UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

LÍVIA BEATRIZ SANTOS TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA ZONEADA

ANGICOS
2024

LÍVIA BEATRIZ SANTOS TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA ZONEADA

Trabalho Final de Graduação apresentado a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Gomes Dantas de Araújo

ANGICOS
2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S266c Santos Teixeira, Lívia Beatriz.
Caracterização de materiais geotécnicos para a construção de uma barragem de terra zoneada / Lívia Beatriz Santos Teixeira. - 2024.
68 f. : il.

Orientador: Arthur Gomes Dantas de Araújo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil, 2024.

1. Barragem. 2. Ensaios. 3. Solos. 4. Classificação. 5. Protótipo. I. Gomes Dantas de Araújo, Arthur , orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automáto em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).
Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC´s) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LÍVIA BEATRIZ SANTOS TEIXEIRA

CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA BARRAGEM DE TERRA ZONEADA

Trabalho Final de Graduação apresentado a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 24/10/2024.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Dr. Arthur Gomes Dantas de Araújo. (UFERSA)
Presidente

_____
Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral. (UFERSA)
Membro Examinador

_____
Prof. Dr. Luís Henrique Gonçalves Costa. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela oportunidade de chegar até aqui, por superar todos os obstáculos que surgiram na minha jornada acadêmica e concluir esta etapa de crescimento em minha vida.

Agradeço aos meus pais, Erivan e Sandra, por ser minha força durante esses cinco anos, por todo o zelo e confiança depositada em mim. Nada foi em vão, foi tudo por vocês. O que seria de mim sem todas as palavras de conforto nas horas difíceis, quando as coisas apertavam e nem eu mesma acreditava que iria conseguir, vocês nunca saíram do meu lado e sempre acreditaram. Foram cinco anos longe de casa, cinco anos de renúncia, perdendo por muitas vezes datas comemorativas e momentos especiais. Mas, hoje eu posso, com orgulho de mim mesma dizer: pai, mãe, eu consegui! Nós conseguimos!

Agradeço aos meus irmãos, Bruna e Douglas por todo o apoio, e por tudo que vocês também tiveram que abrir mão para que a realização desse sonho fosse possível, vocês são minha base e sei que sem vocês eu também não conseguiria. Agradeço a vovó Geralda, vovô Inácio e vovô Miguel (*in memoriam*) por interceder e confiar na garotinha de vocês, estou voltando para casa com a sensação de dever cumprido. Agradeço ainda a toda minha família, em especial aos meus tios Bilica, Chico e Nildo que sempre se fizeram presente na minha jornada, acreditando e me dando apoio de todas as formas. Essa conquista também é de vocês. Obrigada minhas primas Malu, Aninha, Lana e Raquel por também acreditarem em mim, amo todos vocês.

Agradeço a Arthur, meu orientador por toda a paciência e toda a dedicação em me orientar, irei levar seus conselhos para além da sala de aula, nossa caminhada para chegar até foi de muito trabalho, mas no final o sentimento que fica é de eterna gratidão.

Agradeço a Banca Examinadora, os professores Kleber e Luís pela disponibilidade e aceitar o convite e dedicar tempo neste momento tão importante.

Não poderia deixar de agradecer a todos os amigos que fiz nessa caminhada. A minha amiga Aylane, por sempre estar do meu lado desde CeT, sempre fomos uma pela outra e sem sua ajuda tudo ficaria mais difícil. A Mariana, que se tornou além de colega uma amiga para a vida e que sempre esteve do meu lado. A Gabi, por sempre me ouvir e me amparar, nossa amizade ocorreu de forma inesperada... e que bom que os acasos da vida cruzaram nossos caminhos, você é especial demais. Agradeço ainda a todos os meus colegas que sempre me ajudaram, a Vanessa e Rafael que entraram no meu caminho nessa reta final e que quero levar para minha vida, obrigada por toda a ajuda na minha trajetória acadêmica, nunca esquecerei

de vocês. A todos os meus amigos que não citei, meu muito obrigado também. Todos são importantes e foram essenciais nessa etapa tão importante da minha vida.

O que eu faço é uma gota no meio do oceano,
mas sem ela o oceano seria menor.

- Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

Barragens de terra têm sido construídas desde a Antiguidade para diversas finalidades. No decorrer do tempo, estudos foram sendo feitos para garantir a segurança e funcionalidade. Com isto, é de suma relevância o estudo detalhado dos solos que constituem uma barragem. Nesta perspectiva, este trabalho teve como objetivo principal avaliar a eficácia dos materiais escolhidos para serem utilizados na construção de barragens de terra zoneadas e realizar a montagem de um protótipo e na análise de ensaios geotécnicos. A pesquisa foi dividida em duas partes: a montagem do protótipo em um aquário e a realização de ensaios laboratoriais em solos, incluindo granulometria, limites de liquidez e plasticidade, permeabilidade, compactação e índice de vazios máximo e mínimo. O protótipo foi projetado para simular uma barragem de terra com núcleo argiloso e filtros de areia, taludes de montante e jusante de solo laterítico e britas para simulação de enrocamento e dreno de pé. Os resultados obtidos por meio dos ensaios geotécnicos e classificados pelo Sistema de Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), indicam que parte dos materiais selecionados atendem às especificações necessárias para garantir a segurança e eficiência da barragem. A análise das propriedades dos solos demonstrou que a argila utilizada possui uma permeabilidade adequada para o núcleo impermeável, enquanto o a areia escolhida para compor o filtro atende apenas ao critério de permeabilidade, não sendo adequada para reter as partículas finas.

Palavras-chave: Barragem. Ensaios. Solos. Análise. Classificação. Protótipo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem de terra homogênea.....23
Figura 2 – Barragem de terra zoneada.....23
Figura 3 – Barragem com revestimento.....24
Figura 4 – Barragem de enrocamento com núcleo impermeável.....25
Figura 5 – Núcleo impermeável de uma barragem representado por linhas horizontais..26
Figura 6 – Representação das zonas de transição de uma barragem de terra.....27
Figura 7 – Representação dos filtros e drenos de uma barragem de terra.....27
Figura 8 – Representação de taludes de montante e jusante.....28
Figura 9 – Representação do corpo de uma barragem de terra.....29
Figura 10 – Identificação do Rip-rap.....30
Figura 11 – Identificação da crista de uma barragem de terra.....31
Figura 12 – Identificação da borda livre.....32
Figura 13 – Fundações de barragens de terra.....36
Figura 14 – Cut-off e tapete.....37
Figura 15 – Granulometria de areia bem e mal graduada.....36
Figura 16 – Carta de plasticidade.....37
Figura 17 – Seleção dos materirais.....40
Figura 18 – Solo destorroado no almofariz.....42
Figura 19 – Peneiras para ensaio de granulometria por peneiramento.....43
Figura 20 – Amostra pesada para a realização do ensaio de sedimentação.....44
Figura 21 – Amostra misturada com solução dispersante.....44
Figura 22 – Misturador mecânico.....44
Figura 23 – Provetas com o material do ensaio.....44
Figura 24 – Peso da amostra para iniciar o ensaio.....45
Figura 25 – Homogeneização da argila e água.....45
Figura 26 – Compactação das camadas de argila.....46
Figura 27 – Capsulas para levar as amostras de solo a estufa.....46
Figura 28 – Aparelho de Casagrande.....47
Figura 29 – Peso do material para iniciar o ensaio.....47
Figura 30 – Ensaio realizado.....47
Figura 31 – Amostra para ir a estufa.....47
Figura 32 – Molde da amostra em forma de cilindro.....48

Figura 33 – Amostras para ir a estufa.....48
Figura 34 – Processo de realização do ensaio.....49
Figura 35 – Ensaio de permeabilidade com carga variável.....51
Figura 36 – Ensaio de permeabilidade em argila em execução.....51
Figura 37 – Aquário para a montagem do protótipo.....52
Figura 38 – Ilustração das dimensões do aquário e protótipo.....52
Figura 39 – Protótipo montado dentro do aquário.....52
Figura 40 – Curva granulométrica do Solo 1.....55
Figura 41 – Curva granulométrica do Solo 2.....55
Figura 42 – Curva granulométrica do Solo 3.....55
Figura 43 – Curva granulométrica do Solo 4.....55
Figura 44 – Curva granulométrica do Solo 5.....55
Figura 45 – Curva granulométrica do Solo 6.....55
Figura 46 – Reta da Curva de Fluidez do Solo 2.....57
Figura 47 – Reta da Curva de Fluidez do Solo 5.....57
Figura 48 – Reta da Curva de Fluidez do Solo 6.....57
Figura 49 – Curva do ensaio de compactação.....58
Figura 50 – Vazamento no aquário durante a fase de testes.....62

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 – Mapa do município de Angicos/RN.....41
Mapa 2 – Mapa do município de Ipanguaçu/RN.....41
Mapa 3 – Mapa do município de Grossos/RN.....41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Terminologia do Sistema Unificado.....34

Quadro 2 – Classificação pelo método Rodoviário.....38

Quadro 3 – Legenda para os solos utilizados.....53

Quadro 4 – Classificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).....59

Quadro 5 – Classificação dos solos pelo método Rodoviário.....60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição granulométrica de acordo com a NBR 6502/1995.....34

Tabela 2 – Resumo dos resultados do ensaio de granulometria.....56

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de LL e LP..... 57

Tabela 4 – Resumo dos resultados do ensaio de índice de vazios máximo e mínimo dos Solos 1, 3 e 4.....58

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Coeficiente de não uniformidade.....36

Equação 2 – Coeficiente de curvatura.....36

Equação 3 – Índice de grupo.....39

Equação 4 – Indicação de que o filtro deve ser mais permeável do que solo.....39

Equação 5 – Limite do tamanho dos finos do filtro.....39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17

2 OBJETIVOS 20

2.1 Objetivo geral 20

2.2 Objetivos específicos 20

3 REFERENCIAL TEÓRICO 21

3.1 Definição de barragem de terra 21

3.2 Tipos de barragem de terra 22

3.2.1 Barragem homogênea 22

3.2.2 Barragem zoneada 23

3.2.3 Barragem com revestimento 24

3.2.4 Barragem de enrocamento com núcleo impermeável 24

3.2.5 Barragem de terra com cota variável 25

3.3 Elementos de barragem de terra 25

3.3.1 Núcleo impermeável 26

3.3.2 Zonas de transição 26

3.3.3 Filtros e drenos 27

3.3.4 Taludes de montante e jusante 28

3.3.5 Corpo de uma barragem 28

3.3.6 Rip-rap 29

3.3.7 Crista 30

3.3.8 Borda livre 31

3.3.9 Fundações 32

3.3.9.1 Tratamento de fundações 32

3.4 Distribuição granulométrica 34

3.5 Métodos de Classificação 34

3.5.1 Classificação pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) 34

3.5.1.1 Solos granulares 35

3.5.1.2 Solos com granulometria fina (argilas e siltes) 37

3.5.2 Classificação pelo método Rodoviário 38

3.6 Critério de Terzaghi 39

4 MATERIAIS E MÉTODOS 40

4.1 Materiais para ensaios geotécnicos 40

4.2 Ensaios geotécnicos 42

4.2.1 Preparação do material 42
4.2.2 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação 42
4.2.2.1 Peneiramento 43
4.2.2.2 Sedimentação 43
4.2.3 Ensaio de Compactação 45
4.2.4 Limite de Liquidez e Plasticidade (LL e LP) 46
4.2.4.1 Limite de Liquidez (LL) 46
4.2.4.2 Limite de Plasticidade (LP) 48
4.2.5 Índices de Vazios Máximo e Mínimo para areia e brita 48
4.2.6 Permeabilidade da argila 50
4.3 Protótipo de uma barragem de terra e aquário 51
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 54
5.1 Resultado dos ensaios geotécnicos 54
5.1.1 Resultado da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação 54
5.1.2 Resultado do ensaio de compactação 56
5.1.3 Resultado do ensaio do limite de liquidez e plasticidade (LL e LP) 58
5.1.4 Resultado dos índices de vazios máximo e mínimo para areia e brita 58
5.1.5 Resultado da permeabilidade da argila 59
5.1.6 Classificação dos materiais por SUCS 59
5.2 Resultado do dimensionamento do filtro pelo critério de Terzaghi 60
5.3 Resultado do protótipo e aquário 61
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 63
REFERÊNCIAS 65

1 INTRODUÇÃO

Barragens de Terra e Enrocamento (BTEs) têm sido construídas desde a Antiguidade. Em contexto histórico, as mais antigas que se tem conhecimento foram construídas no Oriente Médio, há mais de 4.000 a.C. Outros povos da Antiguidade também construíram barragens, destacando-se os da Índia, China e Sri Lanka. Em sua maioria, as barragens eram formadas por paredes de blocos de pedra apoiadas em rochas que podiam chegar ao galgamento durante as cheias (SANDRONI e GUIDICINI, 2022).

Ainda de acordo com Sandroni e Guidicini (2022), a maioria das barragens eram de peso, no entanto, algumas dessas barragens possuíam partes em terra. Como exemplo a barragem de Jawa, na Jordânia, construída por volta de 3.000 a.C. As barragens de terra eram homogêneas, tendo seu material transportado manualmente e compactado por pisoteamento de animais ou de homens (MASSAD, 2003).

De acordo com Mello (2011), a barragem mais antiga construída no Brasil, localizada atualmente na área urbana de Recife, PE, foi construída provavelmente no século XVI, antes da invasão holandesa. Atualmente, é conhecido como o açude Apipucos e está presente em um mapa holandês de 1577. A barragem original foi ampliada e reforçada para que pudesse ser construída uma das importantes vias de acesso ao centro de Recife.

Vargas (1977) Ainda acrescenta que as primeiras barragens de terra que o Brasil conheceu foram no Nordeste e que estas foram parte de um programa de combate à seca e foram projetadas com base no empirismo, no início do século passado.

Assim, ao longo da história, as barragens de terra evoluíram em termos de concepção e emprego, passando de estruturas rudimentares para modelos mais sofisticados, como exemplo as barragens de terra zoneadas que vem sendo amplamente utilizadas.

Conforme Almeida (2010), em 1820, Telford introduziu núcleos de argila para assegurar a estabilidade de barragens. Os núcleos de argila, material impermeável tem como função impedir o fluxo de água por baixo da barragem. O enrocamento para a construção de barragens provavelmente começou com os minérios na Califórnia, numa barragem em Serra Nevada, na década de 50, onde sua função neste é proteger os além dos taludes, os canais dos efeitos erosivos. Era a época da mineração de ouro. Naquela região, a rocha era abundante, mas havia uma grande escassez de material terrífico e os mineradores estavam habituados ao uso de explosivos. A associação desses fatores permitiu a construção da primeira barragem de enrocamento.

No contexto atual, as barragens de terra ainda são amplamente utilizadas em todo o mundo, especialmente em locais onde os materiais para construção de concreto são escassos ou caros, além da sua adaptabilidade a locais com vales abertos e ser construtivamente mais econômica em relação as barragens de concreto.

Para Chiossi (2013), uma barragem pode ter sua construção voltada para diversas finalidades, como o aproveitamento hidrelétrico, uso doméstico e industrial da água, ainda é utilizada também na agricultura, irrigação, controle de inundações e pode também controlar a vazão da água para fins de navegação, podendo ter formatos, materiais, comportamento estrutural e projeto hidráulico diferentes que atendam à sua finalidade.

É válido mencionar que entender o funcionamento de uma barragem de terra e enrocamento é crucial na escolha de materiais adequados para a sua construção. Para isto, é necessário que se entenda as características dos materiais escolhidos e seja explorado mais profundamente seus comportamentos através de práticas e ensaios geotécnicos para verificar a viabilidade do uso desses materiais em uma situação real. Faz-se indispensável compreender o contexto histórico da construção de barragens de terra em uma linha de tempo da Antiguidade até os dias atuais, extraindo informações valiosas e fundamentais para constituir o estudo em questão.

Com o aumento da demanda por barragens em regiões de escassez hídrica e a crescente preocupação com a segurança das estruturas, o estudo de barragens de terra com núcleo argiloso torna-se cada vez mais relevante para a engenharia geotécnica e a gestão de recursos hídricos.

Realizar estudos prévios reforçam a importância de ensaios geotécnicos em laboratório, além de pesquisas mais abrangentes e meticulosas sobre qual tipo de material adotar na escolha da construção de uma barragem de terra, com foco em verificar de forma minuciosa para encontrar e analisar as características e propriedades desses materiais, bem como seu desempenho. Dentre os ensaios geotécnicos realizados em laboratório estão a granulometria por sedimentação e peneiramento, limite de liquidez e plasticidade, compactação, índices de vazios máximos e mínimos da areia e brita e permeabilidade da argila.

No projeto de barragens de terra, a seleção adequada dos materiais é fundamental para garantir a estabilidade estrutural, a eficiência e a durabilidade da obra. Uma barragem de terra zoneada é composta por diferentes tipos de materiais, cada um com uma função específica, para atender aos requisitos de segurança, impermeabilidade, drenagem e resistência (GAIOTO, 2003).

Ao longo deste trabalho, serão exploradas as propriedades de cada material e suas justificativas de emprego, analisando se as características obtidas nos ensaios laboratoriais atendem às condições impostas a uma barragem de terra zona. Assim, o estudo se propõe a investigar a eficácia geotécnica dos materiais utilizados na construção de barragens de terra zoneadas, por meio de ensaios geotécnicos e da construção de um protótipo em escala reduzida, simulando condições reais de operação de uma barragem.

2 OBJETIVOS

Neste item, será apresentado os objetivos para a composição deste trabalho.

2.1 Objetivo geral

Verificar se os materiais estudados indicam possibilidade de uso em barragens de terra e realizar montagem de um protótipo de barragem com estes materiais.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar a caracterização dos solos (ensaio de compactação, ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento, limite de liquidez e plasticidade);
- Estudar os índices de vazios máximos e mínimos para areia e brita;
- Fazer um estudo para identificar a permeabilidade da argila;
- Estudar a classificação dos solos utilizados de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e o método Rodoviário;
- Fazer um estudo sobre a montagem de um protótipo de barragem de terra (analisar materiais utilizados).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse item será apresentada uma revisão da literatura empregada com base nos pontos a ser abordado enquanto trabalha.

3.1 Definição barragens de terra

As barragens de terra são frequentemente empregadas devido à disponibilidade de recursos locais, à simplicidade na construção e à habilidade de se ajustar ao terreno. De acordo com Almeida (1993), essas estruturas são majoritariamente constituídas por solos compactados, segmentados em áreas específicas com funções estruturais e hidráulicas, tais como o núcleo impermeável e os filtros de escoamento.

De acordo com Casagrande (1947) e Gaioto (2003), as barragens de terra são formadas por variados tipos de solo, cada um com uma função particular. Normalmente feito de materiais argilosos, o núcleo impermeável é projetado para diminuir a permeabilidade da estrutura e reduzir o fluxo de água através da barragem. Os filtros drenantes e as zonas de transição são aplicados para aprimorar a estabilidade da barragem e regular possíveis fluxos de infiltração, evitando falhas por piping (erosão interna).

Conforme a NBR 13028 (ABNT, 2017) estabelece, os padrões de planejamento, construção e supervisão de barragens de terra, com ênfase na relevância da escolha ideal de materiais e da execução dos estudos geotécnicos detalhados, considerando aspectos, tais como a permeabilidade e a compacidade dos solos. Estudos como o de Marque Filho et al. (2006) evidenciam a importância da compactação correta, a fim de assegurar a estabilidade da estrutura da barragem.

Um dos benefícios mais significativos das barragens de terra é a utilização de materiais locais, diminuindo os gastos com transporte e compra de materiais. Segundo Gaioto (2003), as barragens de terra também são altamente adaptáveis a diferentes condições geológicas e topográficas, sendo adequadas para uma ampla variedade de locais e climas. Além disso, como enfatizado por Lemos (2014), este tipo de barragem demostra maior tolerância a assentamentos diferenciais, uma característica importante em regiões de solos menos homogêneos.

Os desafios principais na construção de barragens de terra envolvem o controle efetivo da permeabilidade e a mitigação de problemas como a erosão interna (piping). De acordo com Terzaghi et al. (1943), infiltrações em excesso podem colocar em risco a

estabilidade da estrutura, em especial quando o nível do reservatório tem grandes dimensões. Richards e Reddy (200) ainda destacam o quanto são relevantes os sistemas de drenagem interna que sejam planejados de forma adequada, em conjunto com o uso de filtros, que por sua vez previnem a ultrapassagem de partículas finas, assim diminuindo o risco de erosão interna.

3.2 Tipos de barragem de terra

As barragens de terra são categorizadas conforme a organização dos materiais empregados e suas respectivas funções na construção. Cada categoria possui traços particulares que satisfazem diversas exigências geotécnicas e hidráulicas. A determinação do tipo apropriado é influenciada por elementos como a acessibilidade dos materiais, os custos, a configuração do terreno e o propósito da barragem. Com isto, os tipos de barragem são:

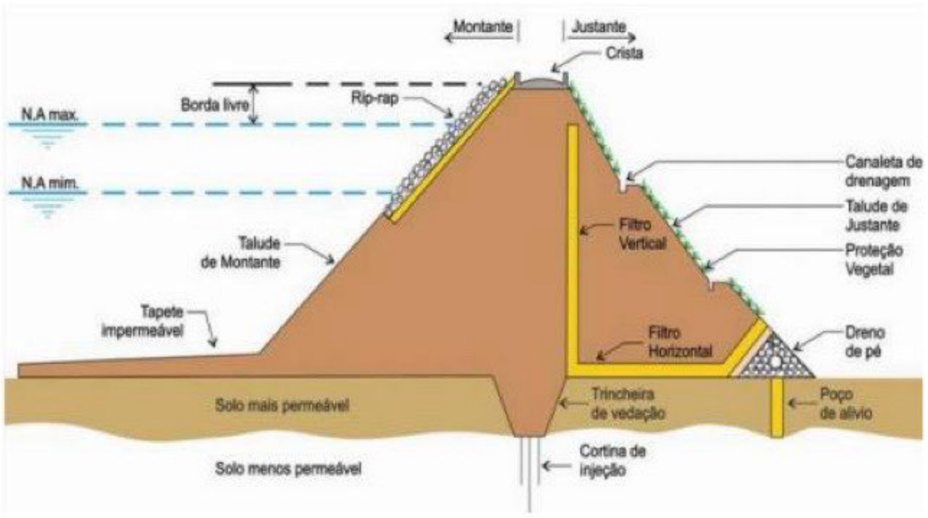
3.2.1 Barragem homogênea

As barragens de terra feitas com aterro homogêneo são elaboradas a partir de um único tipo de solo. De acordo com a ICOLD (2011), essas estruturas são as mais frequentes, especialmente devido ao fato de que sua construção aproveita materiais originados das escavações, o que minimiza a necessidade de tratamento. As represas homogêneas são principalmente utilizadas em regiões onde há grande disponibilidade de solos coesivos.

Nas barragens homogêneas, a infiltração da água pela estrutura é regulada pela drenagem interna, incluindo filtros ou canais de relevo na base, conforme citado por Richards e Reddy (2007).

A falta de drenagem adequada pode levar à erosão interna (dutos), o que põe em risco a segurança da barragem, conforme ilustrado abaixo (Figura 1).

Figura 1 – Barragem de terra homogênea.



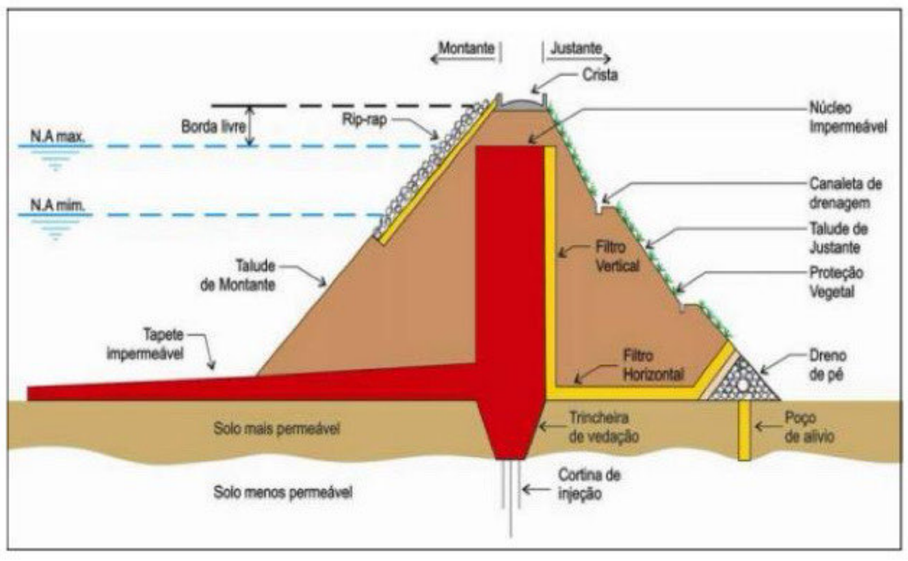
Fonte: Carvalho (2011).

3.2.2 Barragem zoneada

As barragens de terra zoneadas constituídas por diferentes tipos de terra distribuídos em áreas distintas, de acordo com suas funções. Esta configuração melhora a segurança e a eficiência hidráulica da barragem. Marques Filho et al. (2006) afirma que núcleo central, na área de captação de uma barragem de terra é composto por um material impermeável, no geral de argila. Os seus taludes são constituídos por solos mais permeáveis, como areia e cascalho, nas quais podem atuar como filtros ou áreas de transição.

Barragens deste tipo podem proporcionar um controle melhor do fluxo da água e da drenagem interna, minimizando o risco de possíveis inundações. As zonas de transição entre o núcleo impermeável e as camadas laterais ajudam a distribuir tensões e evitar trincas, segundo Terzaghi (1943). É uma das barragens mais utilizadas em grandes obras devido à sua durabilidade e capacidade de adaptação a diferentes condições geotécnicas, ilustrada abaixo (Figura 2).

Figura 2 – Barragem de terra zoneada.



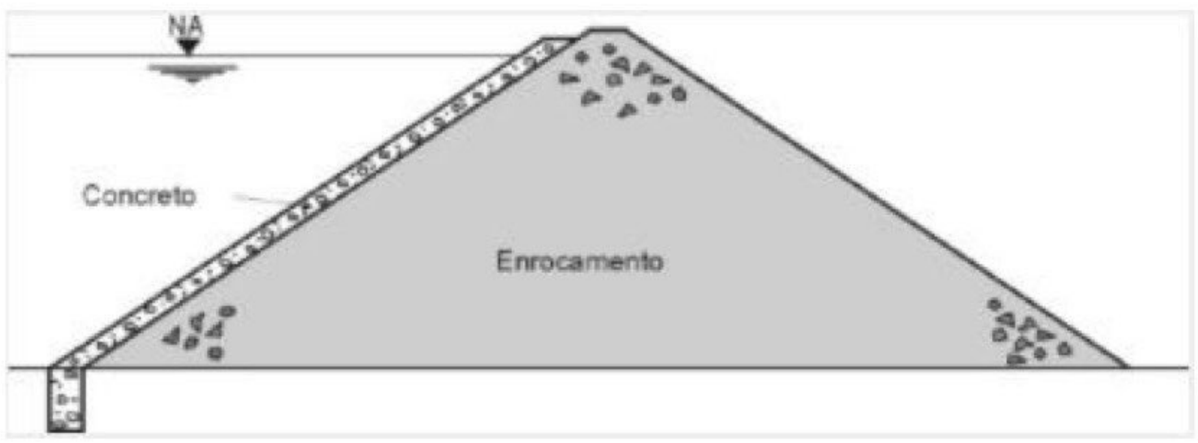
Fonte: Carvalho (2011).

3.2.3 Barragem com revestimento

Locais onde o material disponível não é adequado para constituir um núcleo impermeável, se pode escolher a construção de uma barragem com revestimento impermeável. Conforme o ICOLD (2011), barragens deste tipo fazem uso de materiais como geomembranas, betume ou concreto para fazer o revestimento da superfície da barragem, como forma de garantir sua impermeabilidade.

Este revestimento tem como objetivo criar uma barreira contra a infiltração da água, assim permitindo que os materiais locais de menor qualidade sejam usados na construção do copo da barragem. Todavia, Lemos (2014) destaca a necessidade de monitoramento contínuo do revestimento, visto que falhas ou danos podem acarretar o comprometimento da estrutura, conforme representado abaixo (Figura 3).

Figura 3 – Barragem com revestimento.



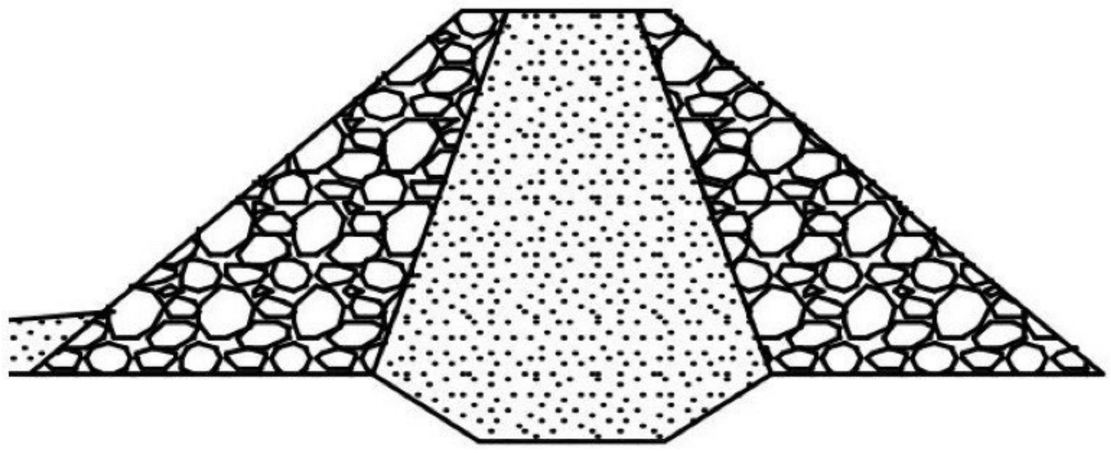
Fonte: Massad (2010).

3.2.4 Barragem de enrocamento com núcleo impermeável

As barragens de enrocamento são compostas por blocos de rocha de grande dimensão, sendo utilizadas em regiões montanhosas ou onde o solo não é adequado para barragens homogêneas ou zoneadas. O núcleo impermeável, geralmente de argila ou de geomembrana, é localizado no centro da estrutura, enquanto as rochas circundantes fornecem a estabilidade necessária.

Terzaghi (1963) e Richards e Reddy (2007) enfatizam que as barragens de enrocamento com núcleo impermeável têm a vantagem de resistir a grandes forças de cisalhamento e acomodar grandes volumes de água. No entanto, requerem cuidados adicionais na compactação e construção do núcleo para evitar infiltrações, tal como a Figura 4.

Figura 4 – Barragem de enrocamento com núcleo impermeável.



Fonte: Agência Nacional de Águas (2016).

3.2.5 Barragem de terra com cota variável

Uma variante das barragens de terra zoneadas são as barragens com cota variável, que têm uma geometria que varia ao longo de sua altura, conforme descrito por Beck e Branco (2017). Esse tipo é usado em locais com solos heterogêneos, permitindo que diferentes materiais sejam utilizados de acordo com a profundidade e as características do solo. A cota variável é especialmente vantajosa em regiões onde a fundação apresenta variações de resistência.

3.3 Elementos de barragens de terra

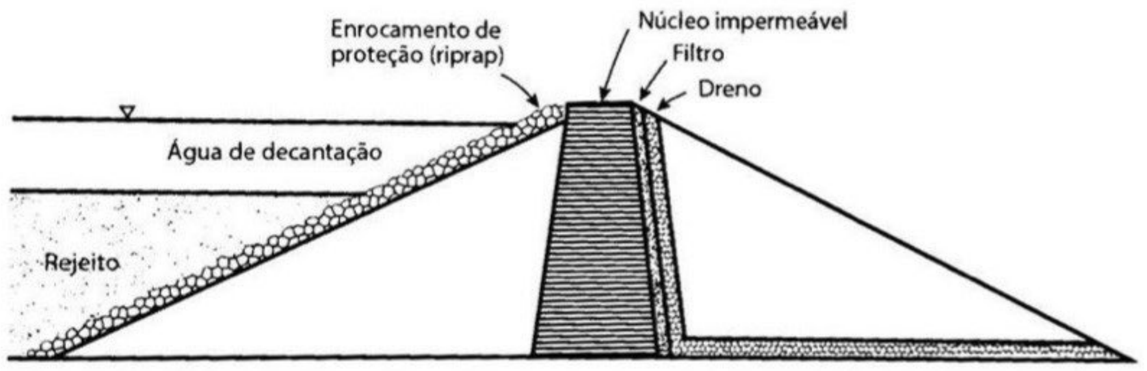
As barragens de terra são compostas por diversos elementos, cada um com funções específicas que garantem a estabilidade estrutural e o controle da água. Estes componentes são projetados de forma a proporcionar segurança à estrutura e controlar a infiltração. Os principais elementos de uma barragem de terra incluem:

3.3.1 Núcleo impermeável

O núcleo impermeável é um dos principais componentes, projetado para minimizar a passagem de água através da barragem. Geralmente é constituído de solos argilosos compactados, com alta plasticidade e baixa permeabilidade, conforme relatado por Vargas (1977). Este núcleo centraliza a retenção de água e impede que grandes volumes de água se infiltrem no corpo da barragem, atuando como uma barreira física contra a percolação.

Segundo Terzaghi et al. (1996), a qualidade do material do núcleo, sua compactação e a espessura são fatores cruciais para garantir a estabilidade contra o fenômeno de piping, que pode levar à falha catastrófica de uma barragem. A correta seleção de solos para o núcleo impermeável e o controle rigoroso da compactação durante a construção são essenciais para evitar a erosão interna, conforme representado na Figura 5.

Figura 5 – Núcleo impermeável de uma barragem representado por linhas horizontais.



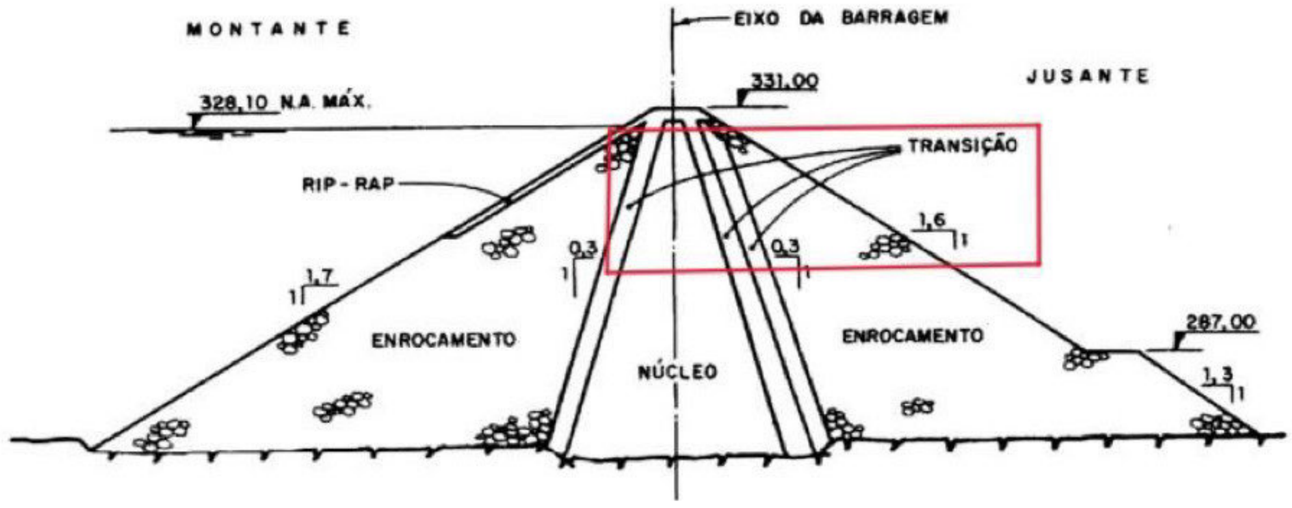
Fonte: Modificado de Vick (1990).

3.3.2 Zonas de transição

As zonas de transição de uma barragem de terra se localizam entre as camadas externas e permeáveis da barragem e o núcleo impermeável. Estas são constituídas por materiais que possuem uma permeabilidade intermediária, como areias finas e siltes. As zonas de transição promovem uma transição de tensões de forma gradativa, com a finalidade de evitar fissuras ou trincas capazes de comprometer a integridade da estrutura.

Estas zonas de transição também têm como função proteger o núcleo impermeável da erosão interna, pois elas evitam a passagem de partículas finas para o filtro, como forma de preservar a estabilidade hidráulica da barragem, conforme a Figura 6.

Figura 6 – Representação das zonas de transição de uma barragem de terra.



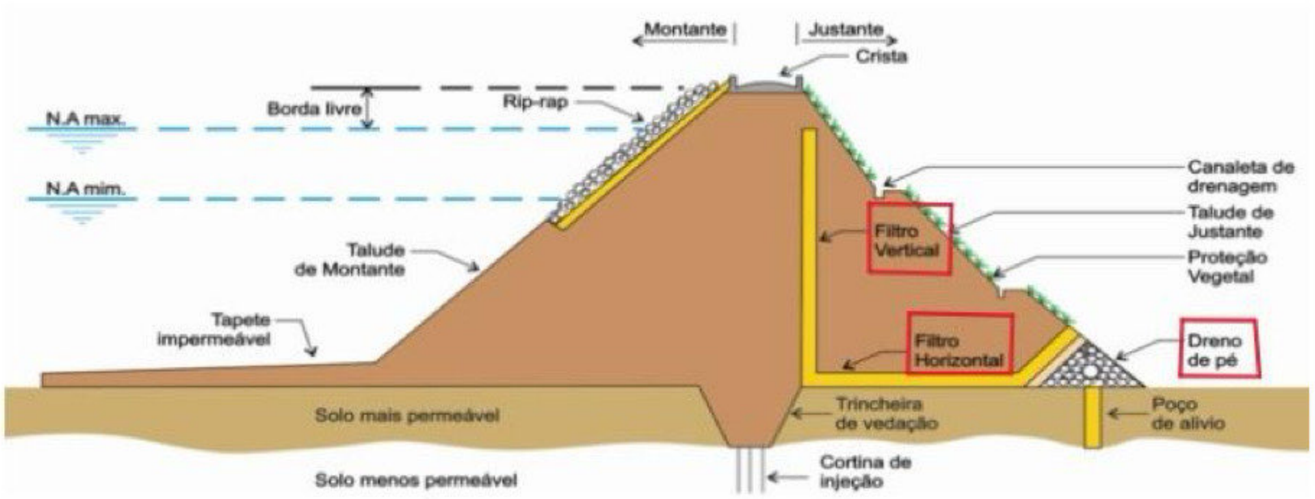
Fonte: Canamabra (1968).

3.3.3 Filtros e drenos

Os filtros e drenos de uma barragem de terra tem um papel crucial no controle do fluxo de água. Estes têm como finalidade permitir o fluxo de água de forma controlada por meio do corpo da barragem, em paralelo a retenção das partículas finas do solo, visando evitar a erosão interna. Sherard (1973) diz que os filtros são formados por materiais granulares, como citado anteriormente, areia grossa e cascalho, nos quais permitem o fluxo de água, ao mesmo tempo que bloqueia a passagem de partículas menores.

Drenos são elementos essenciais para a coleta e direção da água que percola para fora da estrutura da barragem, como forma de garantir a estabilidade. Conforme Terzaghi el al. (1996) destaca e reforça a ideia de Richards e Reddy (2007), sistemas de drenagem projetados da forma correta para evitar o acúmulo de água são essenciais para a prevenção de erosão interna, como mostra a Figura 7.

Imagem 7 – Representação dos filtros e drenos de uma barragem de terra.



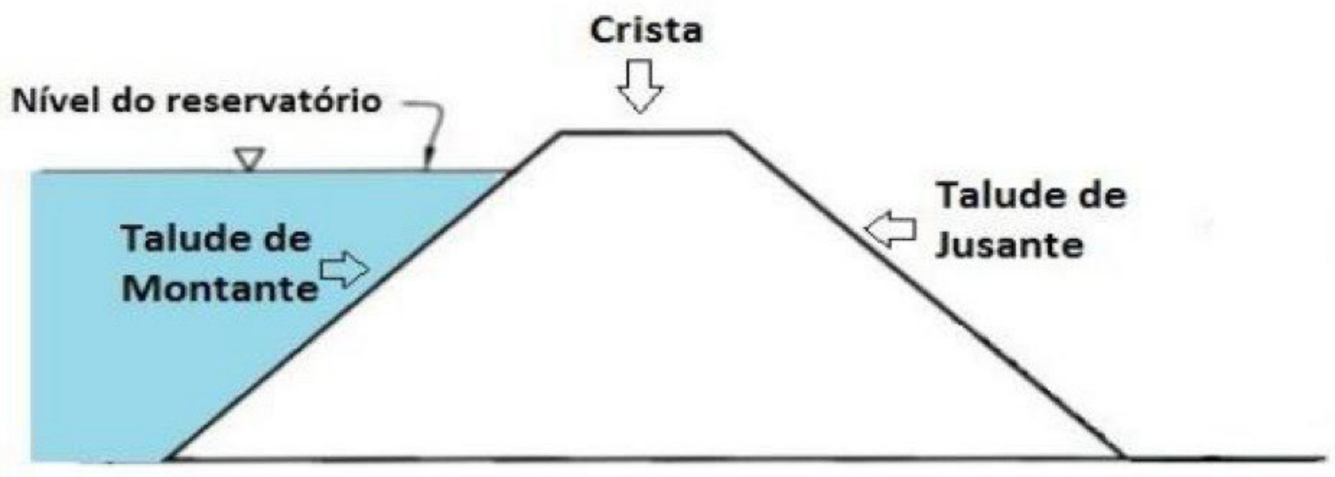
Fonte: Carvalho (2011).

3.3.4 Taludes de montante e jusante

Os taludes são as faces inclinadas da barragem. O talude de montante está voltado para o reservatório e requer proteção contra a erosão causada por ondas e variações no nível da água. Segundo Kutzner (1997), a proteção pode incluir enrocamento ou revestimentos de concreto. O talude de jusante, por outro lado, é responsável por dissipar as tensões e suportar o peso da estrutura. A inclinação do talude em questão é projetada como forma de propor a estabilidade, minimizando o risco de deslizamento.

Vick (1990) destaca que a inclinação dos taludes, em especial o talude de jusante pode ser calculado com base em fatores como altura, características do solo e cargas de água da barragem, de acordo com a ilustração da Figura 8.

Figura 8 – Representação de taludes de montante e jusante.



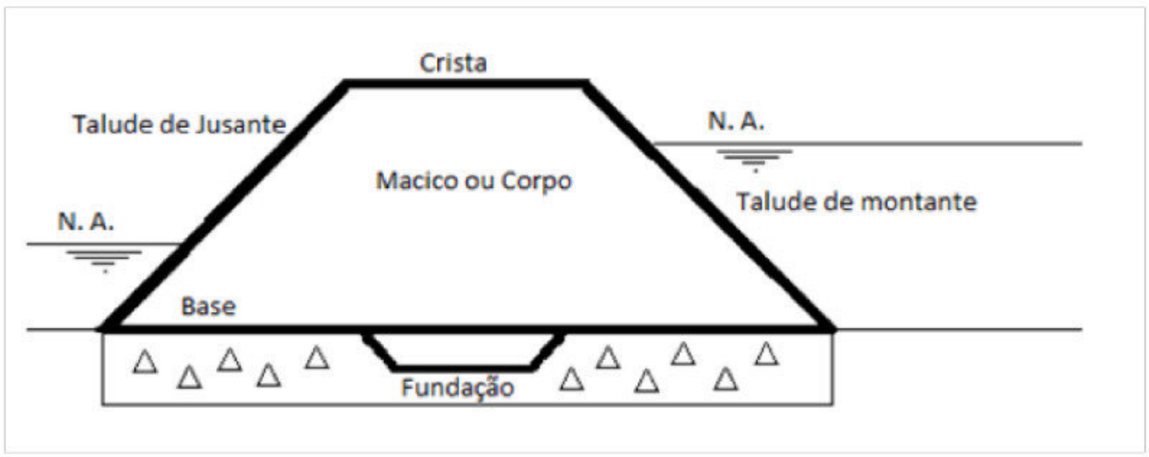
Fonte: IMASUL (2016).

3.3.5 Corpo de barragem

O corpo da barragem por sua vez inclui todos os elementos e materiais que compõem a estrutura. Tezarghi et al. (1996) diz que o corpo da barragem é projetado para que possa suportar tanto o peso da água armazenada quanto as forças hidrostáticas que são aplicadas sobre ele.

Por isso, é fundamental a escolha de materiais adequados e que seja feita a compactação correta, com o intuito de evitar problemas de instabilidade, bem como deslizamentos, demonstrado na Figura 9.

Figura 9 – Representação do corpo de uma barragem de terra.



Fonte: Adaptado de Chiossi (2013).

3.3.6 Rip-rap

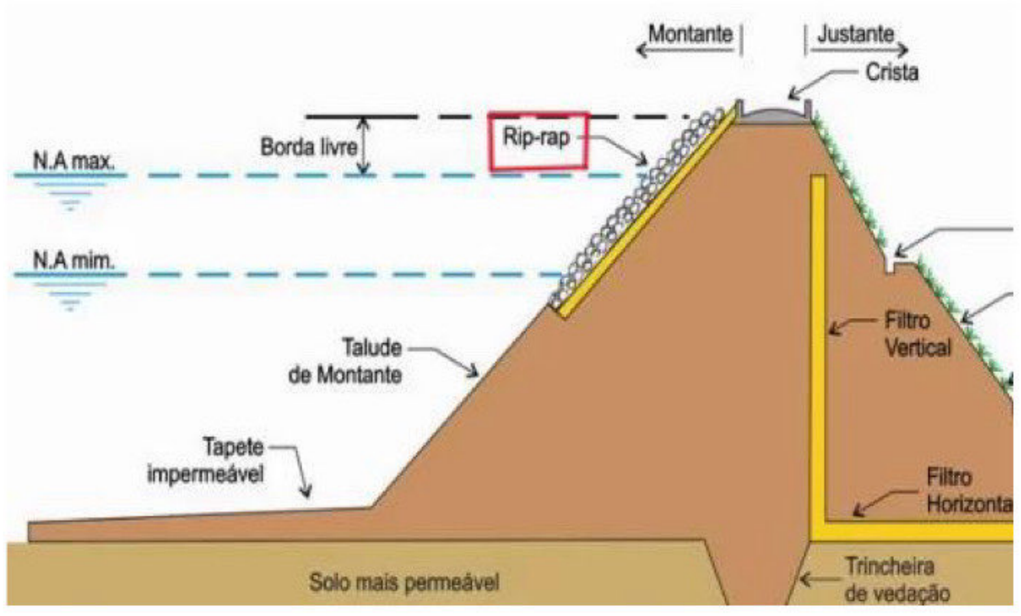
O rip-rap em uma barragem de terra é utilizado para proteger as encostas, prevenindo da erosão causada por intempéries e correntes de água. O sistema se dá por meio da aplicação de blocos de roca ou pedras nas áreas em que são expostas ao fluxo de água, no qual forma uma camada resistente, ajudando a dissipar a energia hidráulica para proteger a estrutura da barragem

É importante que na escolha dos materiais para compor o rip-rap seja levado em conta fatores como o tamanho e peso das pedras, além da resistência à erosão. É crucial que se faça o dimensionamento adequado, posicionando as pedras maiores na parte inferior, como forma de garantir a estabilidade e as pedras menores depositadas nas camadas superiores.

A USACE (1989) reforça que a instalação do rip-rpa deve ter uma preparação cuidadosa da base, que por sua vez deve ser limpa de todo o solo solto e compactado. A ordem das pedras deve assegurar que se tenha uma boa interligação entre elas, de forma que aumente a eficácia da camada que protege da erosão.

Além de proteger, o rip-rap também pode contribuir com a biodiversidade do local, podendo criar habitats para espécies aquáticas e terrestres, (FEMA, 2005), (Figura 10).

Figura 10 – Identificação do Rip-rap.



Fonte: Carvalho (2011).

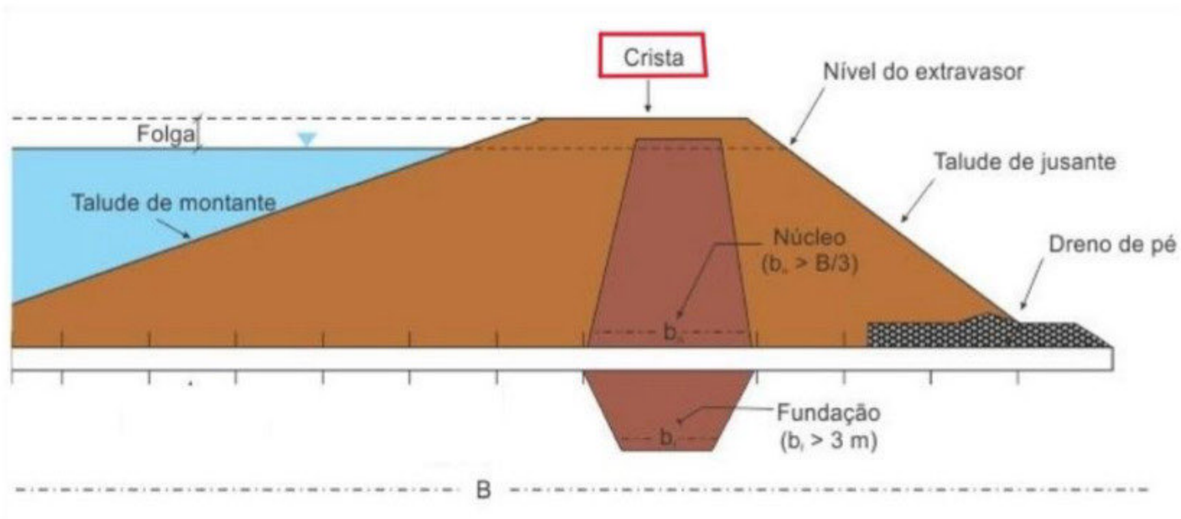
3.3.7 Crista

Barragens ainda dispõem de uma crista. A crista de uma barragem de terra é um elemento que faz parte da estrutura e é de suma importância, sendo essencial para a funcionalidade estrutural e garantia de estabilidade. Conforme Terzaghi el al. (1996), é indispensável que a crista tenha seu dimensionamento adequado para suportar além das cargas verticais que são resultado do peso do material, as forças laterais que podem ser provenientes de eventos climáticos extremos. Ainda, a crista tem que permitir uma drenagem eficiente de água pluviais, de forma que seja evitado o acúmulo que poderá comprometer a integridade da barragem. A largura normal da crista varia entre 3 e 10 metros. Essa variação se dá de acordo com os requisitos e condições do projeto e geotecnia do local na qual a barragem será executada.

A construção da crista tem como aspecto importante a sua impermeabilização, com a função de prevenir a infiltração de água no núcleo da barragem, diminuindo o risco de falhas estruturais e erosão interna (USACE, 2003). Além do mais, a crista deve ser equipada com dispositivos de segurança para prevenir acidentes, como guarda-corpos, assim permitindo que pessoas transitem sobre a estrutura (ICOLD 2007).

É indispensável a manutenção regular da crista, como forma de garantir a integridade da barragem no decorrer do tempo. Também é crucial inspeções e reparos de acordo com a necessidade (FEMA, 2005), (Figura11).

Figura 11 – Identificação da crista de uma barragem de terra.



Fonte: Agência Nacional de Águas (2016).

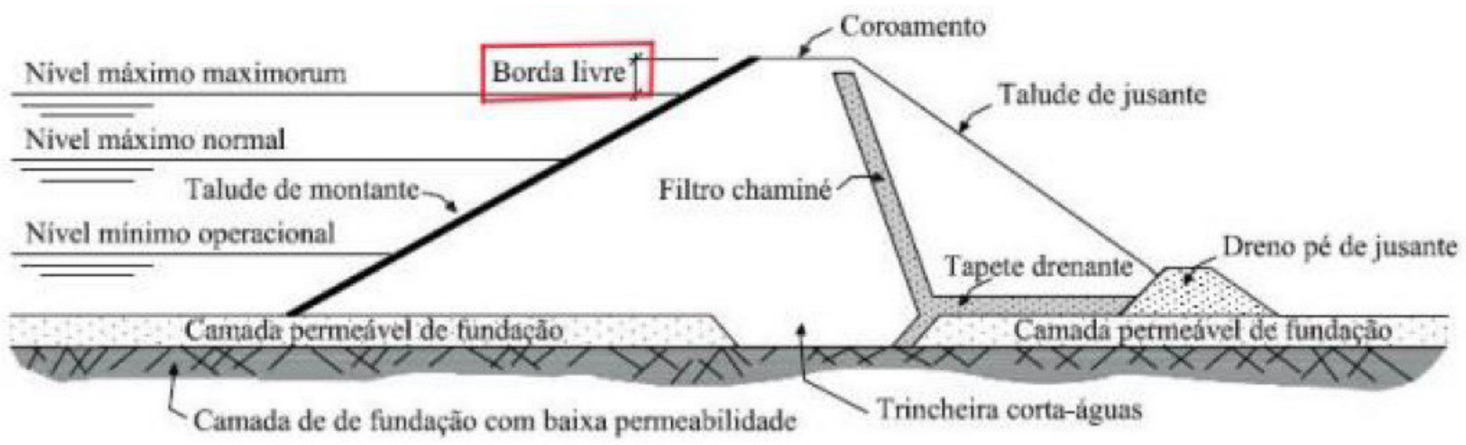
3.3.8 Borda livre

Além da crista, barragens possuem uma borda livre. A borda livre (Figura 12) de uma barragem de terra é a altura da crista acima do nível máximo do reservatório. É uma característica essencial para assegurar que a estrutura esteja segura, pois impede que a água transborde, causando erosão nas faces da barragem, podendo ocasionar uma falha na barragem (Chow, 1959; USACE, 2003). A borda livre deve ser projetada com base na análise de eventos hidrológicos extremos, levando em conta fatores como chuvas intensas e uma cheia no reservatório.

É importante que a largura da borda livre seja suficiente para que acomode a dissipação de energia das ondas formadas no reservatório e garantir a segurança em situações de cheia (ICOLD, 2007). Outrossim, a borda deve se manter livre de vegetação e outras estruturas que possam comprometer sua função e integridade (USDA, 2007).

É fundamental que se faça um monitoramento regular, a fim de garantir que não haja acúmulo de materiais como sedimento que sejam capazes de afetar a sua capacidade de prevenir transbordamentos, conforme a Figura 12.

Figura 12 – Identificação da borda livre.



Fonte: Agência Nacional de Águas (2015).

3.3.9 Fundações

As fundações de uma barragem são responsáveis por suportar a estrutura e transferir seu peso para o solo. Skempton (1953) afirma que as fundações devem ser projetadas para resistir a deformações e infiltrações. A qualidade das fundações é determinante para a estabilidade global da barragem, e a preparação adequada do solo da fundação, como a remoção de camadas fracas ou a injeção de materiais estabilizantes, é essencial para minimizar riscos de assentamentos ou falhas.

Além disso, em casos em que a permeabilidade do solo é um problema, cortinas de impermeabilização ou cortinas de injeção são utilizadas para evitar a infiltração excessiva de água através da fundação, conforme descrito por Bromhead (1992).

3.3.9.1 Tratamento de fundações

Meyerhof (1956) diz que é crucial que haja um tratamento de fundações na construção de barragens de terra, uma vez que a estabilidade da estrutura defende demasiadamente das características e da qualidade do solo subjacente. O tratamento de

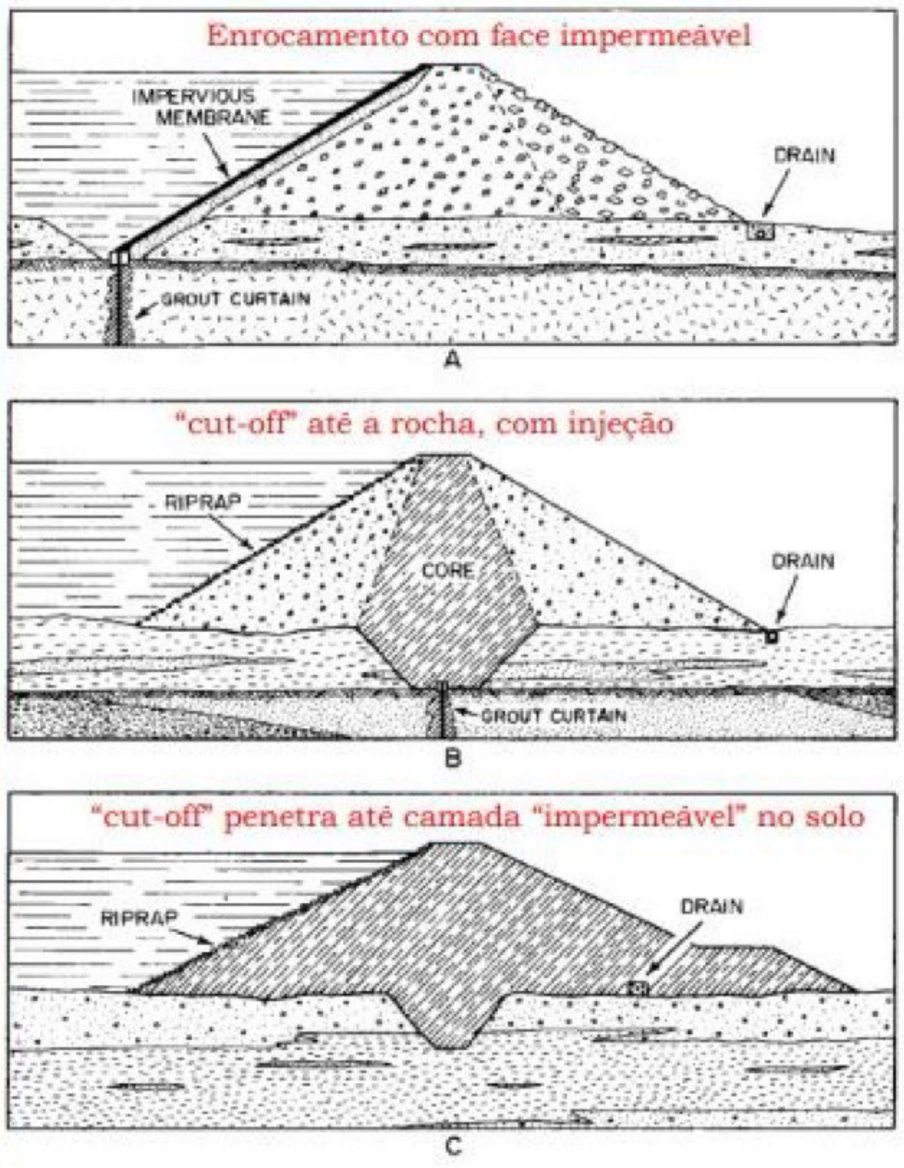
fundações tem como objetivo principal garantir que a fundação seja suficientemente capaz de suportar as cargas da barragem, diminuindo os riscos de falhas e deformações.

A caracterização geotécnica do solo, envolvendo ensaios de sondagem é o primeiro passo para o tratamento de fundações, além da análise granulométrica e avaliação da permeabilidade. Assim, é possível determinar o tipo de tratamento necessário. Dentre as técnicas comuns, se destaca a compactação do solo, injeção de materiais cimentícios, além da execução de drenos para controlar a permeabilidade, conforme descrito por Terzaghi e Peck (1967).

Se faz indispensável o uso de drenos em solos saturados, onde a poropressão pode afetar de forma negativa a estabilidade da barragem. A instalação e drenos verticais e horizontais podem ser instalados para facilitar o escoamento da água e reduzir de forma significativa a pressão interna no solo, conforme estabelecido pela NBR 13028 (2017).

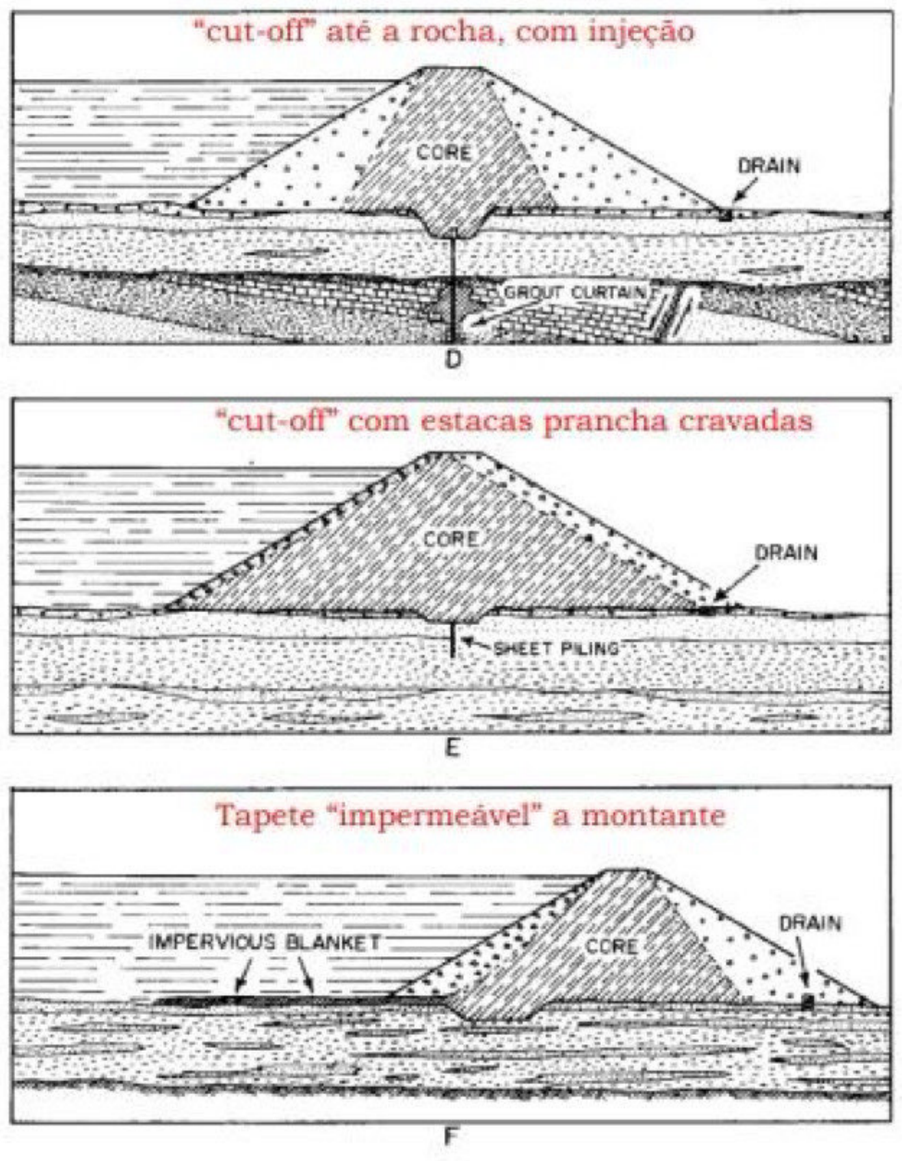
Conforme discutido por Ferguson (2010), torna-se fundamental o monitoramento contínuo das condições da fundação durante a fase de construção e operação da barragem, fazendo uso de instrumentos geotécnicos para detectar possíveis variações nas tensões ou movimentações, retratado nas figuras 13 e 14.

Figura 13 – fundações de barragens de terra.



Fonte: Wahlstrom (1974).

Figura 14 – Cut-off e tapete.



Fonte: Wahlstrom (1974).

3.4 Distribuição granulométrica dos materiais

A NBR 6502 (ABNT, 1995) estabelece definições e categorias para os solos, fundamentadas na sua distribuição de tamanhos de partículas, que representa a proporção de diferentes dimensões contidas em uma amostra de solo. Para descrever essa distribuição, os solos são organizados com base em suas frações mais abundantes: argila (partículas com diâmetro inferior a 0,002 mm), silte (entre 0,002 mm e 0,06 mm), areia (de 0,06 mm a 2 mm) e cascalho (de 2 mm a 60 mm). A avaliação granulométrica pode ser feita por meio de peneiramento (para partículas maiores) e sedimentação (para partículas finas, como argila e silte). A curva de distribuição granulométrica é aplicada para analisar o comportamento mecânico do solo, incluindo sua permeabilidade e compactação, aspectos essenciais em obras de engenharia civil, como em barragens e fundações, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição granulométrica.

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	
NBR 6502 (1995)	
Classe	**Diâmetro; d (mm)**
Bloco de rocha	$d > 1000$
Matacão	$200 < d \leq 1000$
Pedra	$60 < d \leq 200$
Pedregulho	$2 < d \leq 60$
Areia	$0,6 < d \leq 2$
Areia média	$0,2 < d \leq 0,6$
Areia fina	$0,06 < d \leq 0,2$
Silte	$0,002 < d \leq 0,06$
Argila	$d \leq 0,002$

Fonte: NBR 6502 (ABNT, 1995).

3.5 Métodos de classificação

Neste item, será classificado pelos métodos SUCS e Rodoviário todos os ensaios geotécnicos realizados para a construção deste trabalho.

3.5.1 Classificação pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS)

Conforme Sousa (2006), o sistema de classificação de solos, inicialmente desenvolvido pelo Prof. Casagrande para atender às demandas da construção de aeroportos, hoje é amplamente utilizado em diferentes áreas da engenharia, especialmente na geotecnia, em projetos de barragens de terra. Esse método classifica os solos usando combinações de letras, como mostrado no Quadro 1. As cinco primeiras letras identificam o tipo principal de solo, enquanto as outras quatro fornecem informações adicionais sobre suas características. Por exemplo, SW indica areia bem graduada, e CH refere-se a argila de alta compressibilidade. O Quadro 1 apresenta a classificação dos solos pelo método SUCS.

Quadro 1 – Terminologia do Sistema Unificado.

TIPO DO SOLO	DADOS DO SOLO
G	Pedregulho
S	Areia
M	Silte
C	Argila
O	Solo Orgânico
W	Bem Graduado
P	Mal Graduado
H	Alta Complexibilidade
L	Baixa Complexibilidade
Pt	Turfas

Fonte: Sousa (2016).

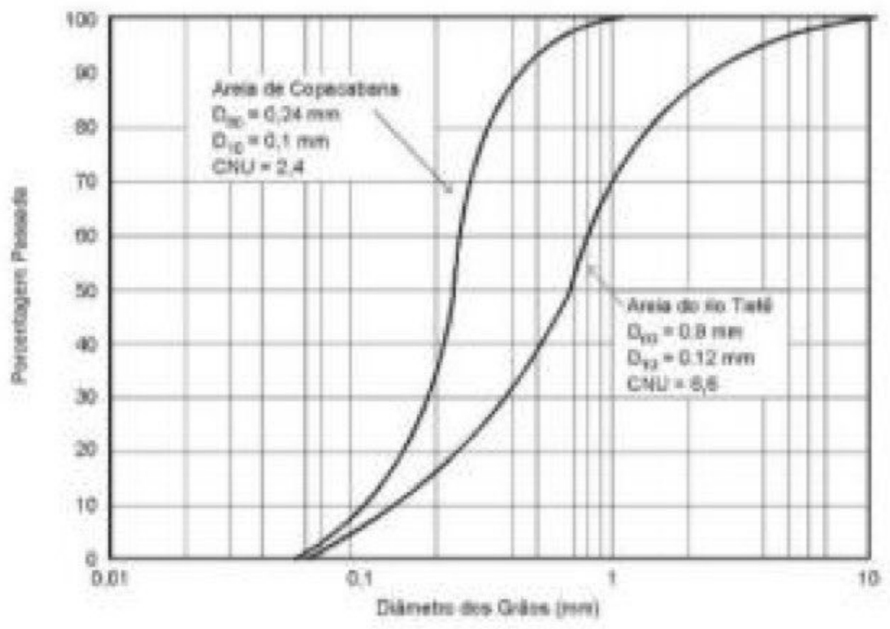
A classificação do solo é realizada com base na tabela do Sistema Unificado e na porcentagem de finos presentes, sendo que os finos correspondem ao material que passa pela peneira nº 200 (0,075 mm). Esses dados são obtidos por meio do ensaio de granulometria.

De acordo com Sousa (2016), quando a porcentagem de finos for inferior a 50%, o solo é classificado como de granulação grosseira, identificado pelas letras G (pedregulho) ou S (areia). Por outro lado, se a porcentagem de finos for superior a 50%, o solo é classificado como de granulação fina, utilizando-se as letras M (silte), C (argila) ou O (solo orgânico).

3.5.1.1 Solos granulares

Se o solo for granular, ele será classificado como areia (S) ou pedregulho (G), dependendo de sua composição. Se a porcentagem de finos que passa pela peneira nº 200 for inferior a 5%, será necessário verificar a distribuição granulométrica do solo. Solos granulares podem ser classificados como bem graduados, quando há predominância de partículas de um diâmetro específico, ou mal graduados, caso apresentem grãos distribuídos em uma faixa mais ampla de diâmetros (Sousa, 2016), como ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Granulometria de areia bem e mau-graduada.



Fonte: Sousa (2016).

Solos granulares tem suas características descritas pelo coeficiente de não uniformidade, que é definido pela Equação (1), de Sousa (2016):

$$\text{Eq: } CNU = \frac{D60}{D10} \qquad (1)$$

Sousa (1026), ainda diz que o coeficiente D60 representa o diâmetro abaixo do qual se encontram 60% do peso das partículas, enquanto o coeficiente D10 corresponde ao diâmetro em que 10% das partículas estão presentes na curva granulométrica. Além disso, existe o coeficiente de curvatura (CNU), menos utilizado, que está relacionado à forma da distribuição granulométrica (Sousa, 2016). coeficiente é dado por meio da Equação (2) :

$$\text{Eq: } CC = \frac{(D30)^2}{D10\,.D60} \qquad (2)$$

De acordo com Sousa (2016), quando um solo granular contém mais de 12% de finos, a uniformidade granulométrica deixa de ser uma característica secundária, pois as propriedades desses finos passam a ter grande importância. Dessa forma, solos como

pedregulho ou areia são classificados secundariamente como argilosos (SC ou GC) ou siltosos (SM ou GM), com base nos índices de consistência apresentados na Carta de Plasticidade.

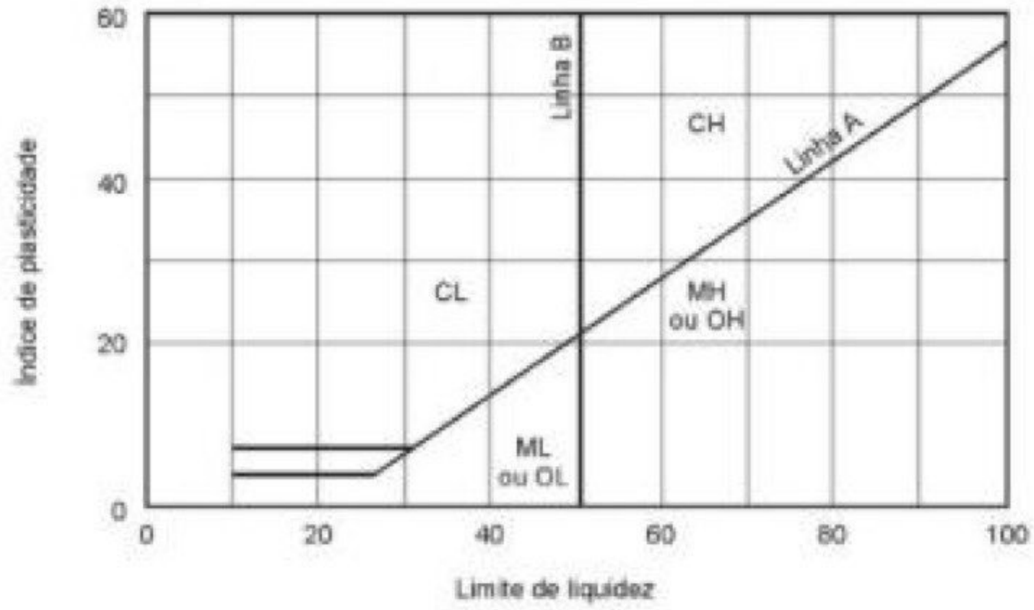
Além disso, para solos granulares com uma porcentagem de finos entre 5% e 12%, é recomendável considerar tanto as propriedades dos finos quanto classificações intermediárias. Por exemplo, pode-se obter uma classificação como SP-SC, que indica uma areia mal graduada e argilosa.

3.5.1.2 Solos com granulometria fina (argilas e siltes)

No caso dos solos, foram realizados a coleta e a análise. Quando a fração fina do solo é predominante, ele é categorizado como argila (C), silte (M) ou solo orgânico (O). Contudo, essa categorização não se baseia apenas na porcentagem obtida das frações granulométricas de silte ou argila. Como já mencionado, o que determina o comportamento do solo não é apenas o teor de argila, mas sim a combinação desse teor com sua atividade.

Ao analisar os índices e o comportamento do solo, observei que, segundo Casagrande, ao plotar o valor do índice de plasticidade (IP) do solo em relação ao limite de liquidez (LL) em um gráfico, os solos com comportamento argiloso são representados por pontos localizados acima de uma reta inclinada, chamada de linha A (Sousa, 2016). Por outro lado, os solos orgânicos, mesmo quando argilosos, e os solos siltosos são representados por pontos localizados abaixo da linha A, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Carta de plasticidade



Fonte: Sousa (2016).

3.5.2 Classificação pelo método Rodoviário

De acordo com Sousa (2016), o sistema de classificação pelo método rodoviário é amplamente utilizado na engenharia como um todo e foi inicialmente proposto nos Estados Unidos. Esse método é fundamentado na granulometria, além dos limites de Atterberg, que incluem o limite de liquidez, o limite de plasticidade e o limite de contração do solo. Para a classificação, será considerada a porcentagem do material obtida no ensaio de granulometria que passou pela peneira n° 200 (0,075 mm).

Apenas os solos com granulação grosseira, que apresentem menos de 35% de material que passou por essa peneira, serão considerados, ao contrário dos 50% utilizados na classificação pelo Método Unificado. Esses solos podem ser, então, classificados em grupos, sendo eles A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6 e A-7, conforme ilustrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação pelo método Rodoviário.

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 / A-7-6
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)	6 máx.		NP	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: Senço (1997).

No qual se tem:

- A-1a: Pedregulhos bem graduados na Sistema Unificado;
- A-1b: Areia bem graduada na Sistema Unificado;
- A-3: Areias finas mal graduadas no Sistema Unificado;
- A-2: Areias ou pedregulhos com finos;
- A-4 e A-5: Siltes;
- A-6 e A-7: Argilas.

No processo de classificação, Senço (1997) diz que os dados em questão serão lidos e interpretados da esquerda para a direita, utilizando um método de eliminação. O primeiro grupo encontrado à esquerda que satisfaça os dados será o grupo a ser considerado. Se não for

possível identificar o grupo com base no número das peneiras utilizadas ou nos limites de liquidez ou plasticidade, utilizaremos o índice de grupo, que será calculado por meio da formulação descrita na Equação (3):

$$Eq: IG = 0{,}2 \cdot a + 0{,}005 \cdot a \cdot c + 0{,}01 \cdot b \cdot d \qquad (3)$$

Onde se tem:

- p: teor de silte + argila do solo, que é a porcentagem que passa na peneira de nº 200.
- a = p – 35 (se p > 75%, se adota 75 e se p < 35%, se adota 35);
- b = p – 15 (se p > 55%, se adota 55 e se p < 15%, se adota 15);
- c = LL – 40 (se LL > 60%, se adota 60 e se LL < 40%, se adota 40);
- d = IP – 35 (se IP > 30%, se adota 30 e se IP < 10%, se adota 10);

3.6 Critério de Terzaghi

Conforme Sousa (2016), o dimensionamento dos filtros da barragem de terra, é feito conforme o critério de Terzaghi, que estabelece relações entre as características granulométricas do solo protegido e do filtro para garantir tanto a retenção de partículas quanto a permeabilidade adequada. São dois critérios, expressos nas Equações 4 e 5:

$$Eq: D15\ filtro > 5 \cdot D85\ solo \qquad (4)$$

$$Eq: D15\ filtro < 5 \cdot D85\ solo \qquad (5)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo teve como objetivo avaliar a adequação de diferentes materiais para a construção de uma barragem de terra zoneada, por meio da realização de ensaios geotécnicos e da construção de um protótipo em escala reduzida. A metodologia foi dividida em duas partes principais: ensaios geotécnicos para caracterização dos materiais e construção e de um protótipo de barragem.

4.1 Materiais para ensaios geotécnicos

O modelo foi adotado para fins analíticos e os materiais que a compõem são areia, brita, argila e solo laterítico. Sendo a areia para a construção de filtros vertical e horizontal, britas para simular o enrocamento e dreno de pé, argila para compor o núcleo e solo laterítico para taludes de montante e jusante.

Os materiais que constituem este estudo foram escolhidos a fim de descobrir suas características físicas, além analisar como cada um, em sua função específica se comporta dentro da estrutura de uma barragem de terra, conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 – Seleção dos materiais.

Estoque de britas.



a) Fonte: Autoria própria (2024).

Argila selecionada.



b) Fonte: Autoria própria (2024).

Solo laterítico.

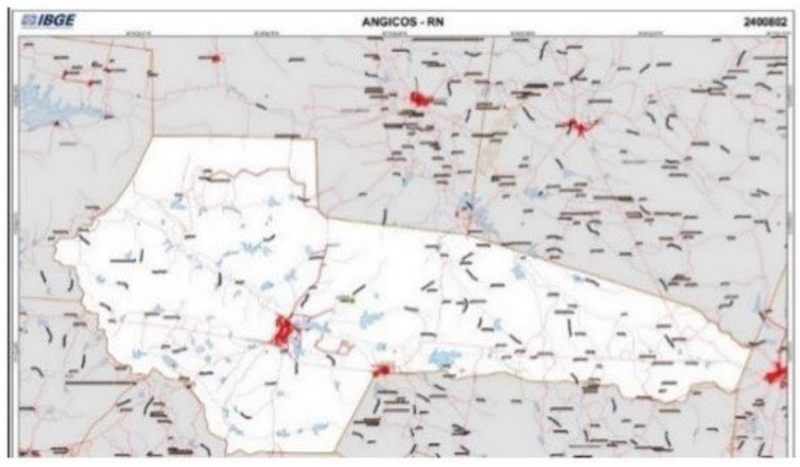


c) Fonte: Autoria própria (2024).

A areia que compõe o filtro de uma barragem de terra deve ter capacidade de reter as partículas finas do núcleo, através do ensaio de granulometria e índices de vazios máximo e mínimo será possível identificar se a que foi escolhida é adequada para compro um filtro ou não. Este aspecto é importante para que se mantenha a integridade do núcleo impermeável.

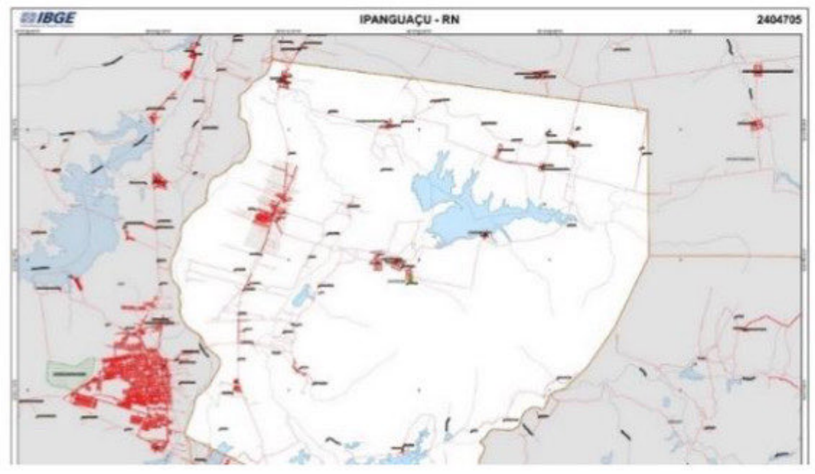
É importante mencionar que a região onde foi realizada esta análise, na cidade de Angicos/RN (Mapa 1), carece de jazidas para a extração da argila. Dessa forma, o material foi recolhido na cidade de Ipanguaçu/RN (Mapa 2), a aproximadamente 45 km da cidade de origem da pesquisa, em uma fábrica cerâmica. Materiais como areia e brita foram recolhidos na Universidade Federal Rural do Semi-Árido campus Angicos.

Mapa 1 - Mapa do município de Angicos/RN.



Fonte: IGBE (2020).

Mapa 2 – Mapa do município de Ipanguaçu/RN.



Fonte: IBGE (2020).

O solo laterítico, caracterizado e recolhido por Lima (2023), foi extraído de uma salina localizada no Município de Grosso/RN (Mapa 3).

Mapa 3 – Mapa do município de Grossos/RN.

Fonte: Lima (2023).

4.2 Ensaios geotécnicos

Os ensaios geotécnicos foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos, seguindo as normas da ABNT, e têm como objetivo determinar as propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados na barragem.

4.2.1 Preparação do material

Para a realização dos ensaios geotécnicos foi necessário a preparação de todo esse material, principalmente da argila. Devido as condições em que estava exposta na cerâmica onde foi coletada, foi realizada a secagem prévia da argila ao ar livre até atingir a umidade higroscópica. Após a secagem completa do material, foi feito o processo de destorroamento no almofariz com o a mão de gral para facilitar a quebra dos torrões, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Solo destorroado no almofariz.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.2 Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

A análise granulométrica, segundo a NBR 7181 (ABNT, 2018), teve como objetivo determinar a distribuição dos grãos de solos, diferenciando-os em frações de areia, silte e argila. Esse ensaio combina dois métodos: peneiramento para solos granulares (como areias) e sedimentação para solos finos (siltes e argilas). É essencial para avaliar a adequação desses materiais na composição do filtro e núcleo impermeável.

4.2.2.1 Peneiramento

O solo seco é passado por uma série de peneiras de diferentes aberturas (Figura 19), permitindo a separação das partículas maiores (areia e pedregulho) de acordo com seu tamanho. O percentual retido em cada peneira é pesado, e calcula-se a fração correspondente em relação ao total.

Figura 19 - Peneiras para ensaio de granulometria por peneiramento.



Fonte: Autoria Própria (2024).

4.2.2.2 Sedimentação

Após a preparação da amostra de solo representativa de 70g de solo seco. Em seguida, a amostra seca foi desagregada cuidadosamente, evitando a destruição das partículas, de modo que as partículas fiquem separadas para o ensaio.

Na sequência, a amostra é misturada com uma solução dispersante, o hexametafosfato de sódio, que tem a função de desagregar as partículas finas, como siltes e argilas, que podem estar aglutinadas. A mistura foi agitada por cerca de 10 minutos com um misturador mecânico para garantir a homogeneidade e a eficiência do dispersante.

Após a mistura, transfere-se a suspensão para uma proveta de 1 litro, completando com água destilada até a marca. A proveta deve ser agitada vigorosamente para garantir a homogeneização da solução, permitindo que o processo de sedimentação ocorra de maneira uniforme.

No processo de sedimentação as partículas maiores decantam mais rapidamente, enquanto as menos (silte e argila) demoram mais tempo para sedimentar. Um densímetro é utilizado para fazer o controle das partículas em suspensão. A primeira leitura é feita após 40 segundos do início do ensaio, para que seja possível estimar o teor das partículas maiores. As demais leituras foram realizadas com um intervalor de 2 horas para fazer a verificação da concentração das partículas, como pode ser observado das Figuras 20 a 23.

Figura 20 – Amostra pesada para a realização do ensaio de sedimentação.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 21 – Amostra misturada com solução dispersante.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 22 – Misturador mecânico.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 23 – Provetas com o material do ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.3 Ensaio de compactação

Após a realização da análise granulométrica, o próximo passo foi determinar a compactação da argila, para garantir a estabilidade. De acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2020), o ensaio de compactação busca determinar a densidade máxima seca e o teor de umidade ótimo do solo. Estes parâmetros são fundamentais para garantir a adequação do material utilizado em obras de barragens de terra. Para solos argilosos, esses parâmetros são essenciais para garantir a estabilidade e a resistência da estrutura a ser construída, no caso, o núcleo de uma barragem.

A amostra de argila deve ser homogeneizada e desagregada, removendo-se qualquer material orgânico ou partículas grosseiras. A quantidade de solo utilizada neste ensaio foi de 3 kg de material, conforme mostrado nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Peso da amostra para iniciar o ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 25 – Homogeneização da argila e água.



Fonte: Autoria própria (2024).

O solo é compactado em três camadas, pois o caso do ensaio é com proctor normal e cada camada é compactada com um número fixo de 26 golpes aplicados com o soquete e após compactar o solo, a amostra é desmoldada e sua massa é medida. Com o volume do molde conhecido, determina-se a densidade úmida do solo. Em seguida, uma amostra é retirada para a determinação do teor de umidade em estufa a 105°C a 110°C até atingir massa constante, ilustrado nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Compactação das camadas de argila.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 27 – Capsulas para levar as amostras de solo à estufa.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.4 Limite de liquidez e plasticidade (LL e LP)

Após o ensaio de compactação, realiza-se os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade. Estes por sua vez são essenciais para determinar as características de plasticidade de solos finos, principalmente argilosos. Esses ensaios são fundamentais para classificar e prever o comportamento do solo sob diferentes condições de umidade. Ambos os ensaios são normatizados pela NBR 6459 (ABNT, 2017) e NBR 7180 (ABNT, 2016).

4.2.4.1 Limite de Liquidez (LL)

O ensaio de limite de liquidez (LL) determina o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado líquido. Ele é realizado utilizando o aparelho de Casagrande,

onde o solo, previamente pesado e homogeneizado com água, é colocado na cápsula do aparelho e moldado com um sulco no centro.

Em seguida, o aparelho é operado para bater a cápsula contra a base até que o sulco se feche em 13 mm de comprimento. O número de golpes é contado e, em diferentes teores de umidade, se busca determinar o valor correspondente a 25 golpes, o qual define o limite de liquidez. O teor de umidade é medido em estufa a 105°C - 110°C, conforme ilustrado nas Figuras de 28 a 31.

Figura 28 – Aparelho de Casagrande.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 29 – Peso do material para iniciar o ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 30 – Ensaio realizado.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 31 – Amostra para ir a estufa.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.4.2 Limite de plasticidade (LP)

O ensaio de limite de plasticidade determina o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido. Para isso, uma amostra de solo é moldada em forma de fios cilíndricos e rolada sobre uma superfície de vidro ou metal até atingir um diâmetro de 3 mm e o limite de plasticidade é atingido quando esses fios se quebram ao serem rolados. Após a quebra dos fios, uma porção de solo é coletada para determinar o teor de umidade, o qual é considerado o limite de plasticidade do solo representados nas Figuras 32 e 33.

Figura 32 – Molde da amostra em forma cilindro.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 33 – Amostras para ir à estufa.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.5 Índices de vazios máximo e mínimo para areia e brita

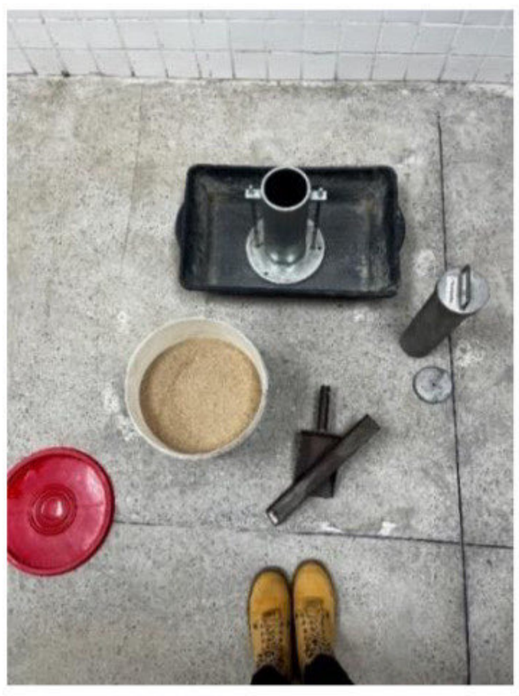
O ensaio de índices de vazios máximos e mínimos, realizados conforme a NBR 16840 (ABNT, 2020) e NBR 16843 (ABNT, 2020) é utilizado para determinar a compactabilidade de materiais granulares, como areia e brita. Esses índices fornecem informações sobre o comportamento do solo em situações de compactação e adensamento, sendo cruciais para avaliar o desempenho em projetos de engenharia, como em barragens e fundações.

Os resultados desses ensaios são vitais para determinar a viabilidade da areia selecionada para compor o filtro, além de verificar se as britas escolhidas podem ser recomendadas para o uso como enrocamento e dreno de pé.

O índice de vazios máximos representa a condição mais solta do solo. Para determiná-lo, uma amostra de solo granular é colocada em um cilindro, sem aplicação de vibração ou compactação. Após preencher o cilindro com a amostra, nivelando a superfície, pesa-se a quantidade de solo e mede-se o volume ocupado. A densidade aparente solta é calculada dividindo-se a massa pelo volume do solo, conforme mostrado na Figura 34.

Figura 34 – Processo da realização do ensaio.

a) Materiais utilizados.



Fonte: Autoria própria (2024).

b) Areia antes do ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

c) Brita antes do ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

d) Areia após o ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

e) Brita após o ensaio.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.6 Permeabilidade da argila

O ensaio de permeabilidade para argila, que é um solo de baixa permeabilidade, é realizado de acordo com o método de carga variável, conforme a norma NBR 14545 (ABNT, 2021). Esse ensaio teve como objetivo determinar o coeficiente de permeabilidade (κ), que indica a capacidade da argila de permitir o fluxo de água através de seus poros, a fim de descobrir a sua permeabilidade. Esse parâmetro é essencial em projetos de barragens e fundações, onde o controle da infiltração e drenagem é crítico. Este ensaio foi realizado em Recife, na Universidade Federal de Pernambuco, no laboratório de solos e instrumentação. A argila é compactada no cilindro permeâmetro até que atinja as condições de densidade desejadas para simular as condições de campo.

O permeâmetro é conectado a um sistema de carga variável, onde uma coluna de água sobre a amostra de argila diminui ao longo do tempo à medida que a água flui através do solo. Esse método é mais apropriado para solos de baixa permeabilidade, como a argila, pois o fluxo de água é mais lento.

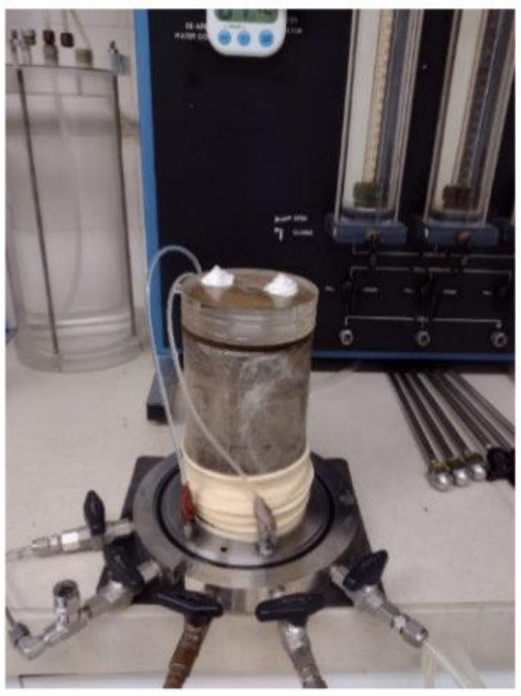
Durante o ensaio, são feitas leituras do nível da coluna de água em intervalos regulares, monitorando o fluxo de água. Com esses dados, calcula-se o coeficiente de permeabilidade (κ), utilizando uma fórmula específica que relaciona tempo, volume de água escoada e as características físicas do sistema e da amostra de solo.

Esse valor de permeabilidade é crucial para projetos de barragens e fundações, especialmente em materiais como argila, onde o controle de infiltrações é essencial para a segurança da estrutura.

Esses resultados indicam que a argila possui uma permeabilidade muito baixa, característica essencial para ser utilizada como material no núcleo impermeável de barragens de terra. De acordo com a literatura, como por exemplo Casagrande (1932), o núcleo de uma barragem deve apresentar um índice de permeabilidade que limite a passagem de água, de forma a evitar vazamentos que possam comprometer a segurança da estrutura. Valores típicos de permeabilidade para núcleos de barragens de terra variam de $1x10^{-7}\frac{cm}{s}$ a $1x10^{-9}c\frac{cn}{s}$, sendo que materiais com valores mais baixos são preferidos, pois proporcionam maior segurança contra a erosão interna e falhas hidráulicas.

A argila analisada apresenta características favoráveis para sua utilização no núcleo de uma barragem de terra, contribuindo para a segurança e estabilidade da estrutura, conforme mostrado na realização do ensaio nas Figuras 33 e 34.

Figura 35 – Ensaio de permeabilidade com carga variável.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 36 – Ensaio de permeabilidade em argila em execução.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.3 Protótipo de barragem de terra e aquário

O processo de construção de uma barragem de terra zoneada, foi desenvolvido através de um protótipo em escala reduzida

O modelo do protótipo foi adotado com dimensões para fins analíticos e os materiais que a compõem são areia, brita, argila e solo laterítico. Sendo a areia para a construção de filtros vertical e horizontal, britas para simular o enrocamento e dreno de pé, argila para compor o núcleo e solo laterítico para taludes de montante e jusante.

O aquário foi feito de madeirite naval, vidro temperado, argamassa polimérica para sua impermeabilização, além de sela-trincas e silicone para garantir a completa vedação do conjunto de materiais.

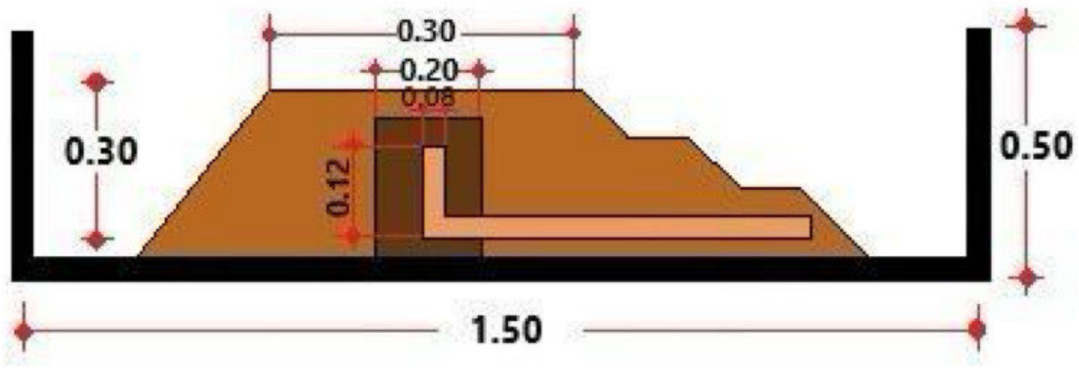
Pretende-se observar as linhas de fluxo e percolação da água no corpo da barragem, além de medir a vazão da água à jusante, a fim de analisar a eficácia dos materiais selecionados pra compor a barragem como um todo, com foco na observação do núcleo argiloso e eficiência dos filtros de areia vertical e horizontal, conforme mostrado nas Figuras de 37 a 39.

Figura 37 – Aquário para a montagem do protótipo.



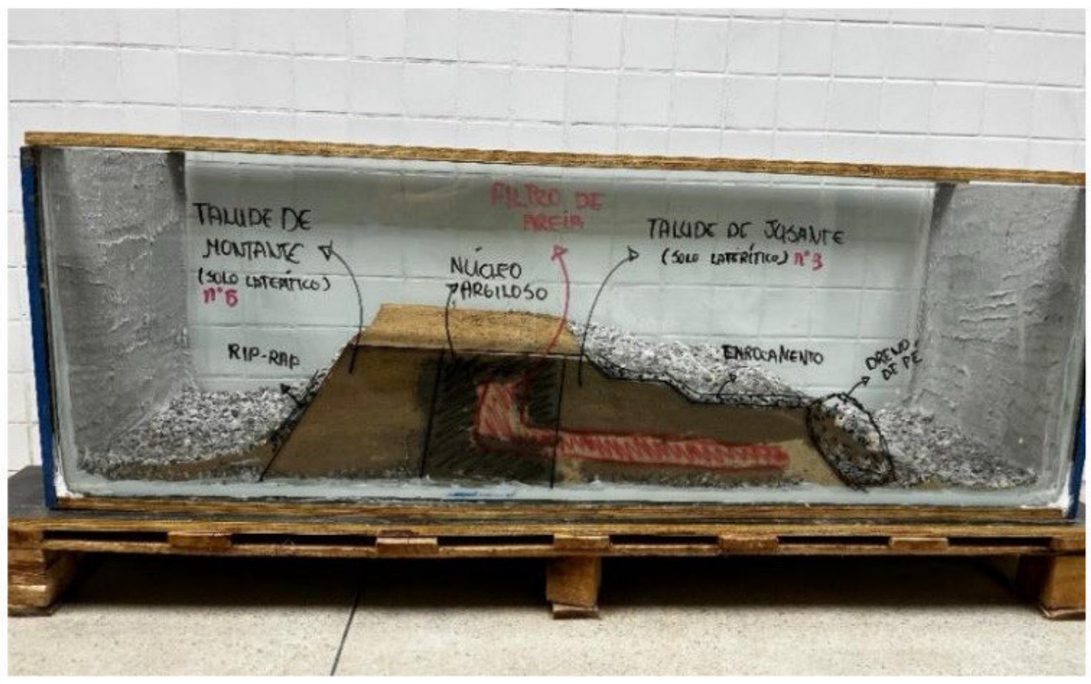
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 38 – Ilustração das dimensões do aquário e protótipo em metro.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 39 – Protótipo montado dentro do aquário.



Fonte: Autoria própria (2024).

Ainda, adota-se uma nomenclatura para que possa ser identificado os tipos de solos nos resultados desta análise, conforme indicado no Quadro 3:

Quadro 3 – Legenda para os solos utilizados.

DENOMINAÇÃO DOS SOLOS	
MATERIAL	**LEGENDA**
AREIA	SOLO 1
ARGILA	SOLO 2
BRITA 0	SOLO 3
BRITA 2	SOLO 4
AMOSTRA 4	SOLO 5
AMOSTRA 5	SOLO 6

Fonte: Autoria própria (2024).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados todo os resultados obtidos através dos ensaios realizados em laboratório e do protótipo que foi construído para a realização deste estudo.

5.1 Ensaios geotécnicos

Neste item serão abordados os resultados dos ensaios geotécnicos realizados em laboratório.

5.1.1 Resultado da análise granulométrica por peneiramento e sedimentação

A distribuição granulométrica do solo 1 é composto por 23% de areia fina, 69% de areia média e 8% de areia grossa, sendo classificado granulometricamente como Areia. O solo 2 é composto por 58% de argila, 37% de silte e 5% de areia fina, o que apresenta uma classificação granulométrica composta por Argila, Silto Arenosa.

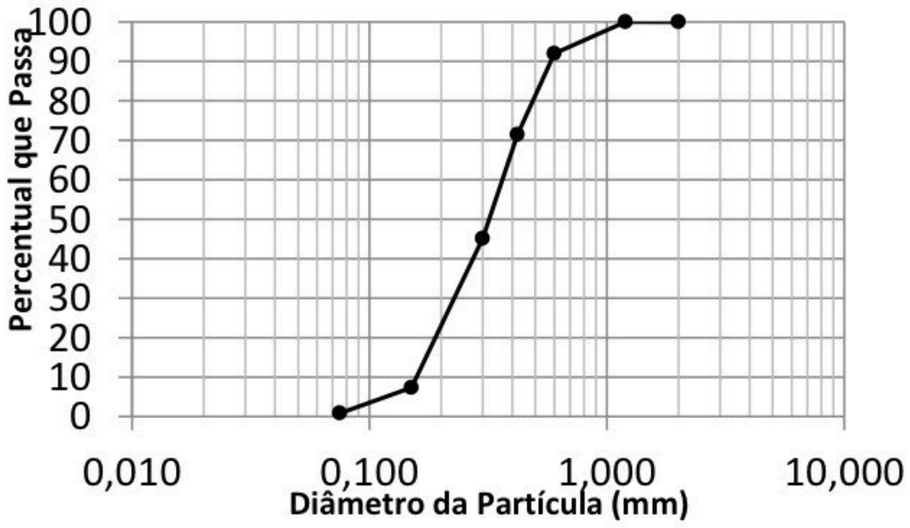
Para as britas 0 e 2 que foram escolhidas, a brita 0 possui diâmetros de 2,36 mm a 9,5 mm, sendo classificada como Pedregulho. Já a brita 2, possui diâmetro que variam entre 4,5 mm até 19 mm, sendo classificada entre Pedregulho e Pedra.

Para o solo laterítico, a distribuição granulométrica da amostra 4 é 31% de finos, 19% de areia fina, 32% de areia média, 13% de areia grossa e 5% de pedregulho. Tem-se, da amostra 5, 22% de finos, 20% de areia fina, 40% de areia média, 12% de areia grossa e 4% de pedregulho.

Os resultados dos ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação confirmam que os materiais analisados (areia e argila) possuem as características granulométricas adequadas para suas respectivas funções na construção de barragens de terra zoneadas. A areia, com sua predominância de partículas médias e finas, pode se mostrar adequada para ser utilizada em filtros e zonas de transição. Já a argila, com suas partículas extremamente finas, pode ser ideal para utilização em núcleos impermeáveis, proporcionando boa impermeabilidade e resistência ao fluxo de água, bem como a brita, que por sua vez pode ser utilizada como enrocamento nos taludes de montante e jusante e ainda como dreno de pé.

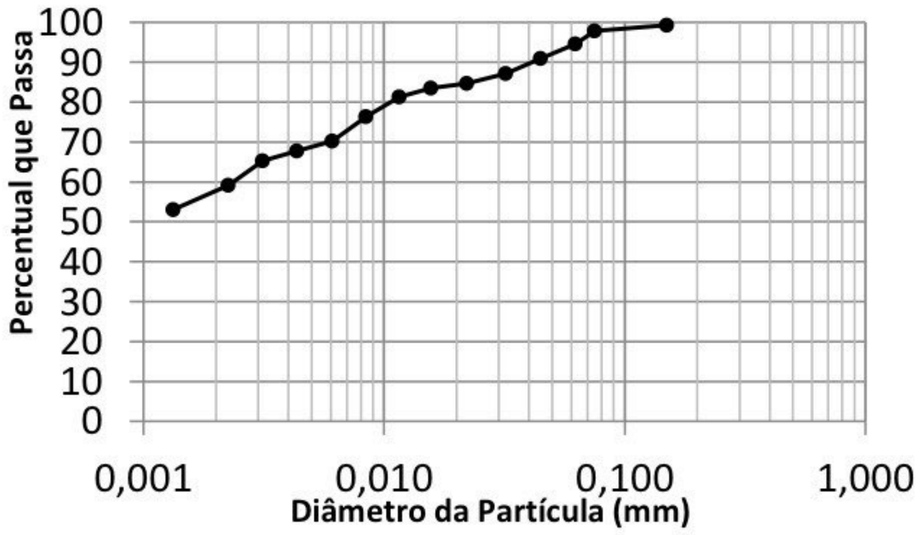
As Figuras 40 a 45 apresentam os resultados dos ensaios de granulometria dos solos 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Figura 40 – Curva de granulometria do Solo 2.



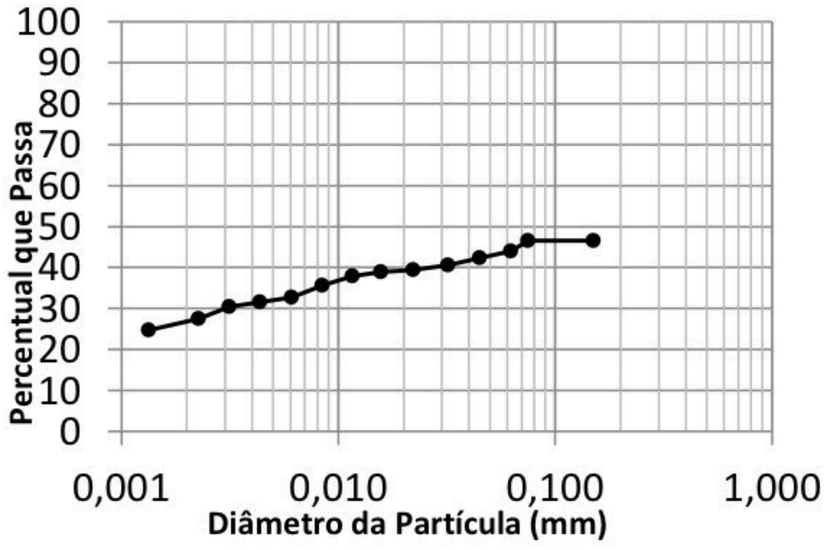
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 41 – Curva granulométrica do Solo 2.



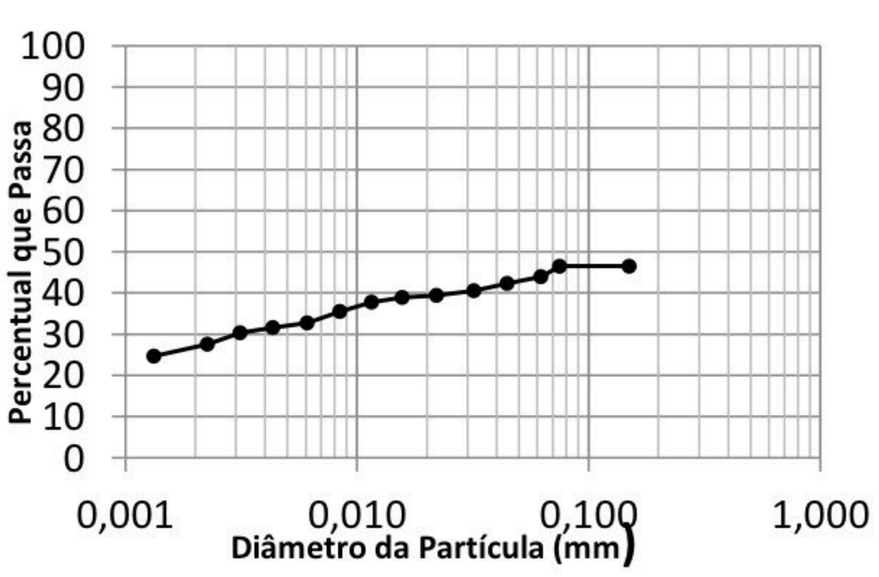
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 42 – Curva granulométrica do Solo 3.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 43 – Curva granulométrica Solo 4.



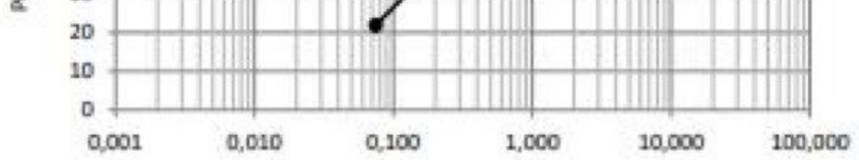
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 44 – Curva granulométrica do Solo 5.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 45 – Curva granulométrica do Solo 6.



Fonte: Lima (2023).

Fonte: Lima (2023).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos no ensaio de granulometria dos solos.

Tabela 2 – Resumo dos resultados do ensaio de granulometria.

AMOSTRA			SOLO 1	SOLO 2		SOLO 3	SOLO 4	SOLOS 5 E 6	
	#	mm							
GRANULOMETIA POR PENEIRAMENTO (% EM PESO QUE PASSA)	3"	75	100	100	100	100	100	100	100
	2"	50	100	94,57	100	100	100	100	100
	1"	25	100	90,88	100	100	100	100	100
	3/4"	19	100	87,2	100	100	84,09	100	100
	3/8"	9,5	100	84,74	100	45,93	38,29	100	100
	4	4,8	100	83,51	100	31,61	13,015	100	100
	10	2	100	81,3	100	19,93	12,87	5	4
	16	1,2	99,99	76,39	100	0	0	13	12
	30	0,6	92,01	70,25	99,98	0	0	32	40
	40	0,42	71,43	67,79	99,95	0	0	19	20
	50	0,3	45,13	65,34	99,85	0	0	31	22
	100	0,15	1,38	59,2	99,29	0	0	0	0
	200	0,075	0,82	53,06	97,87	0	0	0	0

- As informações usadas para os solos 5 e 6 foram obtidas por meio da caracterização realizada por Lima (2023).

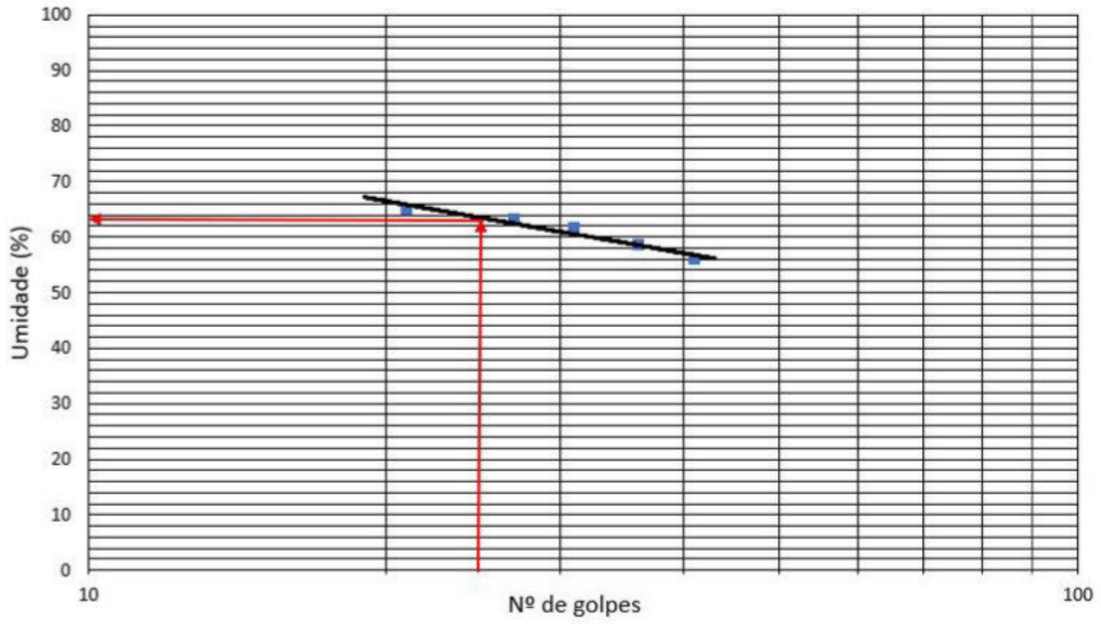
Fonte: Autoria própria (2024).

5.1.2 Resultados do ensaio do limite de liquidez e plasticidade (LL e LP)

Com os resultados obtidos, o limite de liquidez para a argila é igual a 64%, considerado um alto teor de umidade. Os solos 5 e 6, caracterizados por Lima (2023), apresentaram resultado do limite de liquidez igual a 19% e 16%, respectivamente. Para o limite de plasticidade, apresentou resultado igual a 28% e os solos 4 e 5 iguais a 12% e 14%, respectivamente. Desse modo, o índice de plasticidade dos solos 2, 5 e 6 são iguais a 28%, 7% e 2%, respectivamente. De acordo com Pinto (2006), o solo 2 tem alta plasticidade e os solos 4 e 5 tem baixa plasticidade e ligeiramente plástico.

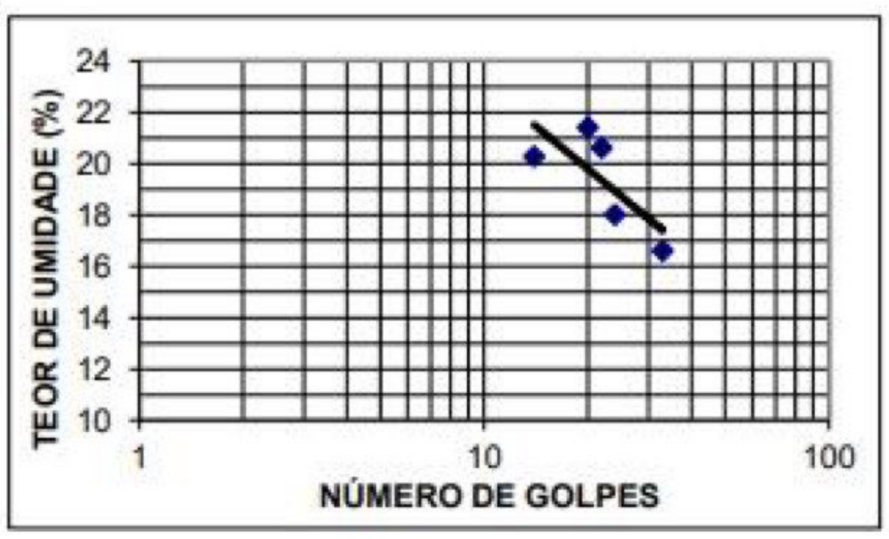
Os resultados das retas da Curva de Fluidez dos Solos 2, 5 e 6 estão representadas nas Figuras 46 a 48, e Tabela 3.

Figuras 46 – Reta da Curva de Fluidez do Solo 2.



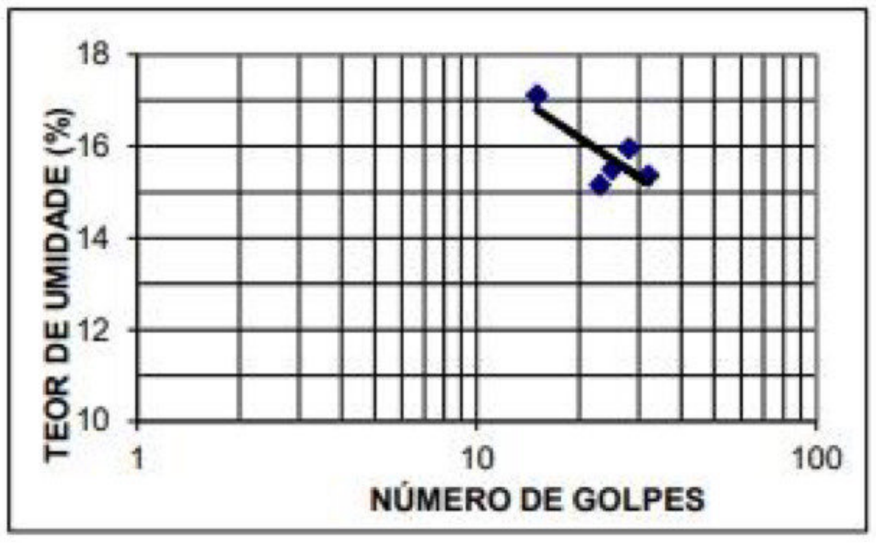
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 47 – Reta da Curva de Fluidez do Solo 5



Fonte: Lima (2023).

Figura 48 – Reta da Curva de Fluidez do Solo 6.



Fonte: Lima (2023).

Tabela 3 – Resultados dos ensaios de LL e LP.

VALORES	SOLO 2	SOLO 5	SOLO 6
LL	64%	19%	16%
LP	28%	12%	14%
IP	36%	7%	2%

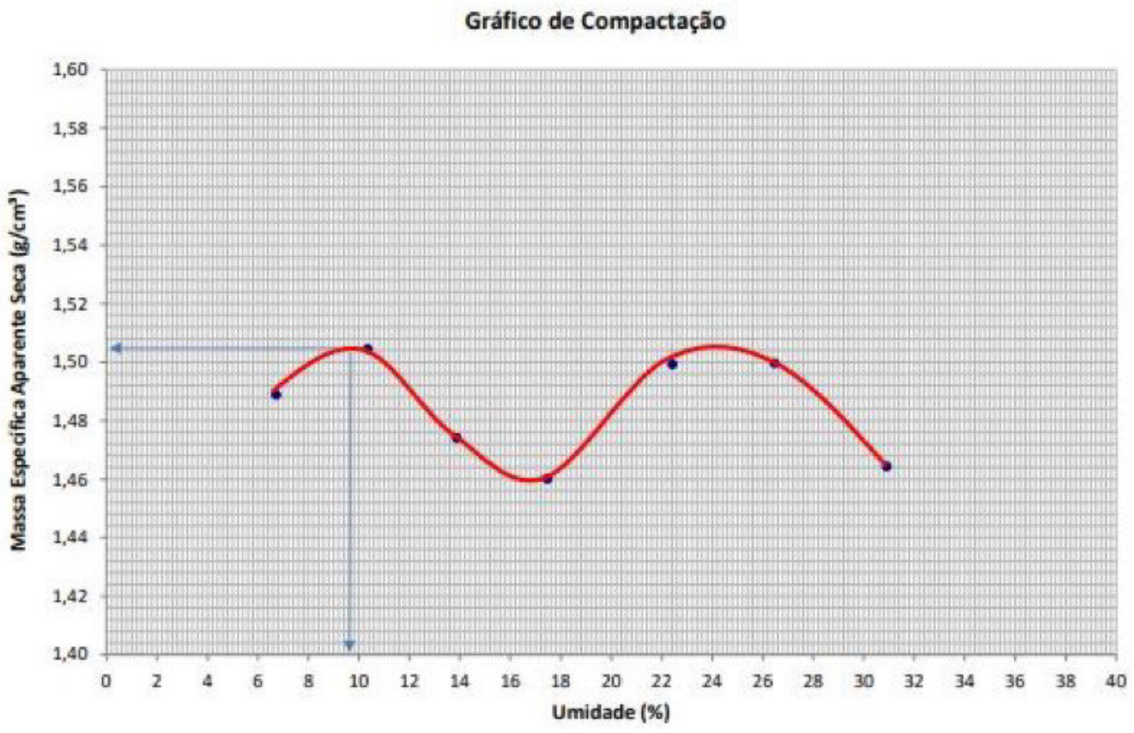
Fonte: Autoria própria (2024).

5.1.3 Resultados do ensaio de compactação

Os resultados obtidos no ensaio de compactação da argila mostraram que a densidade seca máxima alcançada foi de 1,50 g/cm³, enquanto a umidade ótima foi de 9,6%. Este ensaio foi conduzido sob condições de energia normal, resultando em dados adequados para a análise do material.

O gráfico gerado durante o ensaio evidenciou a relação entre a umidade e a densidade seca, permitindo a visualização clara do ponto de umidade ótima e da densidade máxima alcançada, no qual resultou em uma curva de pico duplo (Figura 49).

Figura 49 – Curva do ensaio de compactação.



Fonte: Autoria própria (2024).

5.1.4 Resultados dos índices de vazios máximo e mínimo para areia e brita

O resultado dos ensaios de índice de vazios máximo (emáx.) e mínimo (emin.) dos solos 1, 3 e 4 estão indicados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos resultados do ensaio de índice de vazios máximo e mínimo dos Solos 1, 3 e 4.

MATERIAIS	emáx.	emin.
SOLO 1	0,98	0,68
SOLO 3	1,16	0,78
SOLO 4	1,06	0,74

Fonte: Autoria própria (2024).

5.1.5 Resultados da permeabilidade da argila

O ensaio de permeabilidade foi realizado em três amostras de argila, cujos índices de permeabilidade obtidos foram de:

- Amostra 1: $1{,}745x10^{-8}\,\frac{cm}{s}$;
- Amostra 2: $1{,}347x10^{-8}\,\frac{cm}{s}$;
- Amostra 3: $1{,}497x10^{-8}\,\frac{cm}{s}$.

Conforme a Sousa (2006), para que uma argila seja apta a ser usada para o núcleo de uma barragem, é necessário que ela esteja dentro do valor típico do coeficiente de permeabilidade ($< 10^{-9}\,\frac{m}{s}$).

As amostras analisadas, com permeabilidades em torno de 1,3 a $1{,}7x10^{-8}\,\frac{cm}{s}$, demonstram que a argila é adequada para o uso no núcleo de barragens, pois seus valores estão dentro da faixa desejável. Essa baixa permeabilidade contribui para a eficiência do controle da água na estrutura, garantindo que a barragem mantenha sua integridade ao longo do tempo e minimizando riscos de falhas devido a vazamentos.

A argila analisada pode apresentar características favoráveis para sua utilização no núcleo ou em um tratamento de fundação, como o cut-off de uma barragem de terra, contribuindo para a segurança e estabilidade da estrutura.

Conforme a classificação pelo método SUCS, tem-se a classificação para os solos estudados e seus respectivos tipo, conforme ilustrado no Quadro 4.

Quadro 4 – Classificação dos solos pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

MATERIAL	SIGLA	TIPO
SOLO 1	S	Areia
SOLO 2	CH	Argila de Alta Compressibilidade
SOLO 3	G	Pedregulho
SOLO 4	G	Pedregulho, Pedra
SOLO 5	SM	Areia, Siltosa
SOLO 6	SM	Areia, Siltosa

Fonte: Autoria própria (2024).

Em que o Solo 1 classifica-se como areia (S), o Solo 2 como argila de alta compressibilidade (CH), os Solos 3 e 4 como pedregulho e pedra (S), respectivamente e os

Solos 5 e 6 como areia siltosa (SM). Para o método Rodoviário, se tem no Quadro 5 a classificação dos solos estudados:

Quadro 5 – Classificação dos solos pelo método Rodoviário.

MATERIAL	GRUPO	TIPO
SOLO 1	A-1b	Areia.
SOLO 2	A-3-4-7	Argila, Silto Arenosa.
SOLO 3	A-1a	Pedregulhos.
SOLO 4	A-1a	Pedregulhos.
SOLO 5	A-2-4	Pedregulhos e argilas siltosas ou argilosas.
SOLO 6	A-2-4	Pedregulhos e argilas siltosas ou argilosas.

Fonte: Autoria própria (2024).

Após a análise dos resultados dos ensaios de granulometria, limite de liquidez e plasticidade, foi possível obter que o Solo 1 é classificado como parte do grupo A-1b, enquanto o solo 2 dos grupos A-3-4-7, solos 3 e 4 se encontram nos grupos A-1a, enquanto os solos 5 e 6 estão classificados nos grupos A-2-4.

A classificação dos solos é fundamental para o entendimento de seu comportamento em obras de engenharia. Cada método oferece uma perspectiva diferente, que pode ser complementar. O SUCS é amplamente utilizado para projetos geotécnicos em geral, enquanto o método Rodoviário é mais específico para a construção de estradas e pavimentos.

5.2 Resultado do filtro pelo critério de Terzaghi

O solo que será protegido é um núcleo argiloso, e conforme caracterizado no ensaio de granulometria, o material do filtro é composto por areia, onde 23% de areia fina, 69% de areia média e 8% de areia grossa. O solo argiloso apresentou 58% de argila, 37% de silte e 5% de areia fina.

A partir desses dados, estimaram-se os valores característicos de D_{15} e D_{50} para o solo e o filtro. Para o solo argiloso, o D_{15} foi estimado em 0,005 mm, enquanto o D_{50} foi estimado em 0,01 mm. Já para a areia que será utilizada no filtro, o D_{15} foi estimado em 0,3 mm e o D_{50} em 0,5 mm.

Ao aplicar o critério de Terzaghi, verificou-se que, para que o filtro retenha adequadamente as partículas finas do solo argiloso, o D_{15} da areia deve ser menor ou igual a cinco vezes o D_{15} do solo protegido. No entanto, o D_{15} da areia (0,3 mm) é maior que o limite calculado de 0,025 mm, o que indica que a areia utilizada é grosseira demais para reter as partículas de argila, não atendendo a esse critério. Por outro lado, no que se refere à permeabilidade, o critério de D_{50} foi atendido, já que o D_{50} da areia (0,5 mm) é maior que quatro vezes o D_{50} do solo protegido (0,04 mm), o que significa que a areia é suficientemente permeável para garantir o fluxo de água.

Diante disso, se pode observar que, embora o material de areia utilizado atenda ao critério de permeabilidade, ele não é adequado para a retenção das partículas de argila. Para garantir a proteção eficaz do núcleo argiloso, recomenda-se o uso de uma areia com granulometria mais fina ou a adoção de um filtro em camadas, com uma camada de areia mais fina seguida pela areia existente.

5.3 Resultado do protótipo e aquário

Durante a fase de testes do protótipo da barragem de terra zoneada, após a conclusão da montagem estrutural, foi iniciada a etapa de enchimento com água para simular as condições reais de uma barragem. No entanto, logo no início desse processo, foi observado um vazamento significativo de água pela base do aquário que servia de suporte ao protótipo. Esse vazamento inesperado exigiu uma interrupção imediata da etapa de enchimento para evitar danos maiores ao protótipo e ao ambiente de teste. Após a suspensão do teste, uma investigação detalhada foi conduzida para identificar a causa do problema. Foi necessário desmontar o protótipo de barragem parar analisar no interior do aquário as possíveis causas.

A análise revelou que os materiais utilizados na construção do aquário não eram adequados para suportar as condições de teste. Embora o aquário tenha sido projetado para conter água, ele não foi projetado para resistir às vibrações e pressões aplicadas durante o processo de compactação dos materiais da barragem. As vibrações resultantes da compactação, necessárias para simular a densidade e a coesão dos materiais em uma barragem real, causaram microfissuras na estrutura do aquário, comprometendo sua integridade.

A investigação detalhada das características e tipos de materiais escolhidos no contexto deste modelo de barragem de terra, tanto no protótipo em si quanto na escolha dos materiais do aquário se traduz em uma vasta abordagem para a sua construção. Isso não contribui apenas para testar a eficiência dos materiais, mas também no compromisso de

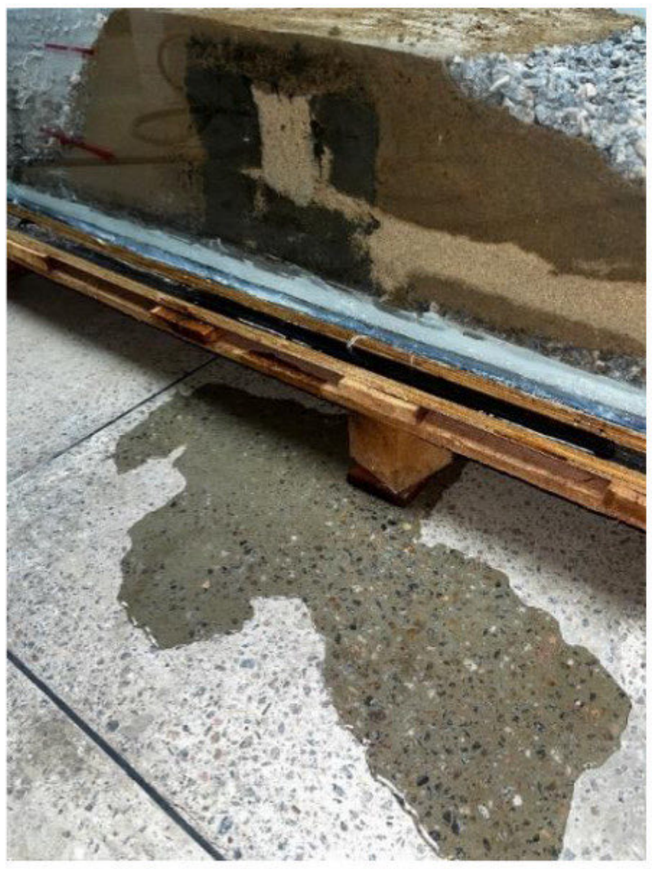
analisar e, se for o caso, refazer adotando métodos e materiais alternativos, tendo em vista que as barragens de terra podem ter diversas finalidades, formatos, métodos e materiais de composição.

Cada um desses materiais foi escolhido com base em suas características e propriedades físicas e mecânicas, bem como em suas funções específicas dentro da estrutura da barragem. A areia foi escolhida para compor o filtro devido à sua capacidade de permitir a passagem de água, ao mesmo tempo que impede o transporte de partículas finas do núcleo da barragem. Este aspecto é crucial para manter a integridade do núcleo impermeável de argila. Já a brita é usada no enrocamento e no dreno de pé, pois proporciona uma estrutura permeável e resistente que suporta a pressão da água e facilita o controle de infiltrações.

Para o núcleo impermeável, a argila é o material ideal, devido à sua baixa permeabilidade, coesão e boa plasticidade, características que garantem a contenção da água. Por fim, o solo laterítico foi selecionado para os taludes de montante e jusante devido à sua boa compactabilidade e resistência à erosão, contribuindo para a estabilidade geral da barragem.

O vazamento observado comprometeu a simulação completa da barragem, mas ainda foi possível obter dados importantes sobre permeabilidade e a resistência dos materiais restados (Figura 50).

Figura 50 – Vazamento no aquário durante a fase de testes.



Fonte: Autoria própria (2024).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou caracterizar fisicamente os solos e avaliar sua adequação para o uso em barragens de terra zoneadas. Os ensaios laboratoriais forneceram informações cruciais sobre a adequação dos materiais, especialmente no que diz respeito à argila e areia utilizadas.

Para a caracterização física, os ensaios de granulometria por peneiramento e sedimentação forneceram informações importantes sobre a classificação da areia e argila, mostrando a separação dos grãos de solo, resultando em uma argila silto arenosa, onde apresentou uma predominância de 58% de argila, e uma areia com 69% de areia média.

O ensaio de compactação utilizando a energia de proctor normal com uma secagem prévia, por meio das curvas obtidas nos resultados mostra que a densidade seca máxima da argila, que é de suma importância para compor o núcleo impermeável da barragem foi de 1,50 g/cm³, enquanto a umidade ótima foi de 9,6%, estas porcentagens são essenciais para uma compactação eficiente.

No ensaio para encontrar os índices de vazios máximo e mínimo da areia, chegou-se aos resultados de 0,98 emáx. e 0,68 emin., respectivamente. Estes valores são adimensionais e representam uma relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos do solo. O ensaio é importante para este material para analisar seu comportamento quando submetido a situações de compactação e adensamento.

Os ensaios de limite de liquidez e plasticidade (LL e LP) mostraram que a argila ensaiada é plástica, tendo um percentual de 64% para liquidez e 28% para plasticidade. A argila ainda apresentou baixa permeabilidade, o que a torna adequada para o núcleo impermeável da barragem, garantindo uma contenção eficaz da água. No entanto, a granulometria da areia utilizada no filtro foi insuficiente para reter as partículas finas, sugerindo a necessidade de ajustes na sua composição.

Com base no método de SUCS, a argila classifica-se como argila de alta compressibilidade, enquanto a areia tem sua classificação como areia, as amostras 4 e 5 do solo laterítico como areia fina siltosa e as britas 0 e 2 como solo granular, mais especificamente pedregulho.

Em relação ao protótipo, os resultados das análises e ensaios geotécnicos realizados no laboratório mostraram que nem todos os materiais escolhidos para este estudo atendem aos critérios para serem usados em uma barragem de terra zoneada. A argila pode ser recomendada para núcleo, devido a sua baixa permeabilidade. Já para o filtro, embora a areia utilizada atenda ao critério de permeabilidade, ela não é adequada para a retenção das

partículas de argila. Para garantir a proteção eficaz do núcleo argiloso, recomenda-se o uso de uma areia com granulometria mais fina ou a adoção de um filtro em camadas, com uma camada de areia mais fina seguida pela areia existente.

Já o aquário, os materiais escolhidos para sua montagem não foram adequados. O conjunto do madeirite, vidro, silicone e sela-trincas não resistiu as vibrações dos golpes da compactação, fazendo com que o vidro se descolasse a abrisse microfissuras e a água vazasse para fora do aquário.

Para trabalhos futuros, sugere-se a investigação de diferentes composições de filtro e o uso de outros materiais para os taludes, visando otimizar a segurança e eficiência estrutural da barragem, além de ser sugerido utilizar outro tipo de material no aquário, como por exemplo chapas de aço para resistir as vibrações e dar continuidade da compactação.

Desta forma, o estudo demonstrou a viabilidade de parte dos materiais analisados, especialmente a argila, para o uso em barragens de terra zoneadas. No entanto, ajustes e melhorias nos filtros e melhorias na resistência estrutural do protótipo são recomendados para garantir a segurança e a eficiência da barragem.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 7181:** Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 7182:** Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 6457:** Preparação para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6502:** Rochas e solos – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 14545:** Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16840:** Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 16843:** Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 13028:** Projeto de barragens para acumulação de água: Diretrizes técnicas. Rio de Janeiro: 2017.

MELLO, M. F. de. **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI**: **cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens**. - Rio de Janeiro: CBDB, 2011. 524 p.: il.; 29 cm

ALMEIDA, M. M. de. **Estudo tensão deformação de barragem de terra e enrocamento**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

ALMEIDA, M. S. S. **Barragens de Terra e Enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 1993.

AMORIM, T. J., Lima, M. J. S., & Silva, A. R. **Análise do Comportamento de Barragens de Terra com Cota Variável Utilizando Modelagem Numérica**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Geotecnia, 2018.

ANCHEZ, L. A.; GONZÁLEZ, A.; MORALES, C. **Best Practices for the Design and Maintenance of Embankment Dams**. Journal of Dam Safety, 12(2), 2014. 30-40.

ALMEIDA, M. **ESTUDO TENSÃO DEFORMAÇÃO DE BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO**. Dissertação (Mestrado) – Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto/MG, 2010. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/items/c2ade6d8-832b-457a-afb9-d53ba824dd62. Acesso em: 30 ago. 2024.

BECK, R. R., & Branco, F. M. **Barragens de Terra: Aspectos de Projeto e Construção**. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

BROMHEAD, A. N. **The stability of earth structures: a geotechnical engineering perspective**. New York: Wiley, 1992.

CARVALHO, D. **Principais elementos. Uma introdução para graduandos. Faculdade de Engenharia Agrícola** (FEAGRE/Unicamp). 2011. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/15030/material/barragem_terra_1.pdf. Acesso: 22/09/2024.

CASAGRANDE, A. **Classification and Identification of Soils. In: Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, 73(5), 1947. 1-32.

CAPUTO, H. P., 1923-1990 **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 1: fundamentos** /7.ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2015. il.; 24 cm

CHIOSSI, N. J. **Geologia de engenharia** / Nivaldo Chiossi. -- 3. ed. -- São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

CRUZ, P. T. da. **100 barragens brasileiras**: casos históricos, materiais de construção, projeto / São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CHOW, V. T. (1959). **Open-Channel Hydraulics**. McGraw-Hill.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento** / Nélio Gaioto. – São Carlos: EESC-USP, 2003. 126 p.: il.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, (ICOLD). **Dams and development: Relevant practices for improved decision-making**. ICOLD Bulletin 144, 2011.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, (ICOLD). **Bulletin on the Maintenance of Dams**, 2007.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS, (ICOLD). **Earthfill Dams. Bulletin 145**, 2011.

KUTZNER, K. **Earth and Rockfill Dams: Principles for Design and Construction**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997.

LEMOS, C. A. **Barragens de Terra: Análise de Projetos e Ensaios**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

LIMA, V. K. **Caracterização físico-química do solo de uma salina localizada no município de Grossos/RN**. Monografia (Graduação) – Bacharelado em Engenharia Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2023.

MACEDO, R., S., A. L., & S., E. P. **Monitoring and simulation of earth dams under seismic and hydrological stress**. Revista Brasileira de Geotecnia, 25(2), 2019. 89-104.

MARQUES F., M., V., E., & SANTOS, C. J. **Compactação e controle de qualidade em barragens de terra**. Revista Brasileira de Geotecnia, 6(4), 2006. 101-115.

SICHARDT, W. **Dams of Earth. Springer-Verlag**, 1958.

REDDY, K. R., & RICHARDS, B. S. (2007). **Geotechnical Engineering Handbook**. New York: McGraw-Hi, 2007.

MARQUES F., J. A. et al. (2006). **Barragens de Terra Zoneadas: Projeto e Execução**. São Paulo: Editora Blucher.

MEYERHOF, G. G. (1956). **Penetration tests and bearing capacity of soils. Journal of Soil Mechanics and Foundations Divisions**, 82(3), 1-29.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G.**. Barragens de terra e enrocamento**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2022.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. . São Paulo: Pini. . Acesso em: 16 out. 2024. , 1997.

SKEMPTON, A. W. **The stability of earth dams. Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,** 1953**,** 1, 11-16.

SHERARD, J. L.. **Embankment Dam Engineering: Design, Construction, and Safety**. New York: John Wiley & Sons, 1973.

SOUSA, P., C. de. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 Ed. 2016

TERZAGHI, K., & Peck, R. B. **Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd ed.** John Wiley & Sons, 1967.

VARGAS, M. **Barragens de Terra: Princípios e Métodos de Projeto**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

TERZAGHI, K., Peck, R. B., & Mesri, G. **Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd ed**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and Design: Riprap for Slope Protection**, 1989.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and Design: Embankment Dams**, 2003.

U.S. DEPARTAMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Conservation Practice Standards: Use of Riprap for Erosion Control**, 2007.

VICK, S. G. **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams**. BiTech Publishers Ltd, 1990.

ZORZI, C. **Caracterização dos solos tropicais lateríticos para reforço de pavimentos**. Monografia (Graduação). Bacharelado em Engenharia Civil – Universidade São Francisco, Itatiba/SP, 2008. Disponível em: https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1194.pdf. Acesso em: 29 agosto.