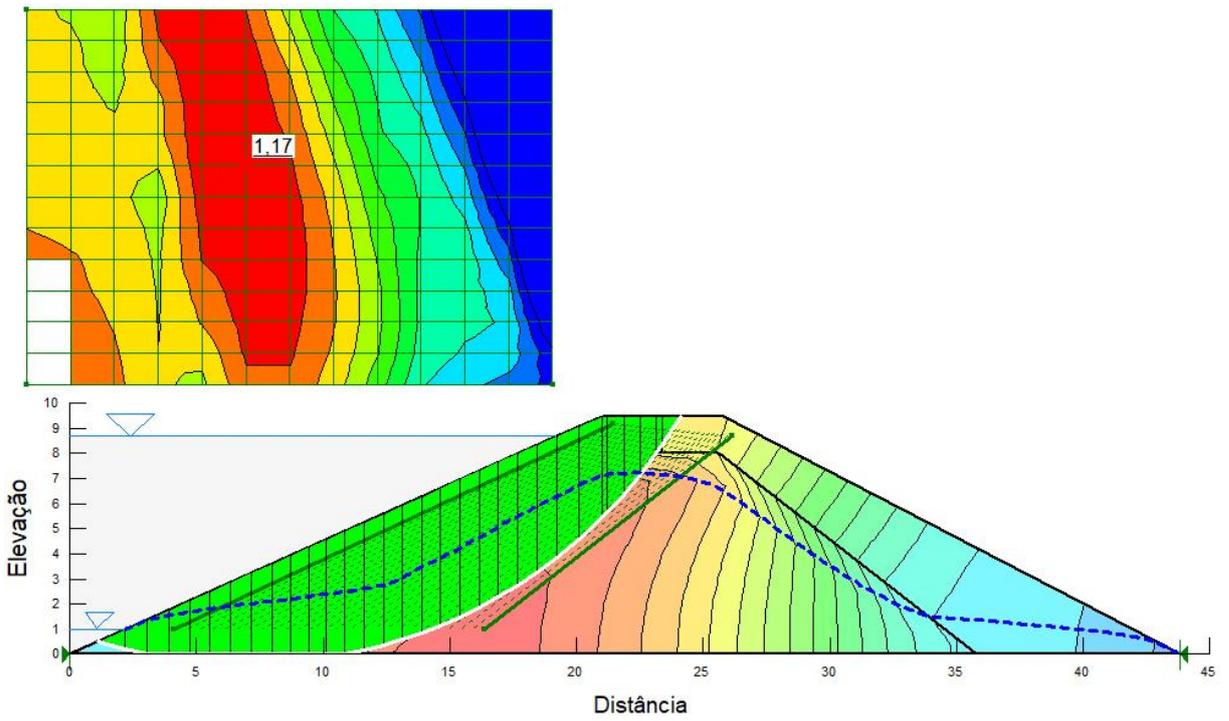


b)

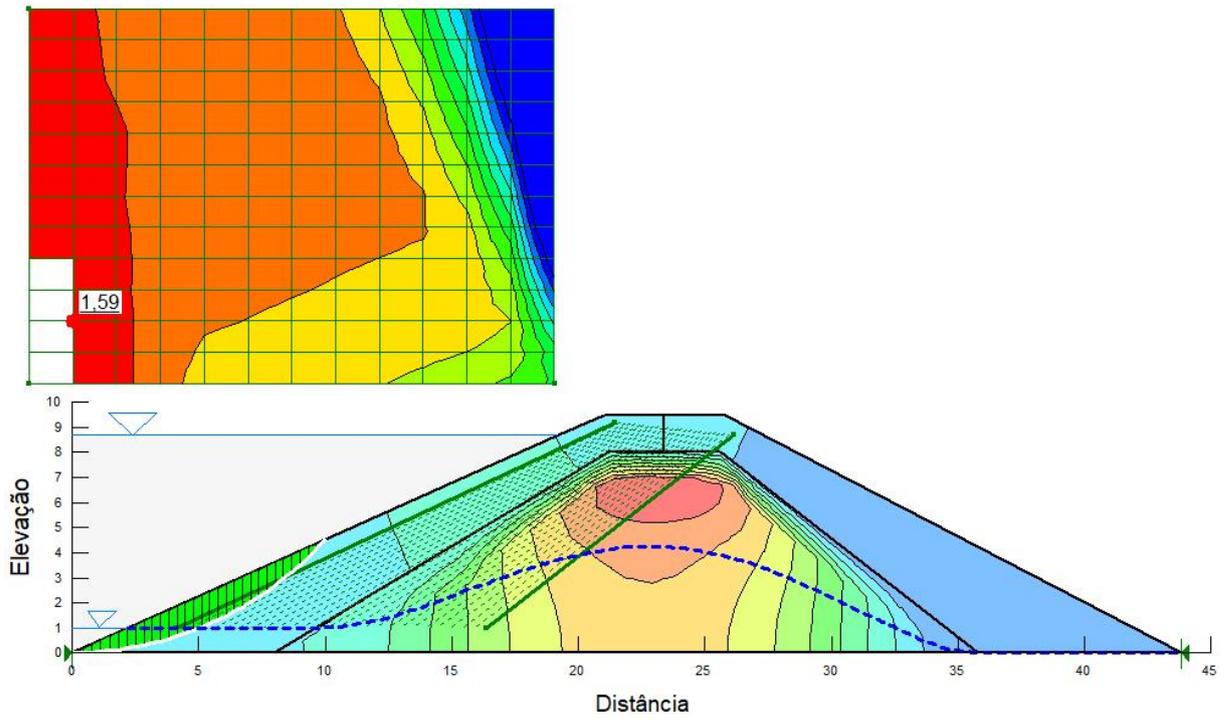


Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

c)

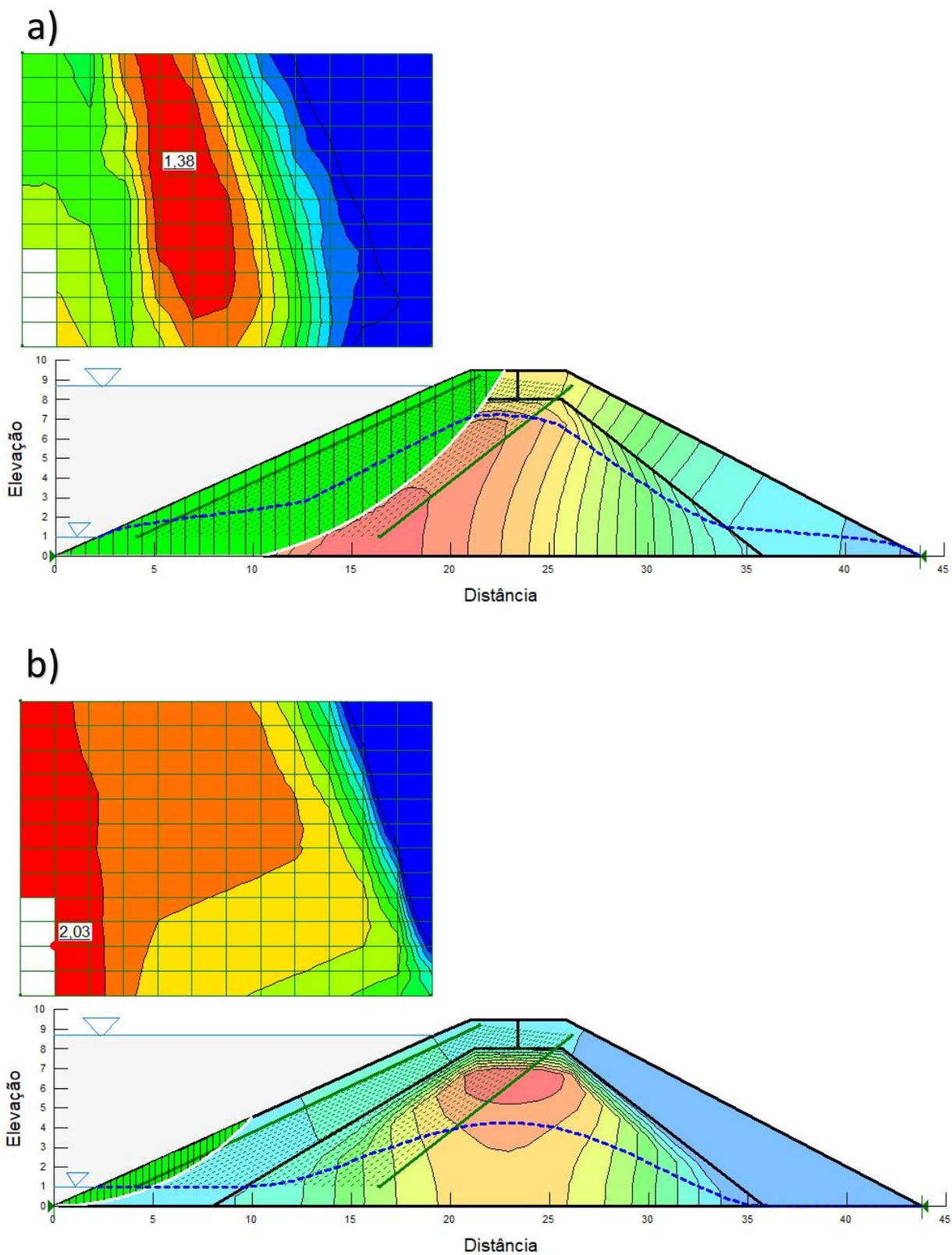


d)



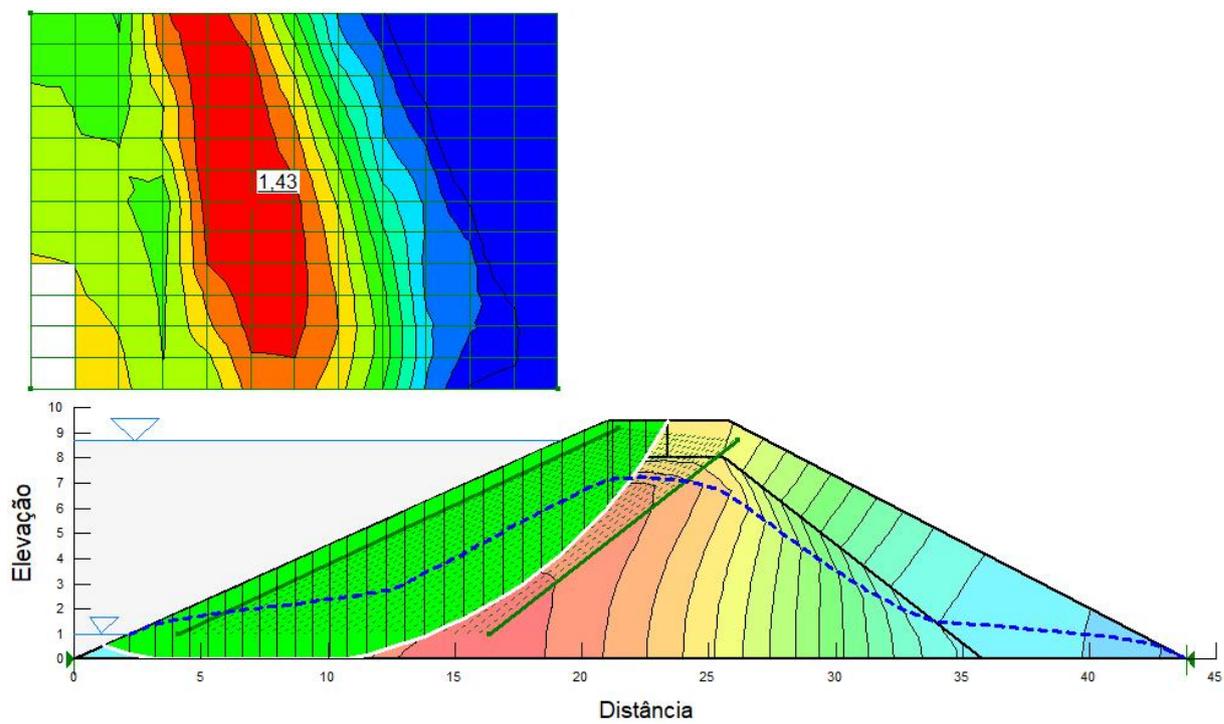
Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

Figura 76 – Bishop 0,25 dias sem abalo sísmico (a), Bishop sem abalo sísmico 30 dias (b), Morgenstern-Price sem abalo sísmico 0,25 dias (c) e Morgenstern-Price sem abalo sísmico 30 dias (d).

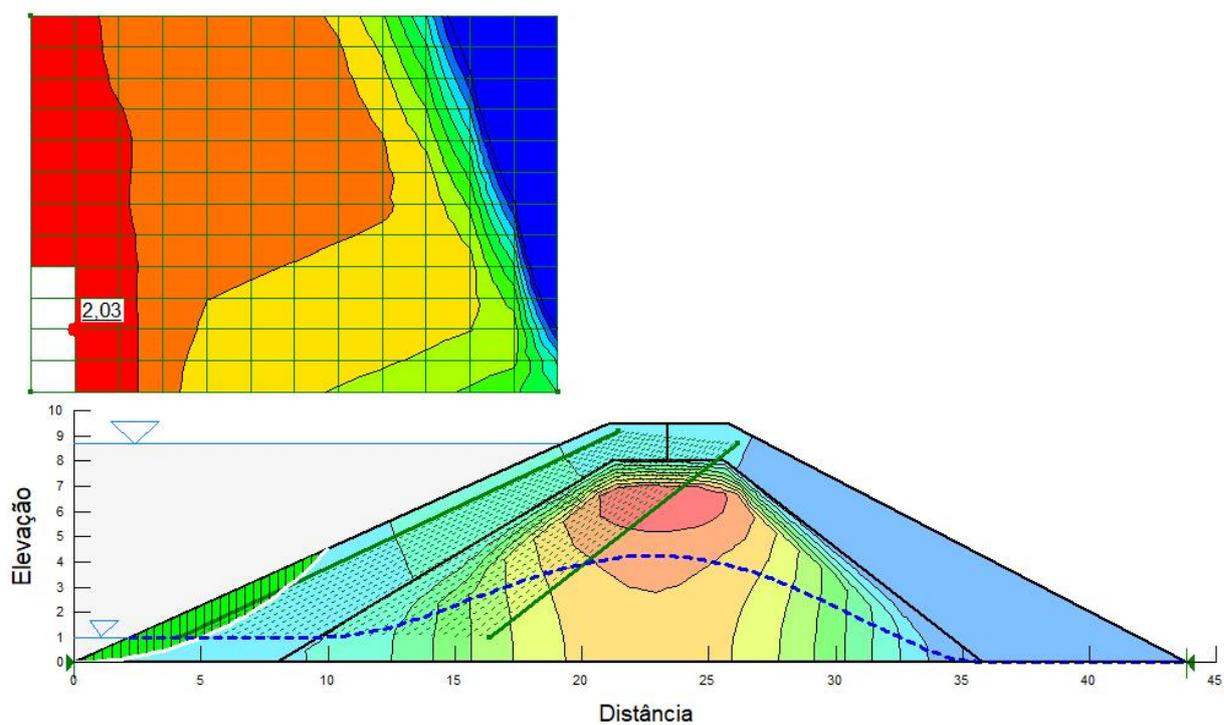


Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

c)



d)



Fonte: GeoStudio (2020), adaptado pelo autor.

Perante análise da Figura 74 da discretização temporal do comportamento hidráulico, observasse-se uma queda brusca da linha de fluxo em regime normal de operação até o nível morto na cota 1 m de nível d'água em 0,25 dias de rebaixamento.

É observado que nos espaldares durante o rebaixamento do reservatório entre o nível normal e 0,25 dias, a água destas regiões é drenada rapidamente devido à alta permeabilidade dos materiais de pedregulho, situação pela qual a linha de fluxo na montante, permanece confinada através do núcleo em direção a cota 1 m (N.M) e pé da jusante do talude. Conforme observado na Figura 74, a partir de 0,625 de rebaixamento, as linhas de fluxo mostram um comportamento decrescente gradativo, à medida que a estanqueidade da água do interior do maciço, começa a se estabilizar devido ao peso da água no lado da montante na cota 1 m. Conforme o comportamento hidráulico decresce gradativamente durante o tempo 0,625-30 dias, a queda da poropressão acompanhar o fluxo de rebaixamento da barragem, proporcionando o aumento da estabilidade da barragem ocorrido pela força-peso da água do reservatório e peso do núcleo sob a condição de saturação através da água no seu interior.

Perante observado na Figura 74 e no Gráfico 7, o fator de segurança decresce bruscamente em 0,25 dias de rebaixamento, devido a poropressão elevada contida no núcleo, não ter tempo suficiente para drenar a água do material impermeável (núcleo), fazendo com que diminua o fator de segurança pelo método de Bishop e Morgenstern-Price. O método de Bishop com acréscimo de carga sísmica em regime normal de operação com 1,40, diminui para 1,11 em 0,25 dias e Morgenstern-Price com abalo sísmico em condição normal do nível do reservatório de 1,40 para 1,17 em 0,25 dias. Já para o rebaixamento gradual do reservatório em 30 dias, obteve-se pelo método de Bishop um fator de segurança 1,58 e Morgenstern-Price 1,59.

Perante análise do rebaixamento rápido entre 0,25-30 dias, sob as mesmas condições do comportamento hidráulico com abalo sísmico, conforme citado anteriormente, as simulações sem acréscimo de carga sísmica, responderam da mesma forma. Através dos dados compilados no Gráfico 7, observa-se que o método de Bishop sem acréscimo de carga sísmica em regime normal de operação com 2,19 diminui para 1,38 em 0,25 dias e Morgenstern-Price sem abalo sísmico em condição normal do nível do reservatório de 2,19 para 1,43 em 0,25 dias. Para o tempo de rebaixamento gradual em 30 dias, sem acréscimo de carga sísmica, para ambos os métodos se obteve um fator de segurança de 2,03.

O Quadro 26, apresenta para todas as simulações realizada, os fatores de segurança obtidos neste trabalho, em regime normal de operação da barragem, rebaixamento rápido e gradual e os valores mínimos dos fatores de segurança recomendados por Honório (2022) APUD ABNT (2017), para garantir a estabilidade do reservatório.

Quadro 26 – Resumo dos fatores de segurança.

A	Regime normal de operação (8,70 m)	FS admissível com carga sísmica	FS admissível sem carga sísmica	
	Talude de montante	1,1	1,5	
	Talude de jusante	1,1	1,3	
B	Esvaziamento rápido e gradual de operação	FS admissível com carga sísmica	FS admissível sem carga sísmica	
	Talude de montante	1,1	1,3	
Bishop			Morgenstern-Price	
A	Menor FS com carga sísmica	Menor FS sem carga sísmica	Menor FS com carga sísmica	Menor FS sem carga sísmica
	Montante - 1,38	2,17	1,39	2,17
	Jusante - 1,37	1,69	1,38	1,69
B	Menor FS com carga sísmica	Menor FS sem carga sísmica	Menor FS com carga sísmica	Menor FS sem carga sísmica
	Montante - 1,11	1,38	1,17	1,43

Fonte: Elaboração própria.

O Quadro 26, registra o resultado dos fatores de segurança, obtidos durante as simulações dos taludes da barragem (montante e jusante), através dos métodos de Bishop e Morgenstern-Price. É observado que os fatores de segurança no talude de montante e jusante em regime normal de operação do reservatório, sem abalo sísmico, estão acima do admissível, 1,5 e 1,3. O mesmo é constatado sob a condição de abalo sísmico, no talude de montante e jusante, com valores acima do permitido de 1,1. Por fim, os resultados compilados na condição do esvaziamento rápido e gradual do reservatório, o fator de segurança no talude de montante sob acréscimo de tensões horizontais e verticais, estão acima do mínimo permitido de 1,1. O mesmo condicionou-se para a situação sem abalo sísmico, obtendo-se um valor acima do fator de segurança admissível, de 1,3.

Conclui-se que apesar de algumas irregularidades observadas durante o processo construtivo do barramento, a estabilidade dos taludes de montante e jusante, não comprometem a segurança da barragem, conforme análise comparativa entre os fatores de segurança mínimos admissíveis e os resultados obtidos.

5 Conclusões

Quanto ao processo construtivo da barragem, observou-se irregularidades quanto a forma de distribuição e altura das camadas e o método utilizado no processo de compactação com o conjunto scrap madal-trator. Perante as incertezas que podem ocorrer nesta etapa do processo construtivo, constatou-se que algumas surgências em áreas úmidas e excesso de infiltração, tais problemas constatados durante vistoria no local podem ter ocorrido, devido a não uniformidade do processo de compactação. Conforme a bibliografia consultada, ensaios prévios de compactação, deveriam ser realizados em laboratório para garantir a aderência dos materiais utilizados na construção do maciço, favorecendo quanto a eficácia dos resultados obtidos no comportamento hidráulico e mecânico.

Durante as análises realizadas através dos ensaios geotécnicos aplicados aos materiais utilizados na construção das regiões dos espaldares de montante, jusante e núcleo, estiveram dentro dos requisitos estabelecidos pelos Mattos, Silva e Pruski (2000); Costa (2012) e Cruz (1996), onde os materiais a serem utilizados na região do núcleo, devem possuir menos de 50% de finos retido na peneira 200 e os materiais de pedregulho, devem ser utilizados nas regiões dos espaldares de montante e jusante. Constatou-se que as amostras coletadas em 1,5, 5, e 6 m da base (região do núcleo), apresentarem uma granulometria condizente com a dos autores (% areia, % pedregulho, % finos), obtendo-se valores de 27,6%, 21,8% e 25,3% de areia e os materiais utilizados nos espaldares, com pedregulho bem graduado. As amostras da região do núcleo, constataram percentuais de 5,6%, 53,6% e 34,3% de pedregulho, porém, é observado na diferença destes percentuais uma predominância de solos finos, percebendo-se que os materiais utilizados no núcleo, atenderam a exigências mínimas dos materiais utilizados nesta região do maciço da barragem.

A classificação dos materiais, através da metodologia SUCS, concluiu-se que a predominância destes materiais entre a cota 1,5 e 6 m da base (núcleo), sendo silte elástico arenoso, pedregulho siltoso com areia e silte elástico pedregulhoso, responderam satisfatoriamente as exigências requeridas por Mattos, Silva e Pruski (2000), Costa (2012) e Cruz (1996).

Quanto as condições adequadas de textura, os materiais utilizados na região do núcleo, constituem-se de areia, silte e argila, uma orientação descrita por Cruz (1996) e Costa (2012), comprovada durante análises realizadas nos ensaios geotécnicos dos materiais utilizados na confecção do núcleo.

Verificou-se que os materiais do núcleo, possuem alta plasticidade, uma condição aferida durante os ensaios de (LL e LP), uma conformidade encontrada segundo orientações de Mattos, Silva e Pruski (2000) e Cruz (1996), satisfazendo o comportamento do núcleo impermeável da barragem.

Quanto aos resultados obtidos do coeficiente de permeabilidade (K), os ensaios realizados nos taludes de montante e jusante, resultaram em uma vazão baixa, na qual favoreceu na estabilidade dos taludes e uma possível carreação de materiais (transporte de solo através das zonas internas do maciço da barragem), através das linhas de fluxo, após o reservatório entrar em regime de operação.

Perante análise dos resultados, os valores de fator de segurança para os métodos de Morgenstern-Price e Bishop em condições normais de operação do reservatório, são semelhantes e ambas as superfícies de ruptura não atingem o núcleo. As superfícies críticas de ruptura, mostram que a estabilidade da barragem, está governada pelas propriedades geotécnicas dos materiais, devido aos pedregulhos utilizados nas regiões de montante e jusante do talude e, os solos finos que foram utilizados no núcleo impermeável. No entanto, os valores dos fatores de segurança obtidos através das simulações pelo método de Morgenstern-Price e Bishop com acréscimo de carga sísmica durante o rebaixamento do reservatório entre 0-30 dias, são maiores que o recomendado por Honório (2022) *apud* ABNT (2017), acima de 1,1 com solicitações sísmicas. Já para as condições sem acréscimo de carga sísmica, para o talude de montante, o menor fator de segurança obtido foi de 2,17, sendo que entre os dois métodos, estiveram acima de 1,5. Para a região do talude de jusante, obteve-se um fator de segurança de 1,69 entre as simulações dos métodos, valores acima de 1,3 do mínimo permitido. Conclui-se para ambos os métodos sob condições de acréscimo de carga sísmica, ocasionaram maiores cargas horizontais e verticais, os mesmos atenderam os requisitos mínimos de 1,1, nos quais verificou-se um comportamento hidráulico e mecânico satisfatório quanto a estabilidade dos taludes da barragem.

Concluiu-se que no caso da necessidade de esvaziar o reservatório em condições de rebaixamento rápido, o seu esvaziamento pode ser realizado em 5 dias, sem comprometer a estabilidade da barragem. Sendo que entre 5-30 dias, o fator de segurança entre Bishop e Morgenstern-Price, mantiveram-se equilibrados acima do mínimo de 1,1 com abalo sísmico e sem carga sísmica acima de 1,3, com valores entre 1,58 e 2,02. Este esvaziamento programado, tende a reduzir os custos, comparados à um período de 30 dias, sob a condição de consumo de energia através de bombeamento elétrico, uso comum em atividades agrícolas.

Através das simulações realizadas no SEEP/W, pelo *software* GeoStudio, que os parâmetros de permeabilidade e as condições geotécnicas dos materiais que compõe o barramento, afetam diretamente o comportamento hidráulico nas regiões do núcleo e espaldares, tendo grande influência na estabilidade do talude da barragem.

Verificou-se que durante o regime permanente de operação, rebaixamento rápido e gradual do reservatório, o mesmo encontra-se em condições favoráveis de estabilidade do talude, quanto as superfícies críticas de ruptura. Os resultados obtidos das análises de montante e jusante, mostraram-se satisfatórios, assegurando que o talude da barragem não representa um risco de uma futura ruptura nos regimes do nível normal d'água e rebaixamento do reservatório.

Foi verificado através de um teste realizado durante as simulações do fator de segurança no *software* GeoStudio, que apesar da inclinação do talude de jusante estar com 1,98(H) e 1(V), uma solução favorável ao acréscimo do fator de segurança, seria a inclinação do talude ser 2,2(H) e 1(V). Uma solução prática, embora atribua um aumento no volume de material do barramento e conseqüentemente, eleve o custo do projeto, porém, uma decisão que visa garantir a estabilidade da barragem.

Quanto a erosão superficial do talude de montante, apesar da região do rip-rap não estar exposto sob uma ação de ventos predominantes em maior tempo durante o ano, conforme os autores Souza (2013), Cruz (1996) e Massad (2010), o diâmetro médio dos materiais do rip-rap, estão dentro do recomendado com 30 cm. Já a espessura dos materiais, encontrou-se um valor abaixo do recomendado, 45 cm. Concluiu-se, que futuramente irá ocorrer a movimentação do rip-rap durante ação das ondas, retirada do solo no talude de montante, resultando em erosões profundas atingindo a crista do reservatório, caso não seja feito um ajuste adequado.

Por fim, quanto ao potencial de risco, o mesmo respondeu ao requisito mínimo recomendado pela Ficha de Inspeção de Segurança de Barragens de Terra, fornecida pela ANA (2016). Perante as anomalias encontradas no barramento, obteve-se um valor de (PR) de 27,5, sendo identificado como classe "C", estando dentro do normal, sem comprometer a segurança da barragem.

Durante este estudo de caso, que envolveu a construção de uma barragem de terra, obteve-se uma conclusão geral, sobre a garantia da estabilidade de um barramento, estar condicionada através da elaboração de um projeto base e o acompanhamento de um engenheiro responsável. Argumenta-se que esta decisão garante o investimento alto durante a construção da barragem, que poderá colapsar quando de utiliza apenas métodos corriqueiros, durante a execução da obra.

REFERÊNCIAS

ALVES, Henrique Rosmaninho. O Estado de Coisas Inconstitucional face ao quadro de reiterado rompimento de barragens no Brasil. **Vertentes do Direito**, Minas Gerais, v. 6, n.2, p. 131 – 157, set. 2019. Disponível em: <https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/direito/article/view/7160/16039>. Acesso em: 16 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Solo – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 10 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, ABNT, 1995. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4.8 mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 12 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7185**: Solo – Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, ABNT, 2016. 8 p.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. ABNT, 5 p.

AYALA, Grover Romer Llanque. **Verificação da estabilidade do talude de montante em barragem de terra submetida a rebaixamento rápido realizada com ensaios em solos não saturados e modelagem numérica**. Orientador: Chagas da Silva Filho. Coorientador: Rosiel Ferreira Leme. 136 f. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/31763>. Acesso em: 16 jun. 2022.

ARAÚJO, Franklin Rabelo de. **Risco Geotécnico: Uma abordagem estocástica para análise da estabilidade de taludes da barragem Olho d'Água no Estado do Ceará**. Orientador: Silvrano Adonias Dantas Neto. 128 f. 2013. Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11330>. Acesso em: 17 out. 2022.

BARBOSA, Matheus Henrique Benatti. **Estabilidade de Taludes de Barragens: comparação entre análises por métodos de equilíbrio limite e elementos finitos**. Orientador: André Pacheco de Assis, PhD. 49 p. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil – Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/25937>. Acesso em: 17 out. 2022.

BARBOSA, Rodrigo de Andrade *et al.* Diagnóstico e execução de ações corretivas em barragem de terra: Estudo de caso da barragem Poleiros em Barra de Santa Rosa-PB. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 51, p. 86 – 96, abr. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2020v1n51p86-962020>. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/viewFile/4103/1435>. Acesso em: 15 jul. 2022.

CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens para irrigação**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2008. 158 p.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352 p.

CRUZ, P. T. **100 Barragens brasileiras, casos históricos, materiais de construção, projeto**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.

DANTAS NETO, S. A.; CARNEIRO, A. de A. Universidade Federal do Ceará. **Relatório das Condições de Segurança da Barragem de Olho d'Água**. Convênio UFC / COGERH. Fortaleza, 2013.

Dias, Felipe Barros. **AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM ALTEADA PELO MÉTODO DE MONTANTE POR DIFERENTES METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE FATOR DE SEGURANÇA: COMPARAÇÃO DETERMINÍSTICA**. Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch. 77 f. 2021. Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/3469>. Acesso em: 2 dez. 2022.

FERNANDES, Marcos Túlio. **Avaliação das técnicas de laboratório e campo para realização de ensaios de permeabilidade de solos**. Orientador: Cláudio Henrique de Carvalho Silva. Coorientador: Eduardo Antônio Gomes Marques. 138 f. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Magister Scientiae, Viçosa, MG, 2017. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/10648>. Acesso em: 26 jul. 2022.

GARCÍA, Julian Asdrubal Buriti. **Análise de comportamento de barragens construídas com núcleos argilosos compactos no ramo super úmido**. Orientador: Julian Asdrubal Buriticá. 124 p. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/15402>. Acesso em: 26 jul. 2022.

HONÓRIO, Clarissa Maria Silva. **Avaliação de segurança de uma barragem de terra: abordagem determinística e probabilística**. Orientador: Eloardo Lucas Pereira. 2022. 75 f. Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/4309>. Acesso em: 20 jul. 2022.

InfoEscola. **Geografia do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjH1NWQpon9AhU7qpUCHaiiCwsQFnoECAsQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.infoescola.com%2Frio-grande-do-sul%2Fgeografia-do-rio-grande-do-sul%2F&usq=AOvVaw1FC2NT0IdjN3BBenZA2YUV>: Acesso em: 17 jul. 2022.

JÚNIOR, Antônio Edimar dos Santos. **ANÁLISE PROBABILÍSTICA DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM BARRAGENS DE TERRA NO ESTADO DO CEARÁ**. Orientadora: Carla Beatriz Costa de Araújo. 2019. 121 f. Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Civil – Universidade Federal do Ceará, Campus de Cratéis, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/48447>. Acesso em: 20 jul. 2022.

LISBOA, Rafael Luiz Lobato. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada 2006 de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório**. Orientador: Roberto Francisco de Azevedo. 89 f. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Magister Scientiae, Viçosa, MG, 2006. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/3852>. Acesso em: 26 jul. 2022.

LOPES, José Dermeval saraiva; LIMA, Francica Zenaíde de. **Pequenas barragens de terra: planejamento, dimensionamento e construção**. 274 p. Viçosa: Aprenda Fácil. 2005.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=rueVAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT5&dq=ensaios+necess%C3%A1rios+para+constru%C3%A7%C3%A3o+de+barragens+de+terra&ots=rLFxYCoKwO&sig=cp7PP4hq60Z92bNjcz89ojU25mo>. Acesso em: 13 jul. 2022.

MATOS, Antônio Teixeira de.; SILVA, Demetrius Davi da; PRUSKI, Fernando Falco. **Barragens de Terra de Pequeno Porte**. Revisão linguística: Ângelo José de Carvalho. 1. ed. Viçosa: Editora da UFV, MG, 2000. 136 p.

MIRANDA, Gabriela Macedo. **Aplicação do método geofísico de eletrorresistividade e de ensaios geotécnicos para análise de integridade e estabilidade de uma barragem de terra**. Orientador: José Waldomiro Jiménez Rojas. 2021. 129 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul, Caçapava do Sul, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/6133>. Acesso em: 14 jul. 2022.

NETTO, Arthur Sausen, **Análise de estabilidade de uma barragem de terra: abordagens determinística e probabilística**. Orientador: Marcela Maier Farias. Coorientador: Mariane Kempka. 2019. 88 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Garapuava, Garapuava, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11738>. Acesso em: 5 jun. 2022.

OLIVEIRA, Fabiano Garcia. **Avaliação da influência do método, grau, umidade e energia de compactação na resistência ao cisalhamento de um solo da cidade de Alegrete/RS**. Orientador: Jaelson Budny. Coorientador: Diego Arthur Hartmann. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/rii/4860>. Acesso em: 22 jul. 2022.

PEREIRA, Tonismar dos Santos. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Orientador: Adroaldo Dias Robaina. Coorientadora: Marcia Xavier Peiter. 77 p.; 30 cm. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Santa Maria, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7565/PEREIRA%2c%20TONISMAR%20DOS%20SANTOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 jun. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. Departamento de Políticas Agrícolas e Desenvolvimento Rural. **Radiografia da agropecuária gaúcha 2020**. [Porto Alegre]: Secretaria da Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Rural, [2020]. 38 p. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjVxJSKsfn4AhXGBLkGHbq_DP0QFnoECAQQA&url=https%3A%2F%2Fwww.agricultura.rs.gov.br%2Fupload%2Fquivos%2F202009%2F26185534-radiografia-da-agropecuaria-gaucha-2020-1.pdf&usg=AOvVaw2TV-0oQ6qxql6DFC-c2Vzn. Acesso em: 15 jul. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. Fundação de Economia e Estatística. **Perfil Socioeconômico**. [Porto Alegre]: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Governo do Estado do Rio Grande do Sul, [2020]. Disponível em: <https://arquivofee.rs.gov.br/perfil-socioeconomico/municipios/>. Acesso em: 18 jul. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. Grupo de Trabalho para atuar na vistoria técnica de barragens outorgadas no Estado. **Relatório da Vistoria de Nível I**. [porto Alegre]: Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura, [2019]. 30 p. Disponível em: <https://sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202012/14092342-relatorio-vistorias-de-nivel-i-barragens.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. Instituto Riograndense do Arroz. **SAFRA 2022/2023 – DADOS DIVERSOS** [Porto Alegre]: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjG0POz34H9AhU0ppUCHSgBDK4QFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fadmin.irga.rs.gov.br%2Fupload%2Farquivos%2F202209%2F27145215-safra-2022-23-intencao.pdf&usg=AOvVaw1ShHgW9syIhN_VAZdUDnHw. Acesso em: 18 jul. 2022.

RIO GRANDE DO SUL. Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Rio Grande do Sul. **Perfil das Cidades Gaúchas – Alegrete**. [Porto Alegre]: Gestão Estratégica do Sebrae Rio Grande do Sul, [2020]. 20 p. Disponível em: https://datasebrae.com.br/municipios/rs/Perfil_Cidades_Gauchas-Alegrete.pdf. Acesso em: 18 jul. 2022.

SILVEIRA, Geraldo Lopes da; CRUZ, Jussara Cabral (org). **Seleção Ambiental de Barragens**: análise de favorabilidades ambientais em escala de bacia hidrográfica. Revisão bibliográfica: Ana Rosa Casarin. Santa Maria: Editora da UFSM, 2005. 390 p.

SALINAS, João Vitor. **Estudos dos processos construtivos e das patologias de açudes e barragens geotécnicas de pequeno porte**. Orientador: Wilber Chambi Tapahuasco. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, Alegrete, 2017. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/rii/1985/1/Jo%20Vitor%20Salinas%20-%202017.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2022.

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F. CLEVINGER, W., 1963. “**A. Earth Rock Dams – Engineering Problems of Design and Construction**”. John Wiley and Sons, Inc.

SOUZA, Mariana Miranda de. **ESTUDO PARA O PROJETO GEOTÉCNICO DA BARRAGEM DE ALTO IRANI, SC**. Orientador: Marcos Barreto de Mendonça. 2013. 129 p. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/9531>. Acesso em: 22 jul. 2022.

SOUZA, Airton Cesar Tavares de. **Verificação da análise da estabilidade da barragem São Bento do Una, Pernambuco**. Orientador: Maria Isabela Marques da Cunha Vieira Bello. 55 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal de Pernambuco, CCA, Engenharia Civil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/44423>. Acesso em: 22 jul. 2022.

TEIXEIRA, Rafael Lemos; GOMES, Matheus de Oliveira. **Análise e desenvolvimento de projeto construtivo de uma pequena barragem de terra no Córrego da Cava – Morrinhos/GO, com foco na segurança.** Orientador: Arlam Carneiro Silva Júnior. 2017. 51 f. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Aparecida de Goiânia, Aparecida de Goiânia, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ifg.edu.br:8080/handle/prefix/126>. Acesso em: 14 jun. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Laboratório de Geotécnica. **Determinação da permeabilidade do solo.** Fortaleza: UFC, 2016. p 25-29. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj1d--m_n4AhXEBrkGHaj3DZQQFnoECAMQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.lagetec.ufc.br%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F03%2FEnsaio-para-determina%25C3%25A7%25C3%25A3o-da-permeabilidade-de-material-granular.pdf&usg=AOvVaw06TOxnY1CsxuTk69b0UrXB. Acesso em: 2 jun. 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Departamento de Zootecnia da Faculdade de Agronomia; EMBRAPA. Departamento da Pecuária Sul. **Informativo NESPro & Embrapa Pecuária Sul:** [Porto Alegre]: bovinocultura de corte no Rio Grande do Sul – Ano 4, n. 1 [2018] – Semestral. 50 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355035/1529130/Informativo+Nespro+2018/5f6b178c-5e0e-41ea-a9ed-dc15d2f1325e>. Acesso em: 18 jul. 2022.

ANEXO A – Volume acumulado obtido através do cálculos das seções transversais do maciço da barragem

Volume Report			
Project: C:\Users\rober\AppData\Local\Temp\Drawing1_1_17252_dc25749f.svs			
Alignment: Alinhamento			
Sample Line Group: seção transversal			
Start Sta: 0+000.000			
End Sta: 0+326.396			

<u>Estacas de metro em metro</u>	<u>Area/ seção transversal (m²)</u>	<u>Aterro volume/ seção transversal (m³)</u>	<u>Vol.aterro acumulado (m³)</u>
0+000.000	0.00	0.00	0.00
0+001.000	0.48	0.24	0.24
0+002.000	1.91	1.19	1.43
0+003.000	4.29	3.10	4.53
0+004.000	7.24	5.77	10.30
0+005.000	8.59	7.91	18.21
0+006.000	8.28	8.43	26.65
0+007.000	8.50	8.39	35.03
0+008.000	8.72	8.61	43.64
0+009.000	8.93	8.82	52.47
0+010.000	9.14	9.04	61.50
0+011.000	9.36	9.25	70.76
0+012.000	9.56	9.46	80.22
0+013.000	9.77	9.67	89.88
0+014.000	9.98	9.87	99.76
0+015.000	10.18	10.08	109.83
0+016.000	10.37	10.27	120.10
0+017.000	10.54	10.45	130.56
0+018.000	10.69	10.61	141.17
0+019.000	10.82	10.76	151.92
0+020.000	10.97	10.90	162.82
0+021.000	11.18	11.07	173.89
0+022.000	11.42	11.30	185.20
0+023.000	11.67	11.55	196.74
0+024.000	11.91	11.79	208.53
0+025.000	12.16	12.03	220.57
0+026.000	12.40	12.28	232.85
0+027.000	12.64	12.52	245.37
0+028.000	12.89	12.76	258.13

0+029.000	13.13	13.01	271.14
0+030.000	13.37	13.25	284.39
0+031.000	13.61	13.49	297.88
0+032.000	13.85	13.73	311.61
0+033.000	14.09	13.97	325.58
0+034.000	14.33	14.21	339.79
0+035.000	14.57	14.45	354.24
0+036.000	14.82	14.69	368.93
0+037.000	15.14	14.98	383.91
0+038.000	15.50	15.32	399.23
0+039.000	15.89	15.69	414.92
0+040.000	16.33	16.11	431.03
0+041.000	16.79	16.56	447.59
0+042.000	17.27	17.03	464.62
0+043.000	17.77	17.52	482.14
0+044.000	18.29	18.03	500.17
0+045.000	18.82	18.55	518.73
0+046.000	19.37	19.09	537.82
0+047.000	19.92	19.64	557.46
0+048.000	20.48	20.20	577.66
0+049.000	21.04	20.76	598.43
0+050.000	21.61	21.33	619.75
0+051.000	22.14	21.87	641.63
0+052.000	22.52	22.33	663.96
0+053.000	22.79	22.66	686.61
0+054.000	23.27	23.03	709.64
0+055.000	23.85	23.56	733.20
0+056.000	24.39	24.12	757.33
0+057.000	24.89	24.64	781.97
0+058.000	25.33	25.11	807.08
0+059.000	25.73	25.53	832.61
0+060.000	26.08	25.90	858.51
0+061.000	26.44	26.26	884.77
0+062.000	26.96	26.70	911.47
0+063.000	27.45	27.21	938.67
0+064.000	27.91	27.68	966.35
0+065.000	28.35	28.13	994.49
0+066.000	28.79	28.57	1023.06
0+067.000	29.27	29.03	1052.09
0+068.000	29.77	29.52	1081.61
0+069.000	30.30	30.04	1111.64
0+070.000	30.90	30.60	1142.24
0+071.000	31.55	31.22	1173.47
0+072.000	32.26	31.90	1205.37
0+073.000	33.02	32.64	1238.01

0+074.000	33.84	33.43	1271.44
0+075.000	34.74	34.29	1305.73
0+076.000	35.73	35.24	1340.96
0+077.000	36.78	36.26	1377.22
0+078.000	37.84	37.31	1414.53
0+079.000	38.90	38.37	1452.90
0+080.000	39.98	39.44	1492.34
0+081.000	41.06	40.52	1532.86
0+082.000	42.15	41.60	1574.46
0+083.000	43.25	42.70	1617.16
0+084.000	44.36	43.81	1660.97
0+085.000	45.48	44.92	1705.89
0+086.000	46.67	46.07	1751.96
0+087.000	47.96	47.31	1799.27
0+088.000	49.34	48.65	1847.92
0+089.000	50.78	50.06	1897.98
0+090.000	52.24	51.51	1949.49
0+091.000	53.77	53.01	2002.50
0+092.000	55.38	54.57	2057.07
0+093.000	57.07	56.22	2113.29
0+094.000	58.84	57.95	2171.25
0+095.000	60.68	59.76	2231.01
0+096.000	62.60	61.64	2292.65
0+097.000	64.59	63.60	2356.24
0+098.000	66.66	65.63	2421.87
0+099.000	68.80	67.73	2489.60
0+100.000	71.07	69.94	2559.54
0+101.000	73.54	72.31	2631.84
0+102.000	76.22	74.88	2706.73
0+103.000	79.07	77.65	2784.37
0+104.000	81.89	80.48	2864.85
0+105.000	84.69	83.29	2948.14
0+106.000	87.48	86.09	3034.23
0+107.000	90.25	88.87	3123.10
0+108.000	93.03	91.64	3214.74
0+109.000	95.93	94.48	3309.22
0+110.000	99.00	97.46	3406.68
0+111.000	102.19	100.59	3507.27
0+112.000	105.49	103.84	3611.11
0+113.000	108.92	107.20	3718.32
0+114.000	112.48	110.70	3829.01
0+115.000	116.17	114.32	3943.34
0+116.000	120.01	118.09	4061.43
0+117.000	123.98	121.99	4183.42

0+118.000	128.09	126.03	4309.46
0+119.000	132.32	130.20	4439.66
0+120.000	136.62	134.47	4574.13
0+121.000	141.00	138.81	4712.94
0+122.000	145.44	143.22	4856.16
0+123.000	149.77	147.61	5003.77
0+124.000	153.82	151.80	5155.56
0+125.000	157.59	155.71	5311.27
0+126.000	161.09	159.34	5470.61
0+127.000	164.40	162.74	5633.35
0+128.000	167.55	165.98	5799.33
0+129.000	170.53	169.04	5968.36
0+130.000	173.33	171.93	6140.29
0+131.000	175.96	174.64	6314.93
0+132.000	178.41	177.19	6492.12
0+133.000	180.70	179.56	6671.68
0+134.000	182.85	181.78	6853.45
0+135.000	184.87	183.86	7037.31
0+136.000	186.74	185.80	7223.12
0+137.000	188.46	187.60	7410.72
0+138.000	190.03	189.25	7599.97
0+139.000	191.33	190.68	7790.65
0+140.000	192.31	191.82	7982.47
0+141.000	193.07	192.69	8175.16
0+142.000	193.85	193.46	8368.62
0+143.000	194.70	194.27	8562.89
0+144.000	195.62	195.16	8758.05
0+145.000	196.59	196.11	8954.15
0+146.000	197.63	197.11	9151.27
0+147.000	198.71	198.17	9349.44
0+148.000	199.85	199.28	9548.72
0+149.000	201.05	200.45	9749.17
0+150.000	202.27	201.66	9950.83
0+151.000	203.42	202.84	10153.67
0+152.000	204.49	203.95	10357.62
0+153.000	205.46	204.97	10562.60
0+154.000	206.35	205.90	10768.50
0+155.000	207.11	206.73	10975.23
0+156.000	206.52	206.82	11182.05
0+157.000	205.48	206.00	11388.05
0+158.000	204.75	205.12	11593.17
0+159.000	204.33	204.54	11797.71
0+160.000	204.23	204.28	12001.99
0+161.000	204.43	204.33	12206.32
0+162.000	204.94	204.69	12411.00
0+163.000	205.63	205.28	12616.29

0+164.000	206.42	206.02	12822.31
0+165.000	207.21	206.81	13029.12
0+166.000	207.91	207.56	13236.68
0+167.000	208.50	208.20	13444.88
0+168.000	208.90	208.70	13653.58
0+169.000	208.85	208.87	13862.45
0+170.000	208.54	208.69	14071.15
0+171.000	208.42	208.48	14279.63
0+172.000	208.28	208.35	14487.98
0+173.000	208.07	208.18	14696.16
0+174.000	207.79	207.93	14904.09
0+175.000	207.43	207.61	15111.70
0+176.000	206.88	207.16	15318.86
0+177.000	206.27	206.57	15525.43
0+178.000	205.60	205.94	15731.36
0+179.000	204.90	205.25	15936.61
0+180.000	204.14	204.52	16141.13
0+181.000	203.34	203.74	16344.87
0+182.000	202.40	202.87	16547.74
0+183.000	201.44	201.92	16749.66
0+184.000	200.48	200.96	16950.62
0+185.000	199.37	199.93	17150.55
0+186.000	198.10	198.74	17349.29
0+187.000	196.66	197.38	17546.67
0+188.000	195.01	195.83	17742.50
0+189.000	192.96	193.99	17936.49
0+190.000	190.54	191.75	18128.24
0+191.000	187.85	189.20	18317.44
0+192.000	184.91	186.38	18503.82
0+193.000	181.71	183.31	18687.13
0+194.000	178.26	179.98	18867.11
0+195.000	174.94	176.60	19043.71
0+196.000	171.85	173.39	19217.11
0+197.000	168.94	170.39	19387.50
0+198.000	166.23	167.58	19555.08
0+199.000	163.70	164.96	19720.05
0+200.000	161.36	162.53	19882.57
0+201.000	159.18	160.27	20042.84
0+202.000	157.17	158.18	20201.02
0+203.000	155.32	156.24	20357.26
0+204.000	153.62	154.47	20511.73
0+205.000	152.05	152.84	20664.57

0+206.000	150.60	151.33	20815.89
0+207.000	149.28	149.94	20965.84
0+208.000	148.08	148.68	21114.52
0+209.000	147.02	147.55	21262.06
0+210.000	146.17	146.59	21408.66
0+211.000	145.21	145.69	21554.35
0+212.000	143.49	144.35	21698.70
0+213.000	141.02	142.26	21840.96
0+214.000	138.35	139.69	21980.64
0+215.000	135.69	137.02	22117.67
0+216.000	133.04	134.36	22252.03
0+217.000	130.47	131.75	22383.79
0+218.000	128.04	129.26	22513.04
0+219.000	125.71	126.87	22639.92
0+220.000	123.54	124.62	22764.54
0+221.000	121.63	122.59	22887.12
0+222.000	119.82	120.73	23007.85
0+223.000	118.02	118.92	23126.78
0+224.000	116.21	117.12	23243.89
0+225.000	114.38	115.29	23359.18
0+226.000	112.53	113.45	23472.64
0+227.000	110.67	111.60	23584.24
0+228.000	108.80	109.73	23693.97
0+229.000	106.90	107.85	23801.82
0+230.000	105.01	105.96	23907.78
0+231.000	103.16	104.09	24011.87
0+232.000	101.45	102.31	24114.17
0+233.000	99.90	100.68	24214.85
0+234.000	98.40	99.15	24314.00
0+235.000	96.34	97.37	24411.38
0+236.000	94.21	95.27	24506.65
0+237.000	92.03	93.12	24599.77
0+238.000	89.82	90.93	24690.70
0+239.000	87.57	88.70	24779.39
0+240.000	85.28	86.43	24865.82
0+241.000	82.95	84.11	24949.93
0+242.000	80.58	81.76	25031.70
0+243.000	78.17	79.37	25111.07
0+244.000	75.76	76.96	25188.04
0+245.000	73.46	74.61	25262.64
0+246.000	71.30	72.38	25335.02
0+247.000	69.24	70.27	25405.29
0+248.000	67.31	68.27	25473.57
0+249.000	65.53	66.42	25539.99

0+250.000	63.91	64.72	25604.71
0+251.000	62.41	63.16	25667.86
0+252.000	61.05	61.73	25729.59
0+253.000	59.91	60.48	25790.08
0+254.000	58.98	59.45	25849.53
0+255.000	58.27	58.62	25908.15
0+256.000	57.76	58.01	25966.17
0+257.000	57.47	57.61	26023.78
0+258.000	57.40	57.43	26081.21
0+259.000	57.37	57.39	26138.60
0+260.000	56.95	57.16	26195.76
0+261.000	56.50	56.73	26252.49
0+262.000	55.99	56.24	26308.73
0+263.000	55.40	55.69	26364.42
0+264.000	54.74	55.07	26419.50
0+265.000	54.02	54.38	26473.88
0+266.000	53.26	53.64	26527.52
0+267.000	52.47	52.86	26580.38
0+268.000	51.65	52.06	26632.44
0+269.000	50.79	51.22	26683.66
0+270.000	49.90	50.34	26734.00
0+271.000	48.97	49.43	26783.44
0+272.000	47.99	48.48	26831.92
0+273.000	46.96	47.47	26879.39
0+274.000	45.93	46.44	26925.84
0+275.000	45.29	45.61	26971.44
0+276.000	44.77	45.03	27016.47
0+277.000	44.24	44.51	27060.98
0+278.000	43.70	43.97	27104.95
0+279.000	43.14	43.42	27148.37
0+280.000	42.56	42.85	27191.22
0+281.000	41.97	42.26	27233.48
0+282.000	41.38	41.67	27275.15
0+283.000	40.95	41.17	27316.32
0+284.000	40.73	40.84	27357.16
0+285.000	40.69	40.71	27397.87
0+286.000	40.74	40.72	27438.58
0+287.000	40.85	40.79	27479.38
0+288.000	40.64	40.74	27520.12
0+289.000	40.00	40.32	27560.44
0+290.000	38.90	39.45	27599.89
0+291.000	37.88	38.39	27638.28
0+292.000	36.97	37.43	27675.71
0+293.000	36.17	36.57	27712.28

0+294.000	35.47	35.82	27748.10
0+295.000	34.87	35.17	27783.27
0+296.000	34.38	34.63	27817.90
0+297.000	34.40	34.39	27852.29
0+298.000	35.01	34.70	27886.99
0+299.000	35.73	35.37	27922.36
0+300.000	36.50	36.11	27958.47
0+301.000	37.29	36.90	27995.37
0+302.000	37.95	37.62	28032.99
0+303.000	38.29	38.12	28071.10
0+304.000	38.13	38.21	28109.31
0+305.000	37.63	37.88	28147.19
0+306.000	36.89	37.26	28184.45
0+307.000	35.87	36.38	28220.83
0+308.000	34.23	35.05	28255.88
0+309.000	31.90	33.06	28288.94
0+310.000	28.48	30.19	28319.13
0+310.944	23.94	24.74	28343.87
0+311.000	23.62	1.33	28345.20
0+312.000	18.17	20.90	28366.10
0+313.000	13.18	15.68	28381.78
0+314.000	8.66	10.92	28392.70
0+315.000	4.77	6.71	28399.41
0+316.000	2.02	3.39	28402.80
0+317.000	0.43	1.22	28404.02
0+318.000	0.00	0.22	28404.24
0+319.000	0.00	0.00	28404.24
0+320.000	0.00	0.00	28404.24
0+321.000	0.00	0.00	28404.24
0+322.000	0.00	0.00	28404.24
0+323.000	0.00	0.00	28404.24
0+324.000	0.00	0.00	28404.24
0+325.000	0.00	0.00	28404.24
0+326.000	0.00	0.00	28404.24
0+326.396	0.00	0.00	28404.24