

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ANDRIELLY NUNES DE LARA

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA INSPEÇÕES E ESTUDO DO
INTEMPERISMO DE BASALTOS EM DRENOS DE PÉ DE BARRAGENS DE
TERRA**

TOLEDO

2025

ANDRIELLY NUNES DE LARA

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA INSPEÇÕES E ESTUDO DO
INTEMPERISMO DE BASALTOS EM DRENOS DE PÉ DE BARRAGENS DE
TERRA**

**Methodological Proposal for Inspections and Study of Basalt Weathering in
Toe Drains of Earth Dams**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof. Dra. Patrícia Casarotto de
Oliveira.

Coorientadora: Prof. Dra. Narayana Saniele
Massocco.

TOLEDO

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ANDRIELLY NUNES DE LARA

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA INSPEÇÕES E ESTUDO DO
INTEMPERISMO DE BASALTOS EM DRENOS DE PÉ DE BARRAGENS DE
TERRA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 14/outubro/2025

Patrícia Casarotto de Oliveira – Doutorado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Narayana Saniele Massocco – Doutorado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Débora de Oliveira Fernandes – Mestrado – Itaipu Parquetec.

Alana Dias de Oliveira – Doutorado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

**TOLEDO
2025**

RESUMO

O desempenho dos sistemas de drenagem em barragens de terra está diretamente relacionado à integridade física e hidráulica dos materiais drenantes que os compõem. No caso de dreno de pé, constituídos de blocos de rocha, estão sujeitos a processos de alteração que podem comprometer sua função hidráulica e estrutural. Assim, este trabalho propôs uma metodologia para mapear e caracterizar essas alterações em barragens de terra, visando identificar sinais de degradação (como colmatação e intemperismo) passíveis de comprometer a segurança da estrutura civil. O objetivo principal do trabalho foi desenvolver um protocolo baseado em critérios visuais de classificação, associados a técnicas de georreferenciamento e análise de imagens, para sistematizar a avaliação de drenos de pé. A justificativa se baseia na necessidade de identificar precocemente sinais de degradação que comprometam a eficiência do sistema de drenagem em barragens de terra. A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem qualitativa e descritiva, fundamentada em revisão bibliográfica, análise documental e sistematização de dados existentes. A metodologia proposta incluiu diretrizes para observação de campo, critérios de classificação do grau de alteração e técnicas de georreferenciamento, bem como a sugestão de ensaios de caracterização do material rochoso. Os resultados permitiram a elaboração de um tutorial técnico simplificado voltado para profissionais que atuam em inspeções preventivas da área geotécnica e para gestores de barragens, contribuindo para o monitoramento contínuo e para a manutenção da integridade dos sistemas drenantes.

Palavras-chave: barragens de terra; colmatação; dreno de pé; intemperismo; mapeamento.

ABSTRACT

The performance of drainage systems in earth dams is directly related to the physical and hydraulic integrity of the draining materials that compose them. In the case of toe drains, made up of rock blocks, these structures are subject to alteration processes that may compromise their hydraulic and structural function. Therefore, this study proposed a methodology to map and characterize such alterations in earth dams, aiming to identify degradation signs (such as clogging and weathering) that could endanger the safety of the civil structure. The main objective was to develop a protocol based on visual classification criteria, combined with georeferencing and image analysis techniques, to systematize the assessment of toe drains. The study is justified by the need to identify early signs of degradation that may affect the efficiency of the drainage system in earth dams. This is an applied research with a qualitative and descriptive approach, grounded on literature review, document analysis, and systematization of existing data. The proposed methodology included guidelines for field observation, classification criteria for alteration degree, and georeferencing techniques, as well as suggestions for rock material characterization tests. The results allowed the creation of a simplified technical tutorial intended for professionals involved in preventive geotechnical inspections and dam management, contributing to continuous monitoring and maintenance of drainage system integrity.

Keywords: earth dams; clogging; toe drains; weathering; mapping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais elementos de drenagem de uma barragem de terra.....	13
Figura 2 – Drenos de pé de pequenas barragens.....	14
Figura 3 – Filtro de pé obstruído pela vegetação.....	16
Figura 4 – Surgência indicando erosão tubular regressiva, talude de jusante.	16
Figura 5 – Processo de colmatção física.	17
Quadro 1 – Tipos de processos de colmatção.	18
Figura 6 – Principais componentes do Permeômetro de Guelph.	21
Figura 7 – Intemperismo físico.....	25
Figura 8 – Intemperismo químico.	26
Quadro 2 - Classificação do grau de alteração de rocha.....	27
Figura 9 – Retirada de amostra indeformada.....	29
Figura 10 – Amostrador Shelby estacionário.	31
Figura 11 – Componentes do amostrador D&M.	32
Figura 12 – Coleta de amostras de solo para micromorfologia. (A) Preparação para retirada da amostra. (B) Amostra retiradas em caixas plásticas.....	33
Figura 13 - Fluxograma das etapas da pesquisa.....	35
Quadro 3 – Principais aspectos analisados em inspeções visuais: comparação entre manuais.....	40
Quadro 4 – Categorias de alteração de rocha para enrocamento de dreno de pé.	42
Quadro 5 – Tipos de amostras versus ensaios.	44
Figura 14 – Fluxo de tomada de decisão para inspeção, amostragem e ensaios.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
DInSAR	Interferometria Diferencial por Radar de Abertura Sintética
GBSAR	Radar de Abertura Sintética Terrestre
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegação por Satélite)
ISRM	International Society for Rock Mechanics
NDWI	Normalized Difference Water Index (Índice de Diferença Normalizada da Água)
NBR	Norma Brasileira
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UHE	Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Justificativa.....	10
1.2 Objetivos	10
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Estrutura e funcionamento de barragens de terra	12
2.1.1 Sistema de drenagem	13
2.1.2 Importância do monitoramento	15
2.2 Colmatação e Perda de Eficiência em Drenos e Filtros	17
2.2.1 Colmatação	17
2.2.2 Efeitos na eficiência do sistema	19
2.2.3 Relevância para o monitoramento e manutenção	19
2.2.4 Ensaios de campo e laboratório	20
2.3 Técnicas de Mapeamento	22
2.3.1 Georreferenciamento de ponto e área	22
2.3.2 Sensoriamento remoto e uso de drones para análise de imagens de alta resolução	23
2.4 Intemperismo de rochas basálticas.....	24
2.4.1 Conceitos gerais.....	24
2.4.2 Grau de alteração.....	26
2.4.3 Indicadores visuais de degradação superficial em filtros e drenos.....	27
2.5 Coleta de amostras para caracterização de alteração superficial de rochas	28
2.5.1 Tipos de amostras.....	28
<u>2.5.1.1 Amostras indeformadas.....</u>	<u>29</u>

2.5.1.2 Amostras deformadas	29
2.5.2 Métodos de coleta em materiais não coesivos	30
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	34
3.1 Classificação da pesquisa.....	34
3.2 Etapas da metodologia proposta.....	34
3.2.1 Estudo de manuais de inspeção de barragens	35
3.2.2 Definição de indicadores visuais teóricos.....	36
3.2.3 Elaboração do protocolo de mapeamento.....	37
4. RESULTADOS.....	39
4.1. Inspeção visual.....	39
4.2. Classificação do grau de alteração	42
4.3. Sugestão de coleta de amostras e ensaios laboratoriais	43
4.4. Uso de SIG para armazenamento de dados integrados com técnicas de imageamento	46
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS.....	49

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem desempenham um papel fundamental na segurança e durabilidade das barragens de terra, estruturas essenciais para o armazenamento e gestão de recursos hídricos. Neste contexto, elementos como os drenos de pé, são projetados para conduzir a água percolada e controlar as pressões internas, contribuindo para a prevenção de falhas estruturais. O dreno de pé, frequentemente constituído de blocos de rocha, pode ter suas propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas alteradas pela ação do intemperismo. Essas alterações podem impactar a eficiência do sistema de drenagem.

A importância de identificar e monitorar as alterações físico-químicas em materiais rochosos de barragens tem sido amplamente reconhecida na literatura acadêmica. A aplicação de técnicas de mapeamento e sensoriamento remoto possibilita o diagnóstico precoce de processos de degradação. Essas abordagens permitem a identificação de alterações superficiais em rochas que compõem os drenos de pé, o que auxilia na formulação de estratégias de manutenção preventiva e gestão de riscos.

No contexto brasileiro, a relevância do tema é acentuada pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 12.334/2010. Essa política foca em inspeções e gestão de riscos, explicitando a necessidade de formar um Plano de Segurança de Barragens. Este plano classifica as estruturas de acordo com o potencial de dano e a categoria de risco, embora não aborde especificamente a detecção de alterações na camada rochosa dos drenos. Isso evidencia a necessidade de metodologias complementares que integrem dados geológicos, ambientais e geotécnicos.

Diante desse cenário, este trabalho busca responder à seguinte questão: como identificar, de forma sistemática, os processos de intemperismo e as alterações superficiais em rochas utilizadas como material drenante em drenos de pé? A dificuldade em mensurar tais efeitos, especialmente em estruturas em operação ou inativas, representa uma lacuna nos protocolos de monitoramento atualmente utilizados.

Este estudo foca nas barragens de terra com drenos de pé em enrocamento rochoso basáltico, particularmente em sistemas que utilizam tapetes filtrantes. A proposta é desenvolver uma metodologia que auxilie na caracterização das alterações

físicas das rochas, integrando ferramentas geoespaciais, indicadores visuais de degradação e ensaios de campo e laboratório. Essa abordagem visa contribuir para a segurança das barragens e para a sustentabilidade na gestão de recursos hídricos.

1.1 Justificativa

A manutenção preventiva em barragens exige inspeções e monitoramentos contínuos, capazes de identificar eventuais anomalias que possam evoluir para situações de risco, como elevação da linha freática ou surgimento de erosões internas e externas decorrentes de *piping*, colmatção de filtro, supressão, escoamento superficial, trincamento por secagem entre outros (Barbosa et al., 2002).

Dessa forma, um dos fatores comprometedores da eficiência dos sistemas drenantes está o processo de colmatção e alteração dos materiais filtrantes. Conforme demonstrado por Al-Yaqoubi et al. (2024), a deposição de partículas finas e processos biogeoquímicos reduzem tanto a capacidade de escoamento quanto elevam significativamente as pressões internas. Além disso, outros estudos de Soares e Pizzolatti (2020) evidenciam que tais alterações: (1) comprometem a permeabilidade dos filtros, (2) impactam a estabilidade estrutural, e (3) frequentemente evoluem assintomaticamente.

Nesse contexto, esse trabalho justifica-se pela elaboração de um protocolo padronizado para o mapeamento sistemático e classificação de processos de alterações superficiais das rochas drenantes de barragens de terra.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma metodologia para mapeamento e caracterização de alterações superficiais em rochas, utilizadas como enrocamento de dreno de pé em tapete de drenagem de barragens de terra.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um protocolo geoespacial para o mapeamento de eventos em escala centimétrica, visando um registro detalhado de feições de alteração;
- Caracterizar os principais indícios de alteração de rochas basálticas que possam conduzir para eventos de colmatação de filtros granulares;
- Identificar critérios para avaliar a influência das condições ambientais nas alterações superficiais das rochas drenantes utilizadas em sistemas de enrocamento;
- Propor uma metodologia de mapeamento simplificada para barragens em operação e/ou inativas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conceitos essenciais sobre barragens de terra, sistemas de drenagem, colmatação e métodos para identificar alterações em rochas basálticas. Também aborda técnicas recentes que fundamentam a elaboração de um protocolo para detectar sinais de degradação, visando a segurança e a manutenção de barragens.

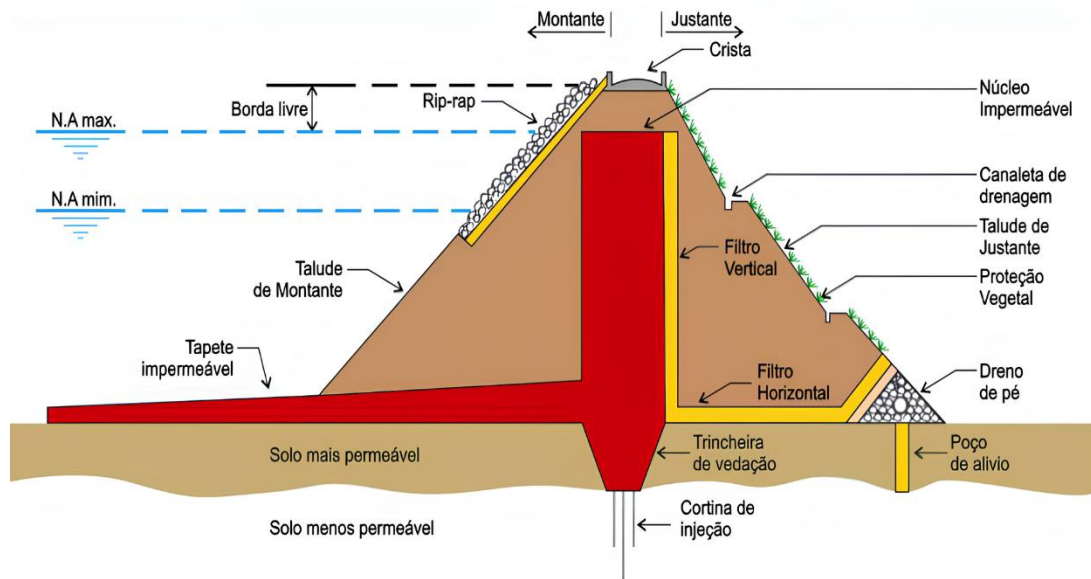
2.1 Estrutura e funcionamento de barragens de terra

As barragens de terra possuem diversas aplicações, sendo fundamentais para o armazenamento e a gestão de recursos hídricos. Elas podem ser utilizadas para a contenção de água, com foco na prevenção e controle de cheias, bem como para o abastecimento da população, dessedentação de animais, e condução/captação de água para irrigação e produção de energia. Além disso, as barragens de terra desempenham um papel estratégico na estabilização de cursos d'água e na proteção ambiental (Mariano e Silva, 2022).

A escolha por barragens de terra está frequentemente relacionada à topografia com vales amplos e abertos, que favorecem esse tipo de estrutura. A disponibilidade de materiais terrosos adequados para a construção de maciços compactados é outro fator relevante na escolha. Uma das vantagens das barragens de terra é a possibilidade de serem construídas sobre solos moles, desde que se adotem medidas adequadas de controle, como sistemas eficientes de drenagem e filtros. No entanto, essas condições também exigem atenção a riscos geotécnicos, como o *piping* (erosão interna), que pode comprometer a estabilidade da estrutura, se não for devidamente monitorado e controlado (Massad, 2010).

Uma barragem de terra é composta por diversos elementos que, em conjunto, visam a sua estabilidade e funcionamento adequado. Entre os principais componentes estão a crista, a borda livre, os taludes de montante e jusante (e suas respectivas proteções, como o rip-rap e a vegetação). A depender do projeto, elas podem contemplar, ainda, trincheira de vedação, filtros horizontais e verticais, cortina de injeção, poço de alívio, tapete impermeável e o sistema de drenagem de águas pluviais (Carvalho, 2011). A Figura 1 ilustra de forma esquemática a disposição desses componentes em uma barragem de terra.

Figura 1 – Principais elementos de drenagem de uma barragem de terra.



Fonte: Carvalho (2011).

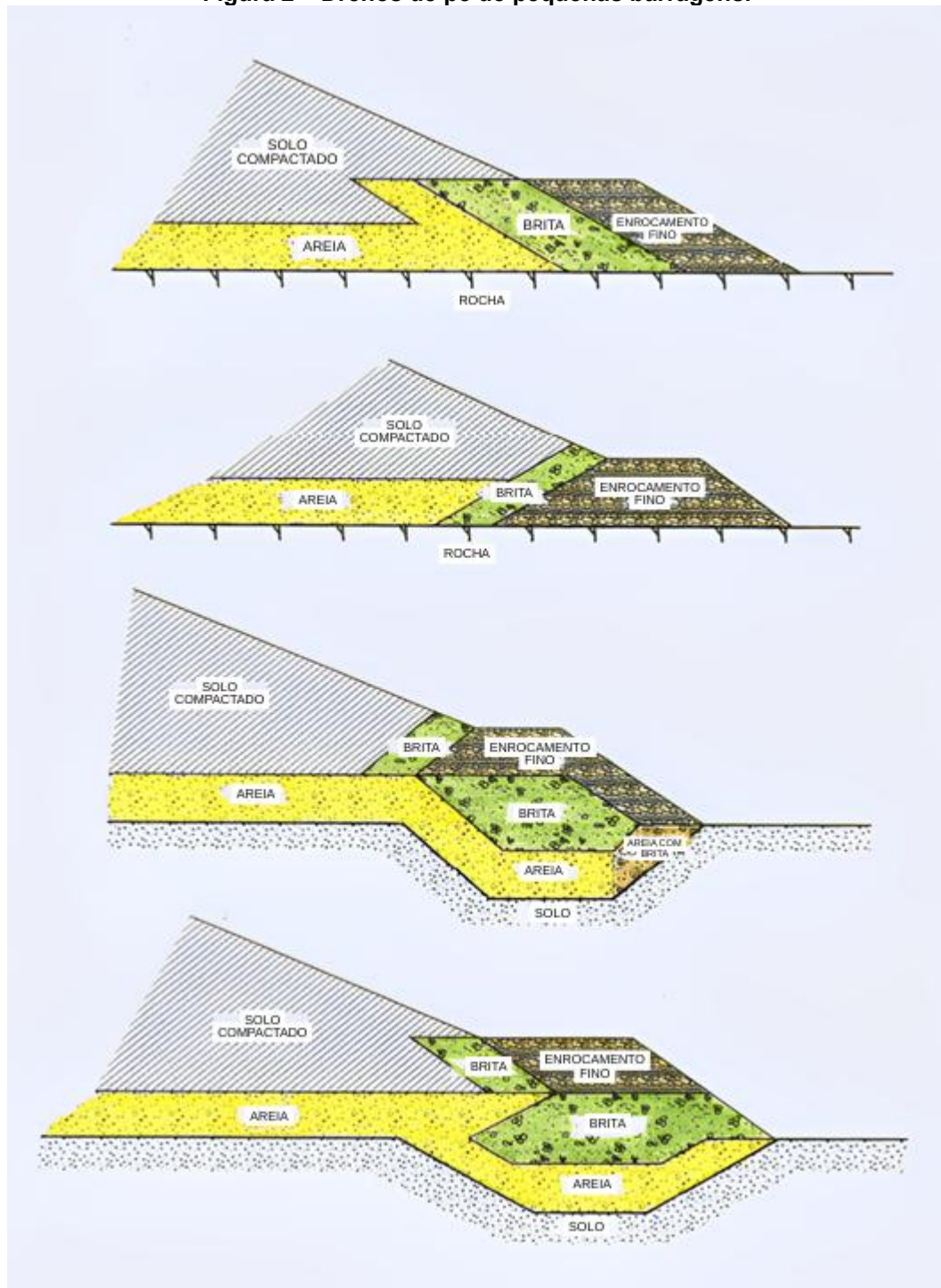
2.1.1 Sistema de drenagem

O sistema de drenagem em barragens de terra exerce um papel fundamental na segurança da estrutura, pois permite o alívio das pressões internas provocadas pela infiltração da água. Petrocelli (2019) destaca que o uso de filtros inclinados pode aumentar a eficiência na dissipação da poropressão, especialmente em condições de variação do nível d'água. Nesse contexto, os drenos de pé são amplamente utilizados para controlar o escoamento e minimizar os riscos de falhas na barragem. Calamak et al. (2018) afirmam que os drenos de chaminé, quando possuem espessura inferior a 1,5 m, não são tão eficazes na drenagem, evidenciando a importância de se seguir as recomendações de espessura mínima. O dreno de pé, por sua vez, deve ter altura correspondente a cerca de 25% da altura da barragem, com uma altura de 9 metros considerada ideal para barragens de alturas moderadas, garantindo que a face da barragem seja protegida contra infiltração e instabilidade. O critério citado não é universal, devendo o dimensionamento ser elaborado de acordo com cada caso encontrado.

O dreno de pé, localizado na base do talude de jusante, é o método mais comum de drenagem interna em barragens de terra. Sua execução pode ser feita diretamente sobre o terreno natural ou em trincheiras escavadas, as quais são preenchidas com materiais de alta permeabilidade, como brita e areia grossa. Em

projetos específicos, também se emprega o uso de tubos perfurados envolvidos por material filtrante, que auxiliam no direcionamento do fluxo (Cruz, 1996). A Figura 2 ilustra a aplicação típica de drenos de pé em pequenas barragens, evidenciando sua posição estratégica e o tipo de material usualmente empregado.

Figura 2 – Drenos de pé de pequenas barragens.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Ademais, a eficácia do dreno de pé está diretamente relacionada à qualidade dos materiais utilizados, ao seu correto dimensionamento e durabilidade. Cruz (1996) ressalta que fatores como a largura da seção, a espessura das camadas e a continuidade do sistema devem ser cuidadosamente avaliados durante a concepção do projeto, a fim de garantir tanto o adequado escoamento da água quanto a durabilidade da estrutura.

2.1.2 Importância do monitoramento

A segurança de barragens é determinada pela conformidade com quatro pilares fundamentais: requisitos estruturais, ambientais, econômicos e sociais, além do comportamento esperado. Em barragens em operação ou em fase de construção, avaliações periódicas são imprescindíveis para garantir a estabilidade e funcionalidade da estrutura. O monitoramento contínuo permite não apenas identificar falhas ou deficiências, mas também a adoção de medidas de manutenções, ações de prevenção e corretivas, em caso de emergência e de maneira ágil. Como destacado na literatura, o intervalo entre as reavaliações deve ser estabelecido considerando o potencial de dano decorrente de sua eventual ruptura, sendo estabelecido por critérios técnicos específicos (Barbosa et al., 2002).

Um estudo de caso realizado por Barbosa (2014) na Barragem Poleiros, localizada na Paraíba, foram identificados problemas como erosões e danos no sistema de drenagem superficial e interna. A Figura 3 ilustra a obstrução do dreno de pé na barragem, evidenciando os efeitos dessas anomalias na eficiência hidráulica do sistema. A obstrução do filtro de pé compromete o fluxo da água percolada, favorecendo a saturação do talude e o surgimento de *piping*, o que prejudica a estabilidade da estrutura. Para corrigir essas falhas, medidas corretivas foram aplicadas, como:

- Desobstrução do sistema de drenagem (obstrução causada por material oriundo da ação das erosões e deslizamentos);
- Reposição de solo e reestruturação da drenagem superficial.

Essas ações permitiram a recuperação da barragem, minimizando os riscos de ruptura e aumentando a segurança da estrutura.

Figura 3 – Filtro de pé obstruído pela vegetação.



Fonte: Barbosa (2014).

Além disso, em um estudo sobre a Barragem do Bezerro, no Piauí, Silva e Silva Filho (2024) identificaram a ocorrência de erosão tubular regressiva, ou seja, um entubamento (Figura 4). Como medida corretiva, foi realizado o preenchimento dos vazios no aterro com calda rigidificável, projeto de poços de alívio à jusante, além do alteamento da cota da crista da barragem. Essas intervenções foram fundamentais para melhorar a estabilidade da barragem, aumentando sua segurança estrutural.

Figura 4 – Surgência indicando erosão tubular regressiva, talude de jusante.



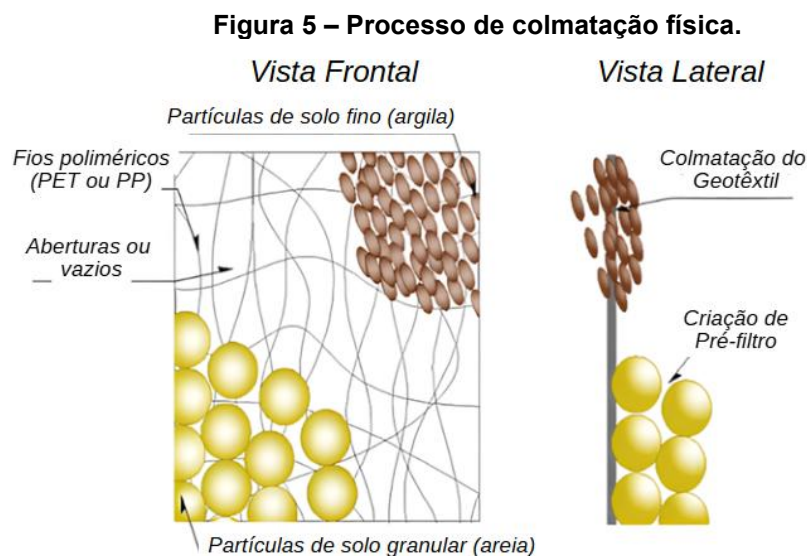
Fonte: Silva e Silva Filho (2024).

Adicionalmente, Paula et al. (2024) realizaram um estudo sobre barragens de terra em Goiânia, onde foram identificados problemas como erosão de margem, assoreamento e deterioração da manta impermeabilizada. As ações corretivas adotadas incluíram o controle de vegetação, poda de árvores e reparos na manta impermeabilizada. Essas intervenções foram essenciais para garantir a estabilidade das barragens e a segurança das comunidades ao redor.

2.2 Colmatação e Perda de Eficiência em Drenos e Filtros

2.2.1 Colmatação

A colmatação constitui um fenômeno progressivo que compromete o desempenho dos sistemas de drenagem em barragens de terra. A colmatação física, caracterizada pelo bloqueio dos poros do material drenante por partículas sólidas, é uma das formas mais comuns de obstrução em sistemas de drenagem. Ela ocorre quando partículas sólidas, geralmente transportadas pela água que percola o interior do maciço, acabam se acumulando nos vazios do filtro ou do dreno (Figura 5). Esse acúmulo bloqueia os poros do material drenante, reduzindo a capacidade de escoamento da água e, conseqüentemente, elevando as pressões internas da barragem. Com o tempo, essa redução de permeabilidade pode comprometer significativamente a função do sistema (Cui et al, 2023; Gardoni e Palmeira, 2004; Li et al, 2024).



Fonte: Naresi Júnior (2025).

Por outro lado, a colmatação química, pode ocorrer em função de variações nas condições de pH, temperatura e potencial redox nas zonas de infiltração. Situações como essa são comuns em processos de filtração em margem, quando a água superficial penetra nos sedimentos do leito do manancial. Como consequência, compostos precipitados tendem a se acumular nos vazios do filtro, reduzindo sua permeabilidade original e podendo elevar as subpressões internas no corpo da barragem (Soares e Pizzolatti, 2020).

A colmatação biológica é causada pela atividade de microrganismos, especialmente por bactérias que se desenvolvem em ambientes úmidos com presença de matéria orgânica ou ferro. O crescimento populacional dessas bactérias — como as ferrobactérias — pode gerar acúmulo de biomassa, produção de gases e formação de sais insolúveis, como hidróxidos de ferro que, quando se acumulam, formam depósitos de ocre. Esses depósitos, caracterizados por sua cor amarelada ou avermelhada, acabam obstruindo os poros do meio drenante, tornando o sistema menos eficiente e, em casos mais graves, contribuindo para a perda total da capacidade de drenagem (Baveye et al., 1998).

O Quadro 1 apresenta uma síntese comparativa dos tipos de processos de colmatação, destacando suas características, agentes responsáveis e exemplos práticos de cada tipo de colmatação.

Quadro 1 – Tipos de processos de colmatação.

Tipo de Colmatação	Definição	Cenários/Situações de campo	Impactos no Sistema de Drenagem
Física	Ocorre pela obstrução dos poros do filtro devido ao acúmulo de partículas sólidas e sedimentos	Acúmulo de partículas de areia ou argila nos filtros.	Redução da capacidade de escoamento de água, com aumento das pressões internas na barragem.
Química	Resulta de reações químicas que alteram as propriedades do material filtrante, como precipitação de sais.	Precipitação de hidróxidos de ferro e alumínio nos filtros.	Modificação das propriedades físicas dos materiais de drenagem, prejudicando a eficiência da drenagem.
Biológica	Causada pela ação de microrganismos, como bactérias e fungos, que se acumulam nos filtros e produzem substâncias que obstruem os poros.	Formação de biofilmes em sistemas de drenagem, com presença de musgo, líquen ou bactérias.	Obstrução dos poros filtrantes por matéria orgânica, o que reduz o fluxo de água e pode levar a falhas no sistema de drenagem.

Fonte: Autoria própria (2025).

2.2.2 Efeitos na eficiência do sistema

A partir dos mecanismos descritos anteriormente, segundo Peng et al. (2004), observa-se que a colmatação pode gerar consequências diretas na eficiência do sistema de drenagem. Para que esse sistema funcione de maneira eficiente ao longo do tempo, é fundamental que sua capacidade de filtração e escoamento se mantenha preservada. Esse desempenho está diretamente relacionado a três fatores críticos:

- Correto dimensionamento do sistema – Considerando vazões, gradientes hidráulicos e taxas de infiltração;
- Qualidade dos materiais empregados – Como geotêxteis, agregados e tubos de drenagem, que devem resistir a entupimentos e degradação;
- Métodos construtivos adequados – Evitando compactação excessiva, má instalação de filtros ou contaminação do meio poroso.

Al-Yaqoubi et al. (2024) demonstraram, por meio de ensaios laboratoriais, que a obstrução causada pela colmatação pode provocar diminuições consideráveis na taxa de drenagem. Em um dos testes, a vazão diminuiu de 2,1 para 1,9 litros por minuto, mesmo sob a mesma carga hidráulica.

Como destacado por Soares e Pizzolatti (2020), o acúmulo progressivo de partículas nos materiais filtrantes desencadeia dois efeitos críticos:

1. Degradação das propriedades hidráulicas:
 - a. Redução da porosidade efetiva;
 - b. Diminuição da condutividade hidráulica;
 - c. Perda de capacidade de filtração seletiva.
2. Riscos associados:
 - a. Elevação das pressões internas;
 - b. Comprometimento da estabilidade estrutural;
 - c. Potencialização de fenômenos de *piping* ou ruptura.

2.2.3 Relevância para o monitoramento e manutenção

A eficiência hidráulica dos sistemas de drenagem em barragens de terra está intrinsecamente relacionada à sua capacidade de manter a funcionalidade ao longo do tempo, mesmo quando submetidos a condições ambientais adversas. Diante dos

riscos de obstrução por processos de colmatação - seja física, química ou biológica - torna-se imperativo o monitoramento sistemático desses sistemas como medida preventiva contra falhas estruturais. No contexto brasileiro, agrava-se esta situação pelo fato de que muitas barragens carecem de protocolos regulares de inspeção e manutenção, aumentando significativamente a probabilidade de que alterações no comportamento hidráulico dos drenos permaneçam não detectadas até estágios avançados de comprometimento estrutural (Oliveira, 2008).

Nesse cenário de monitoramento necessário, Golfeto Filho (2023) destaca que a inspeção periódica é uma ferramenta fundamental para identificar precocemente indicadores de perda de eficiência, tais como: a redução da vazão no dreno de pé e o aumento da umidade nos taludes. A detecção antecipada desses problemas possibilita intervenções antes que ocorram danos mais severos. Segundo o autor, o uso de instrumentos de auscultação, aliado à observação visual e ao controle de dados históricos, constitui uma estratégia eficaz para detectar variações no desempenho dos filtros e drenos.

A adoção de planos de manutenção preventiva, conforme propõe Machado (2023), contribui não apenas para o aumento da vida útil dos sistemas de drenagem, mas também para a redução de custos associados a reparos emergenciais. A autora ainda destaca que falhas associadas à colmatação podem evoluir de forma silenciosa, sem que haja manifestações visíveis na superfície da barragem, o que reforça a importância de métodos diagnósticos confiáveis.

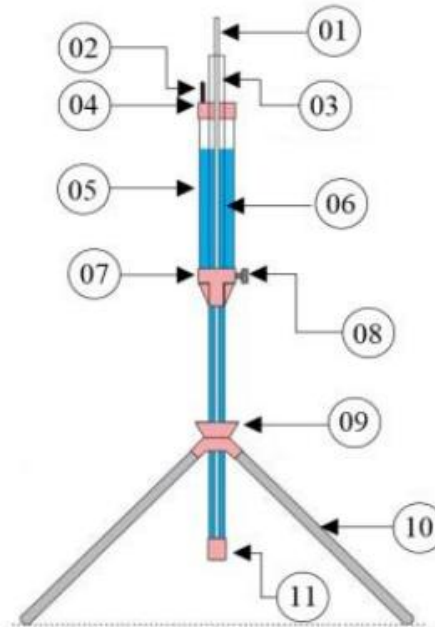
2.2.4 Ensaios de campo e laboratório

A avaliação da colmatação e da eficiência hidráulica de drenos e filtros em barragens de terra, pode ser apoiada em ensaios de campo e laboratório para caracterizar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais geológicos utilizados. Esses ensaios podem identificar alterações que comprometem o desempenho do material rochoso e, conseqüentemente, o sistema de drenagem, orientando o monitoramento e a manutenção (Ramos et al., 2021).

Nos estudos em campo, os ensaios avaliam as condições *in situ* dos materiais e a suscetibilidade à alteração, que pode acarretar em colmatação física do filtro. O ensaio com permeâmetro de Guelph (Figura 6), destaca-se por medir a condutividade

hidráulica saturada (K_s) do solo, sendo aplicável principalmente a estudos de infiltração e não diretamente ao material granular do dreno (Simo et al., 2013).

Figura 6 – Principais componentes do Permeâmetro de Guelph.



Fonte: Estavarengo (2017).

Legenda: 01 - Tubo de ar; 02 - Suspiro; 03 - Tubo com escala graduada; 04 - Tampa do reservatório; 05 - Reservatório externo; 06 - Reservatório graduado interno; 07 - Base do reservatório; 08- Válvula de depósito; 09 - Bucha do tripé; 10 - Tripé; 11 – Ponteira.

Em laboratório, os ensaios complementam as informações obtidas em campo, permitindo uma caracterização detalhada das propriedades dos materiais. Com relação aos testes de resistência mecânica, destaca-se o ensaio de carga pontual (ISRM, 1985) que é utilizado para estimar a resistência de blocos rochosos de geometria irregular, a partir da carga máxima que a amostra suporta, sendo uma ferramenta útil na avaliação da integridade dos blocos utilizados no enrocamento do dreno de pé. Já o ensaio de esmagamento (ABNT NBR NM 53, 2009) permite avaliar a resistência das de agregados graúdos sob esforços compressivos, simulando condições de carregamento monolítico, considerando no cálculo a porcentagem de quebra das partículas após aplicação de uma carga máxima limitada em função dos diâmetros dos agregados. Esses testes verificam a capacidade dos materiais de resistir à fragmentação, que pode gerar finos e agravar a colmatção (Franklin, 1985).

Os índices físicos, como densidade, teor de umidade e absorção de água, são determinados segundo normas (ABNT NBR 6457, 2016; ASTM D854, 2014). A

densidade reflete a compacidade do material, enquanto a absorção de água indica sua porosidade e capacidade de retenção hídrica.

A integração dos resultados desses ensaios permite uma compreensão abrangente do estado de alteração dos materiais constituintes dos drenos e filtros, possibilitando a identificação de alterações em relação às propriedades geotécnicas de projeto ou do início de operação da obra, que possam comprometer a eficiência do sistema de drenagem. É importante ressaltar que a representatividade das amostras coletadas é crucial para a confiabilidade dos resultados obtidos. Procedimentos adequados de amostragem garantem que as amostras reflitam fielmente as condições dos materiais *in situ*, assegurando a precisão das análises e a efetividade das medidas de manutenção propostas (Indraratna et al., 2007).

2.3 Técnicas de Mapeamento

2.3.1 Georreferenciamento de ponto e área

O georreferenciamento é uma técnica que possibilita análises espaciais consistentes em ambiente de sistemas de informação geográfica (SIG). Para a correta interpretação espacial desses dados, ele geralmente é realizado em conjunto com ferramentas de geoprocessamento. Segundo Câmara et al., (1996), o SIG integra métodos computacionais e matemáticos avançados para organizar, analisar e visualizar dados geográficos, oferecendo suporte à tomada de decisões. Essas plataformas operam com dados espaciais vinculados a sistemas de coordenadas, o que as torna especialmente úteis para mapear áreas extensas ou de difícil acesso.

O SIG não se limita apenas ao uso de software, mas envolve um sistema integrado que abrange hardware e dados. Os dados, por exemplo, podem ser obtidos por sensoriamento remoto ou levantamentos diretos em campo, e devem incluir informações espaciais (coordenadas), temporais (data da coleta e condições do ambiente) e temáticas (características do material observado). Essas três dimensões são essenciais para que o georreferenciamento reflita com precisão a realidade observada (Rosa, 2005).

Nesse contexto, a aplicação do georreferenciamento de precisão, seja pontual ou área, permite não apenas a geolocalização exata de feições de interesse, como também o monitoramento de sua evolução, contribuindo para diagnósticos mais

confiáveis. Quando integradas a bases de dados espaciais, essas informações auxiliam na geração de mapas temáticos e comparativos, que revelam padrões de alteração ao longo do tempo e orientam medidas de manutenção preventiva (Rosa, 2005).

2.3.2 Sensoriamento remoto e uso de drones para análise de imagens de alta resolução

O sensoriamento remoto é uma tecnologia utilizada para estudar e caracterizar a dinâmica de uso e ocupação do solo. Essa técnica permite a obtenção de informações sobre objetos ou superfícies sem contato físico direto, por meio de sensores que captam a energia refletida ou emitida por esses alvos. Embarcados em plataformas diversas, como satélites, aeronaves ou drones, esses sensores operam em diferentes faixas do espectro eletromagnético, possibilitando a coleta de dados em larga escala e com alta frequência temporal (Câmara et al., 1996).

No contexto do monitoramento de barragens, Gorkos (2022) comprova que sensoriamento remoto tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para a detecção e análise de alterações na estrutura e no entorno dessas construções. Por exemplo, o uso de drones equipados com câmeras de alta resolução permite a realização de inspeções visuais detalhadas, especialmente em áreas de difícil acesso, complementando as inspeções tradicionais e aumentando a segurança dos técnicos envolvidos. O estudo realizado por Gorkos (2022) demonstrou que a utilização de drones em inspeções de barragens resultou em uma correspondência de até 81% com as inspeções presenciais, evidenciando a eficácia dessa abordagem.

Em complemento a essas técnicas, imagens de satélite têm se mostrado instrumentos valiosos para o monitoramento sistemático de parâmetros hidrológicos e ambientais em reservatórios. Na pesquisa desenvolvida por Nascimento et al. (2019), foram aplicadas técnicas de processamento de imagens, como o Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI), para estimar o volume de água em reservatórios, utilizando dados do satélite Landsat 8. Os resultados obtidos mostraram-se consistentes com os dados fornecidos por agências reguladoras, validando a metodologia proposta.

Essas aplicações do sensoriamento remoto contribuem significativamente para a gestão e a segurança de barragens, permitindo o monitoramento contínuo e a

detecção precoce de possíveis problemas estruturais ou ambientais. A integração dessas tecnologias aos sistemas de informação geográfica (SIG) potencializa a análise espacial e temporal dos dados, facilitando a tomada de decisões e a implementação de medidas preventivas (Nascimento et al., 2019).

Alguns estudos demonstram a eficácia do sensoriamento remoto e do mapeamento georreferenciado na detecção precoce de processos de degradação em barragens. Nos Estados Unidos, por exemplo, técnicas como a interferometria SAR diferencial (DInSAR) têm sido aplicadas para monitorar deformações em barragens, permitindo a identificação de movimentos estruturais com alta precisão espacial e temporal. A utilização de sistemas GNSS contínuos tem contribuído ainda mais para o monitoramento em tempo real, facilitando a detecção de alterações que possam comprometer a segurança das estruturas. Na Alemanha, o uso de radar de abertura sintética terrestre (GBSAR) tem sido empregado para observar deformações superficiais em barragens, complementando dados obtidos por técnicas tradicionais e proporcionando uma visão mais abrangente da integridade estrutural (Scaioni et al., 2018).

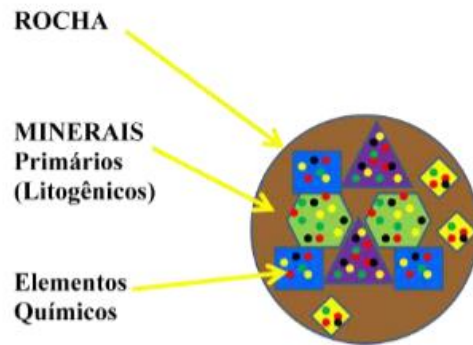
2.4 Intemperismo de rochas basálticas

2.4.1 Conceitos gerais

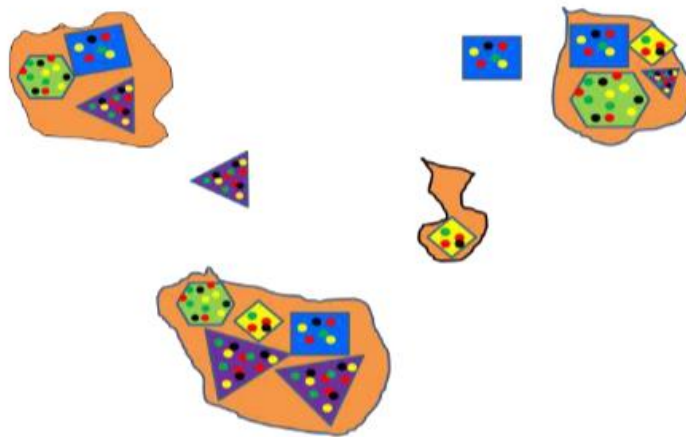
Segundo Azevedo (2015), o intemperismo é o conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que promovem a desagregação e decomposição das rochas expostas na superfície terrestre. Esses processos são influenciados por fatores como clima, relevo, composição mineralógica e atividade biológica, resultando na formação de solos e na modificação do relevo.

O intemperismo físico, também conhecido como mecânico, refere-se à fragmentação das rochas sem alteração de sua composição química (Figura 7). Esse processo é causado por variações de temperatura, congelamento e descongelamento da água, pressão exercida por raízes de plantas e atividades humanas. Em ambientes com grandes amplitudes térmicas, como regiões semiáridas, a expansão e contração dos minerais devido às variações de temperatura podem promover ou intensificar fraturas nas rochas (Azevedo, 2015).

Figura 7 – Intemperismo físico.



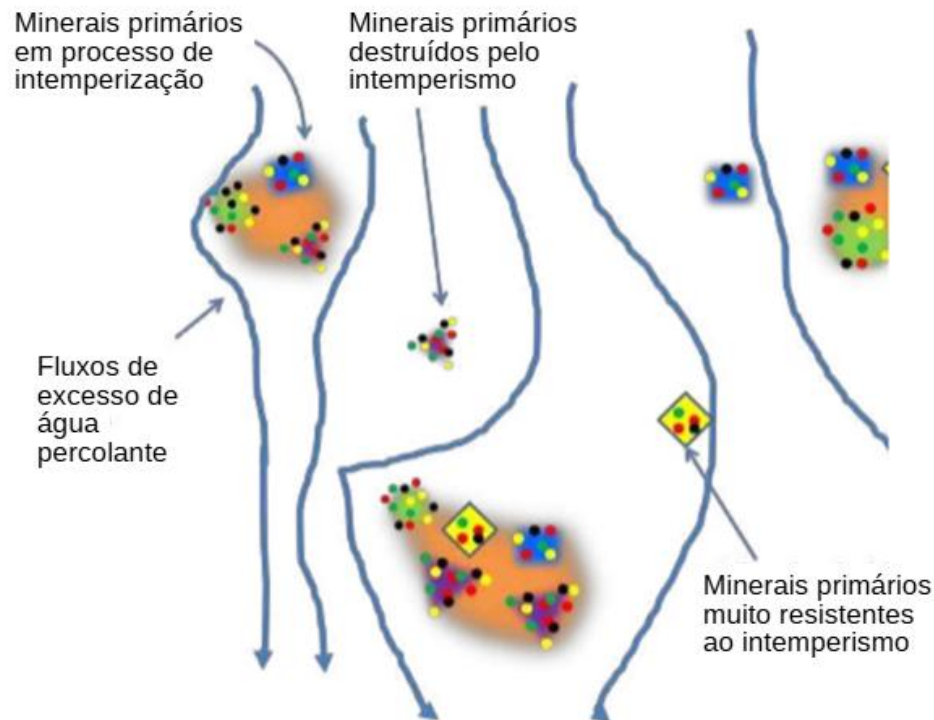
INTEMPERISMO FÍSICO



Fonte: Azevedo (2015).

O intemperismo químico envolve reações químicas que alteram a composição mineralógica das rochas (Figura 8). A água desempenha um papel fundamental nesse processo, especialmente por meio da hidrólise, onde minerais como feldspatos reagem com a água, formando argilominerais e liberando íons solúveis. A acidez da água, influenciada pela presença de dióxido de carbono, intensifica essas reações, promovendo a decomposição dos minerais (Melfi e Pedro, 1978).

Figura 8 – Intemperismo químico.



Fonte: Azevedo (2015).

Em rochas, os processos de intemperismo são particularmente relevantes, pois influenciam na formação de solos e na estabilidade de estruturas geológicas. A compreensão dos mecanismos de intemperismo é essencial para a análise geotécnica e para o planejamento de obras de engenharia em regiões com presença significativa de rochas suscetíveis a esses processos (Oliveira, 2012).

2.4.2 Grau de alteração

Ao longo da história, as rochas têm sido amplamente utilizadas como material de construção devido à sua resistência e durabilidade. No entanto, com o tempo elas podem sofrer alterações nas suas propriedades geotécnicas. Essas mudanças dependem principalmente do tipo de rocha e dos fatores ambientais aos quais estão expostas (Frazao, 2016).

O grau de alteração é um parâmetro difícil de ser definido diretamente em campo, sendo essencial, quando viável, a realização de uma análise petrográfica da rocha. Sempre que possível, essa análise deve ser combinada com ensaios quantitativos. Índices físicos e a resistência à compressão geralmente apresentam correlação com o nível de alteração da rocha (Farjallat, 1971).

Em estudos específicos sobre basaltos, como os realizados por Guzzi (1995), foram utilizados ensaios de alteração natural e acelerada para avaliar a alterabilidade de amostras da Pedreira Bandeirantes, em São Carlos (SP). Esses ensaios demonstraram que o grau de alteração pode ser quantificado por meio de índices físicos e mecânicos, como perda de massa e resistência ao impacto.

É importante ressaltar que a avaliação do grau de alteração deve considerar não apenas aspectos visuais, mas também análises mineralógicas e geoquímicas detalhadas (Melfi, 1974).

Existem diversas classificações para determinação do grau de alteração de maciços de rocha, sendo a classificação mais reconhecida representada no Quadro 2, adaptado de ISRM (1978).

Quadro 2 - Classificação do grau de alteração de rocha.

Grau	Denominações	Características da rocha
I	Rocha sã	Nenhum sinal visível de material em alteração. Pode ocorrer leve descoloração na superfície das discontinuidades.
II	Rocha pouco alterada	Descoloração indica intemperismo no material rochoso e nas discontinuidades. Toda a rocha pode estar descolorida pela alteração e estar mais fraca do que no estado de rocha sã.
III	Rocha moderadamente alterada	Menos da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. Rocha sã ou descolorida está presente como estrutura granular contínua ou como núcleos pétreos.
IV	Rocha muito alterada	Mais da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. Rocha sã ou descolorida está presente como estrutura granular descontínua ou como núcleos pétreos.
V	Rocha completamente alterada	Todo o material rochoso está decomposto ou desintegrado em solo. A estrutura original do maciço está ainda bastante intacta.
VI	Solo residual	Todo o material está transformado em solo. A estrutura original do maciço está destruída. Há grande perda de volume, mas sem transporte de material.

Fonte: Adaptado de ISRM (1978).

2.4.3 Indicadores visuais de degradação superficial em filtros e drenos

A degradação de filtros e drenos em barragens de terra é difícil de ser realizada, pois são estruturas que ficam inacessíveis. Assim, geralmente, é possível avaliar apenas os materiais que ficam em superfície. Os indicadores visuais são observados durante inspeções de campo, podendo ser complementados por ensaios

geotécnicos e fornecendo evidências preliminares de obstrução ou perda de eficiência (Teixeira et al., 2017).

Entre os indicadores visuais mais relevantes, destaca-se a mudança na coloração dos materiais granulares dos filtros e drenos. Depósitos de óxidos de ferro, carbonatos ou matéria orgânica, os quais obstruem os poros, frequentemente resultam em tons avermelhados, esbranquiçados ou escurecidos nas partículas (Botelho et al., 2006).

A degradação mecânica dos materiais, como a fragmentação de agregados rochosos, resulta no acúmulo de partículas finas que favorecem a colmatação. Visualmente, isso se manifesta como uma textura mais siltosa ou argilosa em drenos originalmente granulares, sendo observável em amostras coletadas com técnicas de alta qualidade, como sondagem de perfuração, amostragem com tubo de Wall e penetômetro de cone. Essas técnicas garantem a coleta de amostras representativas e precisas do material drenante, possibilitando a análise detalhada das suas condições. A identificação precoce desses indicadores visuais permite o planejamento de intervenções de manutenção, como lavagem de drenos ou substituição de filtros (Ferreira et al., 2011).

2.5 Coleta de amostras para caracterização de alteração superficial de rochas

2.5.1 Tipos de amostras

A amostragem é uma das etapas rotineiras da engenharia geotécnica, pois a partir dela são obtidas as amostras de material geológico que, ao serem levadas ao laboratório, permitem a realização de diferentes ensaios para a caracterização de parâmetros mecânicos, hidráulicos e físicos, essenciais para os projetos de obras civis. Ao considerar a relevância desses parâmetros na prática da engenharia, o método de extração em campo deve ser compatível com o grau de responsabilidade do ensaio pretendido, assim como com as exigências da obra que fará uso dos resultados. Nesse contexto, a amostragem é compreendida como o processo de retirada de amostras com o objetivo de avaliar suas propriedades de engenharia, podendo estas ser classificadas em deformadas ou indeformadas (Abrantes et al., 2019).

2.5.1.1 Amostras indeformadas

Uma amostra é considerada indeformada quando, em relação ao maciço do qual foi extraída, sofreu apenas alterações no estado de tensões, sem apresentar distorções ou variações de volume, preservando a estrutura original do solo praticamente inalterada, Figura 9. Alterações na densidade relativa ou na estrutura podem comprometer a interpretação dos resultados obtidos em ensaios de laboratório, tornando-os menos representativos das condições reais de campo. Portanto, a coleta de amostras de alta qualidade é fundamental para a correta caracterização do material geológico e para a determinação das propriedades de interesse (Viana da Fonseca e Pineda, 2017).

Figura 9 – Retirada de amostra indeformada.



Fonte: Poerschke (2016).

2.5.1.2 Amostras deformadas

Uma amostra deformada é aquela cuja estrutura natural do solo foi significativamente alterada durante a coleta, resultando na destruição ou modificação substancial de suas características in situ, por exemplo, textura, porosidade e teor de umidade podem não ser mais fiéis à realidade do local de origem. Esse tipo de amostra é adequado para ensaios de caracterização física, como análise

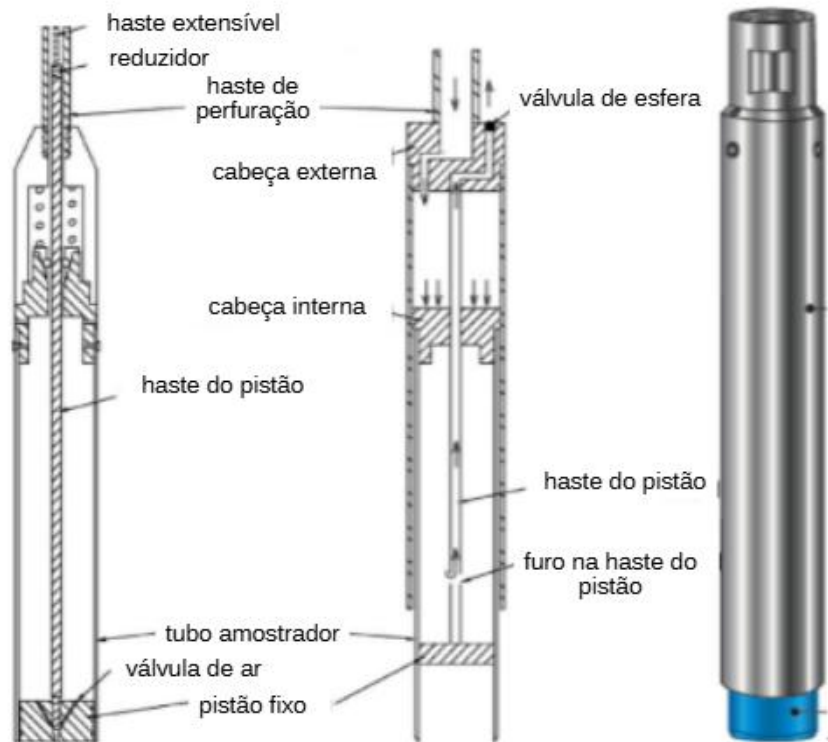
granulométrica e limites de consistência, que não requerem a preservação da estrutura original do solo (Abrantes et al., 2019).

2.5.2 Métodos de coleta em materiais não coesivos

A coleta de amostras em materiais não coesivos, como areias e pedregulhos, apresenta dificuldades particulares devido à facilidade de desagregação desses solos durante a retirada. Nesses casos, a obtenção de amostras indeformadas é mais complexa, pois há risco elevado de perda de partículas finas e alteração da densidade relativa. Por isso, o método de coleta deve ser escolhido de acordo com o tipo de ensaio a ser realizado, já que diferentes técnicas apresentam graus distintos de preservação da estrutura natural do solo (Ramos et al., 2021).

Entre os métodos empregados, tem-se o amostrador Shelby (Figura 10), um equipamento de parede fina e cravação estática, que é empregado com a intenção de obter amostras indeformadas. No entanto, a experiência prática e estudos detalhados revelam que ele frequentemente resulta em amostras perturbadas ou deformadas. Considerando o comprimento e a constituição em aço do amostrador Shelby, a remoção da amostra do tubo necessita ser realizada por extrusão, mediante compressão em pistão utilizando um extrator. Este procedimento de extrusão é uma fonte significativa de distúrbio para as amostras. A prática demonstra que as amostras recuperadas com tubos Shelby são largamente afetadas por deformação mecânica, levando à formação de fissuras, cavidades e outras alterações importantes na estrutura original do solo. Consequentemente, a qualidade das amostras é inevitavelmente comprometida, o que impacta sua representatividade para ensaios laboratoriais precisos (Viana da Fonseca e Pineda, 2017).

Figura 10 – Amostrador Shelby estacionário.



Fonte: Adaptado de Viana da Fonseca & Pineda, (2017).

Outra técnica, considerada bastante precisa, é o congelamento com nitrogênio líquido, que permite extrair blocos inteiros de solo saturado sem provocar desestruturação, preservando a configuração dos grãos e a porosidade. Apesar da eficiência, o alto custo limita seu uso a situações muito específicas (Ramos et al., 2021).

Existe também o uso do amostrador Dames & Moore (D&M), um equipamento avançado, baseado no princípio do pistão fixo hidráulico tipo Osterberg (Figura 11), desenvolvido nos Estados Unidos para obter amostras de solo de alta qualidade. Sua construção, com um *liner* de latão de paredes finas, superfície interna polida e baixo coeficiente de área (7,6%), minimiza o atrito e a perturbação durante a amostragem. A principal vantagem do D&M é a membrana de vedação anelar de neoprene, que garante a manutenção de vácuo durante a recuperação, impedindo a perda de material e a entrada de solo perturbado. Este método tem se mostrado eficaz na coleta de amostras indeformadas de areias, areias siltosas e siltes, com desempenho superior e maior taxa de recuperação em comparação com o amostrador Gel-Push em alguns casos, embora não seja recomendado para solos granulares com cascalho ou com resistência de ponta (q_c) superior a 8 MPa (Ramos et al., 2021).

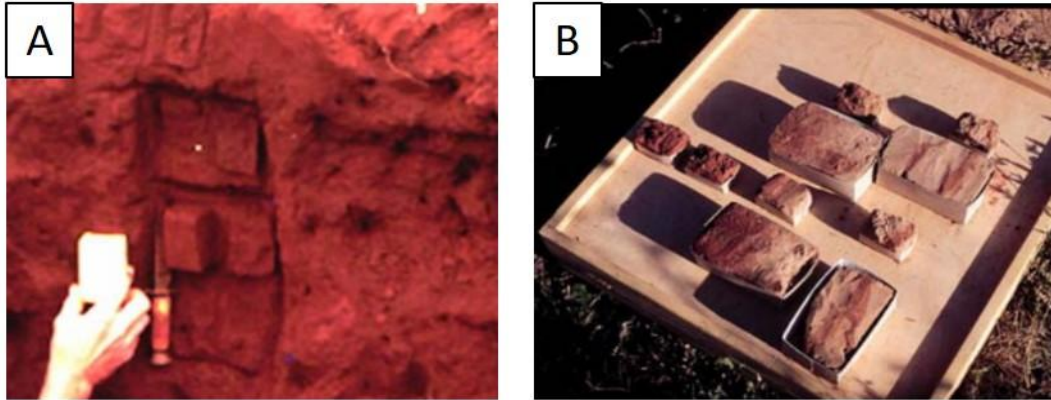
Figura 11 – Componentes do amostrador D&M.



Fonte: Ramos et al., (2021).

No processo de coleta de amostras de solo para análise micromorfológica, que estuda a microestrutura e os constituintes dos solos, é fundamental que as amostras sejam retiradas com cuidado para evitar deformações que possam comprometer a análise detalhada da estrutura do solo. Segundo Castro (2008), o uso de ferramentas adequadas, como canivetes de coleta e caixas de amostragem, é imprescindível para garantir que as amostras mantenham suas características originais. A embalagem das amostras, como mostrado na Figura 12, deve ser feita com materiais que evitem a contaminação ou perda de umidade, garantindo que o solo seja transportado de forma segura até o laboratório. O objetivo é preservar a estruturalidade do solo, o que é essencial para a análise das transformações minerais e a caracterização da microestrutura do solo, componentes fundamentais para os estudos micromorfológicos. A precisão na coleta dessas amostras, seguida de um processo adequado de resinagem, contribui para a obtenção de resultados confiáveis, permitindo uma avaliação detalhada das feições pedológicas presentes.

Figura 12 – Coleta de amostras de solo para micromorfologia. (A) Preparação para retirada da amostra. (B) Amostra retiradas em caixas plásticas.



Fonte: Castro (2008).

No caso de amostragem de materiais drenantes e blocos de enrocamento, recomenda-se a coleta manual de blocos representativos em superfície ou o uso de martelotes pneumáticos em blocos fixos. As amostras devem ser secas, limpas e etiquetadas para análise de fragmentação e coloração, conforme orientações de Franklin (1985) e ISRM (1981).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Classificação da pesquisa

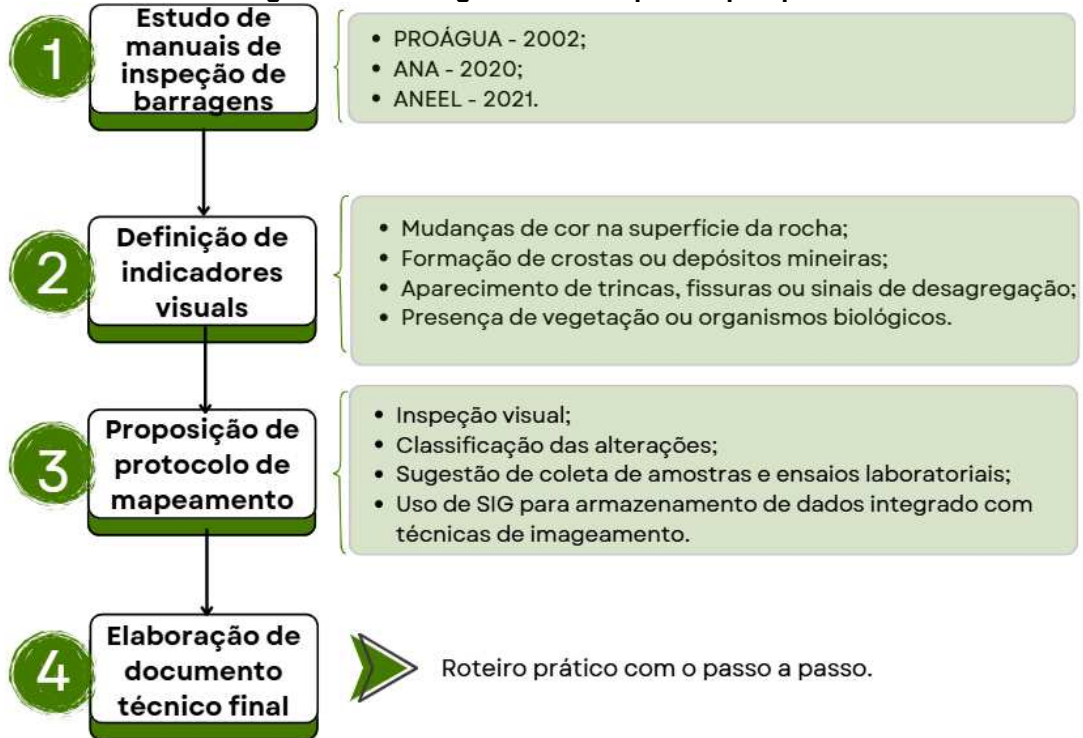
A pesquisa científica pode ser classificada quanto à abordagem, quanto à natureza, quanto aos objetivos e quanto aos procedimentos (Gil, 2002; Gerhardt e Silveira, 2009). Com isso, esta pesquisa caracteriza-se como:

- **Abordagem:** qualitativa – descreve as características de alterações superficiais de rocha, focando em aspectos qualitativos como a natureza das alterações, suas causas e padrões;
- **Natureza:** aplicada – desenvolve uma metodologia prática e útil para identificar alterações em rochas de drenos de pé em barragens em operação;
- **Objetivos:** exploratória e descritiva – investiga o comportamento de alterações superficiais blocos de enrocamento utilizados como dreno de pé a partir da observação e registro de padrões visuais e contextuais, com o intuito de descrever suas características e possíveis causas;
- **Procedimentos:** pesquisa bibliográfica, fundamentada em levantamento teórico de publicações, manuais técnicos, normas e estudos de caso sobre alterações em materiais drenantes, técnicas de mapeamento e comportamento de rochas submetidas a processos intempéricos.

3.2 Etapas da metodologia proposta

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida com base em uma abordagem predominantemente teórica, considerando as limitações de tempo e viabilidade para a realização de atividades práticas em campo. O foco foi na criação de um protocolo que, no futuro, possa servir como referência para o mapeamento de alterações superficiais em rochas de enrocamento, utilizadas em drenos de pé de barragens de terra. No fluxograma da Figura 13, são apresentadas as principais etapas adotadas no desenvolvimento da proposta.

Figura 13 - Fluxograma das etapas da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2.1 Estudo de manuais de inspeção de barragens

A inspeção visual desempenha um papel fundamental na segurança das barragens, permitindo a detecção precoce de anomalias que, se não identificadas, podem evoluir para situações críticas. Segundo Paula et al. (2024), essa prática é considerada indispensável, pois possibilita identificar problemas iniciais como erosões, trincas e vegetação inadequada, antes que se tornem mais graves e onerosos para a manutenção da barragem. Nesse contexto, foram consultados manuais e diretrizes existentes, que estruturam e padronizam as práticas de inspeção visual. Esta etapa foi importante para avaliar os parâmetros utilizados nas inspeções de campo de barragens e avaliar a existência de protocolos direcionados para drenos de pé. Para tanto, esta fase de estudo contemplou a análise do Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, desenvolvido pelo Ministério da Integração Nacional (PROÁGUA, 2002), a Ficha para inspeção regular de barragem de terra da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020) e o Checklist para inspeção em campo - Fiscalização de Segurança de Barragens da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021).

3.2.2 Definição de indicadores visuais teóricos

A identificação de alterações nas rochas dos drenos de pé das barragens de terra depende fortemente dos indicadores visuais, que podem ser observados durante as inspeções de campo. Esses sinais podem incluir mudanças na cor, textura e geometria das rochas, como descoloração, fissuras ou acúmulo de finos. A inspeção visual, realizada por profissionais capacitados, facilita a detecção dessas alterações, sendo uma ferramenta essencial para a manutenção preventiva das barragens.

A metodologia para definir esses indicadores visuais foi baseada em estudos desenvolvidos em pesquisas anteriores no Dreno de Pé da barragem de terra de Itaipu, que são:

- Pandolfi (2014) e Gottardi (2014) realizaram estudos voltados à avaliação das alterações em estruturas de barragens, com foco nas condições do dreno de pé. Pandolfi (2014) combinou a observação tátil-visual das rochas com ensaios laboratoriais simples, como compressão pontual e absorção capilar, para avaliar o grau de alteração. Os resultados se mostraram eficazes na caracterização da resistência das rochas, aspecto fundamental para a segurança da estrutura. De forma complementar, Gottardi (2014) adotou uma abordagem semelhante no Trecho 2 da barragem, utilizando o georreferenciamento dos pontos de alteração aliado à tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Essa metodologia permitiu a associação de dados qualitativos e quantitativos, facilitando o mapeamento das mudanças ao longo do tempo e possibilitando um monitoramento contínuo do estado das rochas, o que contribuiu significativamente para a tomada de decisões relacionadas à manutenção;
- Dumalak (2018) e Oliveira (2025) também se destacam ao abordar o mapeamento das áreas de alteração superficial no dreno de pé da Barragem de Itaipu, utilizando a metodologia de georreferenciamento. O estudo envolveu inspeções detalhadas em campo e a criação de um banco de dados georreferenciado para monitoramento das alterações, o que permitiu associar informações qualitativas e quantitativas sobre a degradação das

rochas. O uso de plataformas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), foi essencial para a visualização e análise espacial das áreas afetadas, além de possibilitar a integração de dados como presença de água de infiltração e vegetação, aspectos que contribuem significativamente para a compreensão da evolução dos processos de alteração;

Esses estudos reforçam a importância de uma metodologia prática para detectar alterações superficiais nas rochas. Eles demonstram que, mesmo sem equipamentos sofisticados, é possível realizar um trabalho preventivo, o que é importante para a segurança das barragens.

Com base nos estudos analisados, foi possível reunir um conjunto de características visuais que ajudam a identificar possíveis alterações superficiais nas rochas utilizadas como enrocamento. Esses indicadores foram selecionados por sua relevância em inspeções visuais e pela possibilidade de serem reconhecidos por técnicos mesmo sem equipamentos sofisticados.

Entre os principais indicadores considerados, destacam-se:

- **Mudanças de cor na superfície da rocha** - tons avermelhados ou escurecidos, que podem indicar oxidação, crescimento de fungos, algas ou presença de umidade constante;
- **Formação de crostas ou depósitos minerais** - muitas vezes associadas à precipitação de sais ou outros materiais químicos;
- **Aparecimento de trincas, fissuras ou sinais de desagregação** - sugerem processos de degradação por intemperismo físico ou químico;
- **Presença de vegetação ou organismos biológicos** - musgos e líquens, que se instalam em ambientes úmidos e podem acelerar o processo de alteração superficial.

Esses sinais servem como base para a elaboração da proposta de categorização qualitativa do grau de alteração das rochas.

3.2.3 Elaboração do protocolo de mapeamento

O protocolo foi baseado em trabalhos de mapeamento do dreno de pé da barragem de Itaipu, realizados por Oliveira (2025), Dumalak (2018), Gottardi (2014) e Pandolfi (2014), que serviram como base para estruturar as etapas de inspeção e registro. As etapas propostas são:

1. Realizar inspeção visual;
2. Classificar o grau de alteração;
3. Sugerir coleta de amostra e ensaios laboratoriais;
4. Integrar os dados obtidos em ambiente SIG, associado a técnicas de imageamento de alta resolução.

4. RESULTADOS

4.1. Inspeção visual

Esta etapa inclui a análise de manuais nacionais de inspeção existentes, bem como a proposição de um manual específico para dreno de pé.

O Manual de Segurança e Inspeção de Barragens, desenvolvido pelo Ministério da Integração Nacional (PROÁGUA, 2002) define claramente os tipos de inspeção, dividindo-os em rotineiras, formais e emergenciais, com periodicidades que variam conforme a gravidade da barragem e o nível de risco atribuído a ela. As inspeções rotineiras devem ser realizadas pela equipe local e de forma mais frequente, enquanto as inspeções formais exigem a participação de especialistas e são feitas de forma semestral ou anual, conforme o risco. Já as inspeções emergenciais devem ser realizadas sempre que houver eventos imprevistos, como chuvas intensas ou movimentações no terreno (PROÁGUA, 2002).

Em complemento a essa visão, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020) reforça a necessidade de manter um planejamento estruturado para essas inspeções, destacando a importância de se adaptar à frequência das vistorias de acordo com o risco e a classificação da barragem. Cardia (2015) também contribui com a ideia de que as inspeções devem ser personalizadas de acordo com as características da barragem, utilizando checklists que priorizem aspectos relevantes e definam claramente a gravidade de cada anomalia observada. A regularidade e a minuciosidade das inspeções são, portanto, ferramentas essenciais para o acompanhamento contínuo da integridade das barragens e para o planejamento adequado de ações corretivas. Nesse sentido, o Quadro 3 sintetiza os principais aspectos abordados nos manuais encontrados, com a indicação das anomalias abordadas em cada um deles.

Quadro 3 – Principais aspectos analisados em inspeções visuais: comparação entre manuais.

Anomalias	PROÁGUA (2002)	ANA (2020)	ANEEL (2021)
Vegetação arbórea em taludes/coroamento	SIM	SIM	SIM
Tocas/buracos de animais	SIM	SIM	SIM
Erosão superficial em taludes	SIM	SIM	SIM
Revestimento de talude inadequado	SIM	SIM	SIM
Fendilhações/trincas em taludes	SIM	SIM	SIM
Assentamentos/recalques/abaulamentos/instabilidade do talude	SIM	SIM	SIM
Entupimento de drenagem superficial (canaletas/descidas d'água)	SIM	SIM	SIM
Zonas amolecidas/alagadas no talude de jusante	SIM	SIM	SIM
Movimento no pé de jusante	SIM	SIM	SIM
Percolação/surgência/borbulhamento no pé de jusante	SIM	SIM	SIM
Drenos internos afluindo com água turva/sedimentos nas caixas	SIM	SIM	SIM
Instabilidade/erosão regressiva no canal de aproximação	SIM	SIM	SIM
Obstrução por vegetação/detritos no canal de aproximação	SIM	SIM	SIM
Deterioração de concreto (escamação/lascamento) em órgãos de descarga	SIM	SIM	SIM
Fissuras em superfícies de concreto de órgãos de descarga	SIM	SIM	SIM
Armadura exposta em estruturas de concreto	SIM	SIM	SIM
Subescavação na bacia de dissipação	SIM	SIM	SIM
Desempenho hidráulico insuficiente no dissipador/vertedouro	SIM	SIM	SIM
Vibração excessiva em órgãos de descarga	SIM	SIM	SIM
Percolação para o interior da tomada d'água	SIM	SIM	SIM
Deslocamentos em lajes/base/juntas de condutos	SIM	SIM	SIM
Obstrução/detritos em condutos e vertedouros	SIM	SIM	SIM
Assoreamento do reservatório	NÃO	NÃO	SIM
Deterioração de geomembrana/manta impermeável (vazamentos)	NÃO	NÃO	SIM
Falta de sinalização ou barreiras de proteção	NÃO	NÃO	SIM

Fonte: Autoria própria (2025).

A análise dos documentos apresentados no Quadro 3 não apenas evidencia os principais critérios utilizados na inspeção visual de barragens, como também serviu de referência para a estruturação do manual técnico sugerido neste trabalho.

Observou-se que os manuais estudados não consideram aspectos direcionados para dreno de pé, constituídos de blocos de rocha. Assim, foi elaborado um modelo de ficha de inspeção específico para dreno de pé de barragens de terra, apresentado no Apêndice A. O protocolo foi baseado na linguagem técnica utilizada nos manuais de inspeção de barragens da Agência Nacional das Águas (ANA) e do

Ministério da Integração Nacional (PROÁGUA). O protocolo também permite registrar o local de ocorrência, bem como classificar as situações em que podem ser encontrados, as magnitudes e o nível de perigo das anomalias encontradas. A saber:

LOCAL:

[PM] – **PATAMAR:** Anomalia identificada no patamar do dreno de pé;

[TD] – **TALUDE:** Anomalia identificada na região do talude do dreno de pé.

SITUAÇÃO:

[NO] – **NÃO OBSERVADA:** Não identificado o problema descrito;

[PV] – **PRIMEIRA VEZ:** O problema descrito foi identificado pela primeira vez;

[AM] – **AUMENTOU:** Foi observado aumento na ocorrência do problema descrito;

[PC] – **PERMANECE CONSTANTE:** Não houve mudança perceptível;

[DM] – **DIMINUIU:** Observada redução visual na ocorrência do problema descrito;

[DS] – **DESAPARECEU:** O problema foi resolvido através de manutenção ou cessou naturalmente;

[RE] – **REPARADO:** O problema foi corrigido por meio de manutenção ou reparo.

MAGNITUDE:

[I] - **INSIGNIFICANTE:** Anomalia pontual, sem sinais de evolução aparente;

[P] - **PEQUENA:** Anomalia de pequena dimensão, até 0,5 m²;

[M] - **MÉDIA:** Anomalia de média dimensão, entre 0,5 e 1 m²;

[G] - **GRANDE:** Anomalia de grande dimensão entre 1 e 2 m²;

[E] – **EXPRESSIVA:** Anomalia expressiva, maior que 2 m², devendo ser registrada suas dimensões.

NÍVEL DE PERIGO (NP):

[0] - **NORMAL:** Anomalia que não compromete a segurança da barragem;

[1] - **ATENÇÃO:** Anomalia que, embora não comprometa imediatamente a segurança da barragem, pode vir a comprometê-la se progredir, exigindo controle, monitoramento ou reparo;

[2] - **ALERTA:** Anomalia que compromete a segurança da barragem, requerendo ações imediatas para sua eliminação;

[3] - **EMERGÊNCIA:** Anomalia com alta probabilidade de ruptura da barragem.

COLETA DE AMOSTRA:


[S] - **SIM**: A amostra será coletada para análise detalhada;

[N] - **NÃO**: Não será necessário coletar amostras no momento, pois não foram observadas alterações significativas que justifiquem essa ação.

4.2. Classificação do grau de alteração

No enrocamento do dreno de pé, quando verificada a desintegração/decomposição de blocos de rocha, a classificação de grau de alteração de maciços da ISRM (1978) não se aplica diretamente, pois foi concebida para testemunhos de sondagem. Portanto, sugere-se a descrição das classes de alteração propostas por Dumalak (2018) atualizada por Oliveira (2025), adaptada para estruturas civis composta por blocos de rocha de dimensões de até 30 cm (Quadro 4).

Quadro 4 – Categorias de alteração de rocha para enrocamento de dreno de pé.

Categoria	Exemplo	Características qualitativas
C0		Blocos isolados poucos fraturados ou blocos pontuais em decomposição pela composição mineralógica específica. Grau de alteração A1 ou A2 da ISRM – rocha sã ou pouco alterada, com descoloração ou leve oxidação nas faces. Os blocos possuem as bordas levemente arredondadas.
C1		Áreas com concentração de blocos de rocha moderadamente fragmentados. Grau de alteração A3 da ISRM – metade do material está desintegrado, com superfícies descolorida, com fina capa de oxidação.
C2		Áreas com material rochoso superficial preservado, mas com material fino sob os blocos do enrocamento.
C3		Áreas com poucos blocos de rocha fragmentados, geralmente menor que 0,5m ² . Há presença de material decomposto em meio aos fragmentos de rocha. Grau de alteração A3 da ISRM – com processos de decomposição e desintegração.

C4		<p>Áreas com blocos de rocha fragmentados com até 1,0 m² de extensão, com maior presença de material decomposto que a categoria anterior. Grau de alteração A4 da ISRM – mais da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado.</p>
C5		<p>Áreas superiores a 1,0 m² de extensão, com blocos de rocha intensamente fragmentados e decompostos. O material decomposto possui coloração avermelhada e consistência de solo. Verifica-se uma mistura de materiais geológicos (alteração e carreado) com diferentes graus de alteração, A4 (muito alterada) à A5 (completamente alterada).</p>

Fonte: Adaptado de Oliveira (2025).

4.3. Sugestão de coleta de amostras e ensaios laboratoriais

Em um dreno de pé constituído por enrocamento, com presença de blocos de rocha com diferentes graus de alteração, sugere-se que o procedimento de coleta das amostras seja orientado conforme os tamanhos dos blocos característicos para cada grau de alteração observado e ensaio de laboratório pretendido. A escolha dos ensaios de laboratório, da mesma forma, deverá ser realizada de forma que os resultados obtidos reflitam as condições das amostras, considerando seu grau de alteração e os fatores ambientais envolvidos. Os resultados, quando comparados com valores de projeto ou da fase de construção, permitem analisar a evolução das alterações e a taxa de depreciação dos parâmetros geotécnicos. Com isso, elaborou-se o Quadro 5 para auxiliar na escolha do teste laboratorial a ser realizado.

A Figura 14 ilustra de forma simplificada a metodologia proposta para o processo de inspeção e monitoramento dos drenos de pé em barragens de terra, baseada nas etapas e critérios definidos ao longo deste capítulo. Ela resume as decisões a serem tomadas durante as inspeções visuais, desde a identificação de anomalias até a definição das ações subsequentes, como a coleta de amostras e a realização de ensaios laboratoriais. Essa representação visual facilita a aplicação prática das etapas discutidas e serve como uma ferramenta útil para os profissionais responsáveis pela manutenção e segurança das barragens, garantindo que o protocolo seja seguido de maneira sistemática e eficaz.

Quadro 5 – Tipos de amostras versus ensaios.

TIPO DE AMOSTRA	ENSAIOS											
	Análise Mineralógica			Análise Química		Índices físicos			Estudo mecânico		Durabilidade	
Blocos de rocha (sem ou pouco alterada)	Difração de Raio X (DRX)	Petrografia		Fluorescência de Raio X (FRX)	MEV-EDS	Densidade	Absorção de Água	Porosidade	Carga Pontual	Esmagamento	Abrasão Los Angeles	Ciclagem com Etilenoglicol (CEtil)
Rocha alterada (Fração areia grossa)												
Rocha alterada (Fração areia fina)												
Rocha em decomposição (deformada)												
Rocha em decomposição (indeformada)												
			Micromorfologia de Solo						Carga Pontual		Abrasão Los Angeles	

Fonte: Autoria própria (2025).

[1] ABNT NBR 15845-1 (2015)

[3] ISRM (1985)

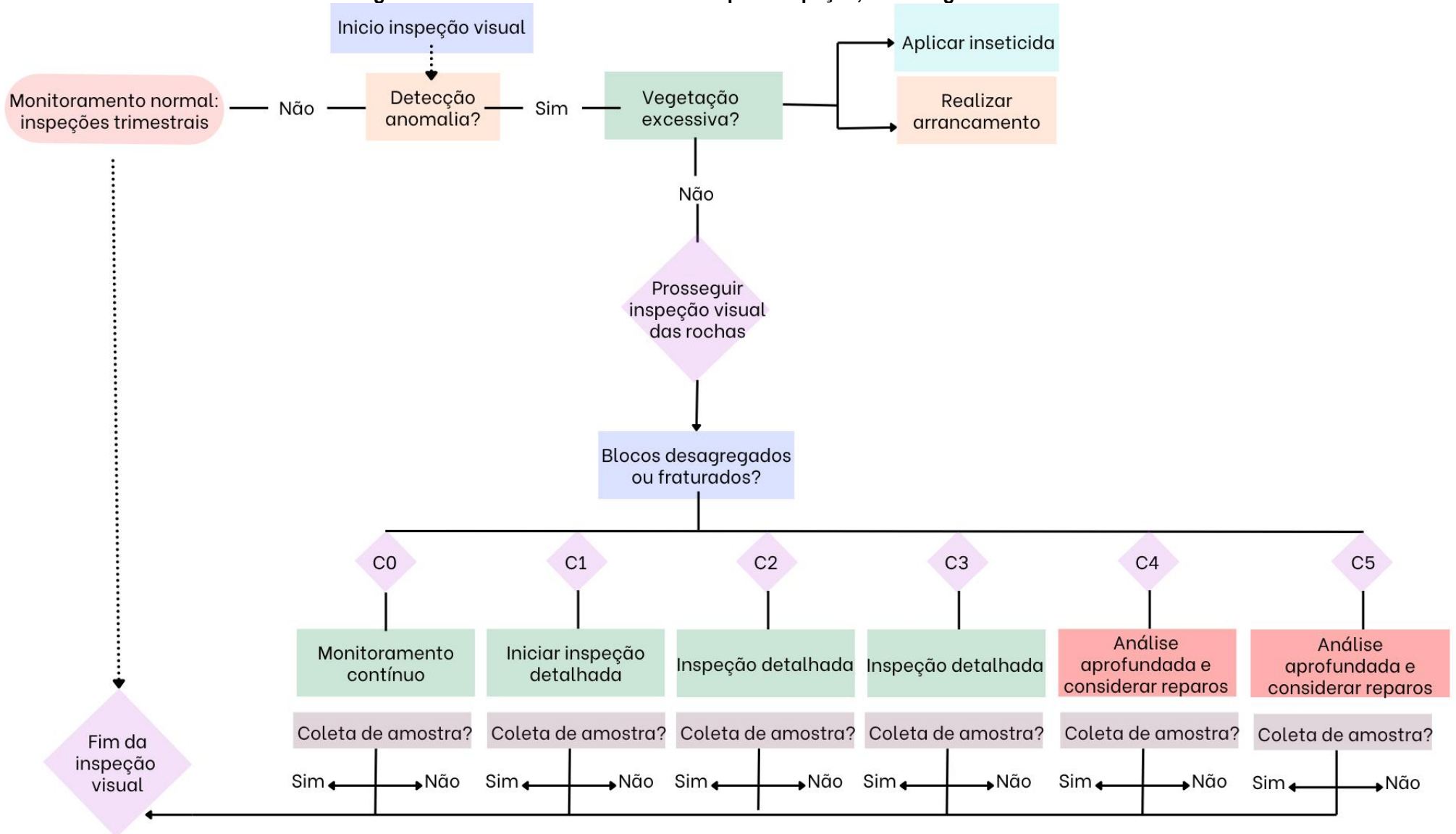
[5] ABNT NBR 12697 (1992) -

[2] ABNT NBR 15845-2 (2015)

[4] ABNT NBR 16974 (2022)

CANCELADA SEM SUBSTITUIÇÃO

Figura 14 – Fluxo de tomada de decisão para inspeção, amostragem e ensaios.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.4. Uso de SIG para armazenamento de dados integrados com técnicas de imageamento

O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e técnicas de imageamento na coleta e análise de dados de drenos de pé em barragens de terra é uma estratégia inovadora e eficaz para monitoramento contínuo e detecção precoce de alterações estruturais.

Para a coleta de imagens de dreno de pé, a altura do voo deve ser definida conforme a resolução da câmera e as condições de segurança operacional. Em ensaios experimentais similares, alturas entre 5 e 20 metros resultaram em GSDs (Ground Sampling Distance) adequados para capturar os detalhes das alterações superficiais nos blocos de enrocamento. A altitude de 5 metros foi determinada com base em boas práticas de fotogrametria em barragens de terra, permitindo uma resolução suficiente para a identificação de pequenas variações nos blocos (Shoemaker et al., 2019). Essa altura também assegura um bom equilíbrio entre precisão e cobertura da área, permitindo que a área total do dreno de pé seja mapeada de forma eficiente.

A sobreposição das imagens deve ser ajustada para 80% frontal e 70% lateral, conforme as orientações de Shoemaker et al. (2019). Essa configuração é fundamental para garantir que cada ponto da barragem seja capturado em pelo menos duas imagens. A sobreposição frontal de 80% proporciona uma cobertura contínua, permitindo que o software de fotogrametria gere um modelo 3D preciso da estrutura do dreno de pé. A sobreposição lateral de 70% assegura a cobertura total da área, evitando lacunas nas imagens e aumentando a precisão do modelo 3D.

O planejamento do voo para a coleta das imagens pode ser realizado com o uso do software DroneDeploy, uma ferramenta que permite a delimitação da área a ser sobrevoada, a definição da altitude de voo e a configuração da resolução das imagens (ver Apêndice B). A utilização dos GCPs é essencial para validar e melhorar a precisão do georreferenciamento das imagens, como recomendam Shoemaker et al. (2019) e Westoby et al. (2012), que destacam a importância do georreferenciamento preciso em projetos de fotogrametria para barragens.

Deverá ser utilizado um drone equipado com câmera de alta resolução, com sensor de imagem igual ou superior a 20MP, capaz de garantir qualidade adequada para fins de monitoramento e registro técnico. O estudo de Leite et al., (2020), utilizou

o drone DJI Phantom 4 Pro, porém, considerando levantamento geoespacial é recomendado o uso do sistema GNSS RTK (Real-Time Kinematic) que permite precisão de georreferenciamento em tempo real, garantindo que as imagens captadas sejam altamente precisas, com erros que podem ser reduzidos a apenas alguns centímetros. Com isso, sugere-se o uso do drone DJI Phantom 4 RTK ou similar.

Após a coleta das imagens, o processamento pode ser realizado utilizando o software PIX4Dmapper, que permite a descrição de classes de atributos e o armazenamento de registros fotográficos por ponto georreferenciado, aumentando a precisão da análise das condições do dreno de pé.

A integração de dados de SIG com técnicas de imageamento aéreo oferece uma visão abrangente e detalhada das condições do dreno de pé, facilitando o monitoramento contínuo e a identificação precoce de problemas. Os dados obtidos podem ser armazenados em um banco de dados georreferenciado no SIG, permitindo a análise espacial contínua das áreas de alteração e a detecção de padrões de degradação ao longo do tempo. A visualização das alterações através do SIG permite decisões informadas e o acompanhamento temporal (séries históricas), integrando-se ao ciclo de manutenção preventiva (PDCA).

Com base nessas diretrizes, o plano de voo e o processamento descritos no Apêndice B integram-se ao protocolo de inspeção, garantindo rastreabilidade e repetibilidade das campanhas. Essas técnicas complementam as observações em campo e aumentam a precisão na detecção de padrões de alteração ao longo do dreno de pé.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs uma metodologia para o mapeamento e monitoramento de alterações superficiais em rochas de dreno de pé em barragens de terra, fundamentada em protocolos teóricos para a avaliação de anomalias que podem comprometer a funcionalidade e a segurança dessas estruturas. A metodologia foi construída com o uso de técnicas de georreferenciamento, inspeção visual e drones para captura de imagens de alta precisão, buscando uma abordagem sistemática para o monitoramento contínuo e a detecção precoce de sinais de degradação.

Embora ainda não tenha sido aplicada em campo, acredita-se que sua implementação prática, aliada à sistematização dos protocolos de avaliação, poderá contribuir para estratégias preventivas que assegurem a integridade dos sistemas drenantes. Testes práticos também tendem a tornar o método mais confiável, eficiente e adaptável a diferentes realidades geotécnicas.

Recomenda-se que trabalhos futuros incluam a aplicação da metodologia em barragens reais, de modo a validar e aperfeiçoar os indicadores visuais propostos. Ensaios laboratoriais e de campo com blocos extraídos diretamente dos drenos de pé podem contribuir para quantificar os efeitos do intemperismo e correlacioná-los com parâmetros geomecânicos e hidráulicos.

Outra perspectiva relevante envolve a integração de técnicas avançadas de sensoriamento remoto, como câmeras multiespectrais e termográficas embarcadas em drones, além de sistemas GNSS de alta precisão, visando automatizar o monitoramento das áreas mapeadas. A criação de um banco de dados georreferenciado, atualizado periodicamente, pode ainda apoiar a gestão e a interpretação da evolução das alterações superficiais ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, L. G.; MALHER, C. F.; FILHO, M. R. V.; SILVA, G. B. da. **Amostragem de solos: revisão e perspectivas**. *Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico*, v. 5, 2019. DOI: 10.20951/2446-6778/v5n5a28.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Checklist de inspeção de segurança de barragens**. Brasília: ANA, 2020.
- AL-YAQOUBI, S.; AL-MAKTOUMI, A.; OBNOSOV, Y.; KACIMOV, A. **Clogging of toe drain drastically affects phreatic seepage in earth dams**. *Advances in Water Resources*, v. 190, 2024. DOI: 10.1016/j.advwatres.2024.104737.
- AZEVEDO, A. C de. **Mineralogia de solos**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015
- BARBOSA, L.; ROCHA, C. C. A.; NEVES, L. L.; PERSECHEINI, M. I. M. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148 p
- BARBOSA, R. de A. **Diagnóstico e execução de ações corretivas visando à recuperação da barragem poleiros, em Barra de Santa Rosa, PB**. 2014. 148 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2014.
- BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B. L.; DELEO, P. C.; SANCHEZ DE LOZADA, D. **Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials**. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 28, n. 2, p. 123–191, 1998. DOI: 10.1080/10643389891254197.
- BITENCOURT, H. P. G. **Uso da tecnologia de drones em barragens: Um estudo exploratório por meio da Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Segurança de Barragens para usos Múltiplos) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024.
- BOTELHO, M. R. et al. **Medida da cor em solos do Rio Grande do Sul com a carta de munsell e por colorimetria**. *Ciencia Rural*, v. 36, n. 4, p. 1179–1185, 2006. DOI: 10.1590/S0103-84782006000400021.
- BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Dispõe sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Diário Oficial da União, Brasília, 20 dez. 2010.
- CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. B. **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. Campinas: Instituto de Computação / UNICAMP, 1996. 197 p.
- CALAMAK, M.; YILMAZ, A. N.; YANMAZ, A. M. **Performance Evaluation of Internal Drains of Earthen Dams**. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 32, n. 6, p. 04018085, 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001232.

CARVALHO, D. **Barragens: uma introdução para graduandos**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2011.

CARDIA, R. J. R. **Formatação de checklist em inspeção visual de barragens**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

CASTRO, S. S. de. **Micromorfologia de solos: bases para descrição de lâminas delgadas**. 2. ed. Campinas; Goiânia: UNICAMP – IG-DGEO; UFG – IESA, 2008.

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

CUI, X.; LI, D.; HUANG, J.; HAN, Y. **Laboratory evaluation of the filtration behavior of three filters wrapped around drain pipes in fine tailings based on a radial flow test**. *Textile Research Journal*, v. 93, n. 17–18, p. 3969–3981, 2023. DOI: 10.1177/004051752311678

DUMALAK, M. **Mapeamento de áreas de alteração superficial do dreno de pé da barragem de terra de Itaipu**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

FERREIRA, C.; FONSECA, A. V. da; NASH, D. F. T. **Shear wave velocities for sample quality assessment on a residual soil**. *Soils and Foundations*, v. 51, n. 4, p. 683–692, 2011. DOI: 10.3208/sandf.51.683.

FONSECA, A. V. da; PINEDA, J. **Getting high-quality samples in ‘sensitive’ soils for advanced laboratory tests**. *Innovative Infrastructure Solutions*, v. 2, n. 1, p. 34, 2017. DOI: 10.1007/s41062-017-0086-3.

FRANKLIN, J. A. **Suggested method for determining point load strength**. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, v. 22, n. 2, p. 51–60, 1985. DOI: 10.1016/0148-9062(85)92327-7.

FRAZAO, E. B. **Metodologia para avaliação da alterabilidade de rochas a partir de estudo experimental em amostras de basaltos da UHE de Três Irmãos - Estado de São Paulo**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. DOI: 10.11606/T.18.2016.tde-23082016-134409.

GARDONI, M. G. A.; PALMEIRA, E. M. **The behaviour of partially clogged geotextiles under confinement**. In: *EUROGEO 3: 3rd European Geosynthetics Conference*, 2004, Berlin, Germany. *Proceedings...* Berlin: IGS, 2004. p. 1133–1138.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre, RS. Editora UFRGS, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. Ed. São Paulo, SP. 2002.

GOLFETO FILHO, A. R. **Inspeção e avaliação da segurança de barragens de terra e enrocamento**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2023.

GORKOS, P. **Potencial de uso de drones em inspeções de barragens: estudo de caso da barragem dos rios vacacaí e vacacaí-mirim e barragem Rodolfo da Costa e Silva**. Dissertação (Mestrado em Construção e Infraestrutura) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

GOTTARDI, R. **Avaliação da alteração superficial do dreno de pé da barragem de terra de Itaipu, trecho 2: análise qualitativa, absorção capilar e compressão pontual**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2014.

GUZZI, T. C. E. de. **Índices de alteração e de alterabilidade de rochas: aplicação para amostras de basalto da pedra bandeirantes, São Carlos (SP) [Universidade de São Paulo]**. 1995. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.18.1995.tde-18052015-084212>.

INDRARATNA, B.; RAUT, A. K.; KHABBAZ, H. **Constriction-based retention criterion for granular filter design**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 133, n. 3, p. 266–276, 2007. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:3(266).

LEITE, D. T.; MARCELINO, J.; GONÇALVES, S. **Application of drones and OSS for mapping and visual inspection of embankment dams**. In *Proceedings of the Fourth International DAM WORLD Conference* (Vol. 1, pp. 527-532).

LI, D.; CUI, X.; HUANG, J.; HAN, Y. **An experimental on filtration and clogging of geotextile filters around drain pipes in fine tailings**. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, v. 28, n. 5, p. 1767–1776, 2024. DOI: 10.1007/s12205-024-1292-0.

MACHADO, V. F. **Instrumentação e segurança de barragens de terra de pequeno e médio porte: conceitos, importância e dificuldades no panorama atual**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Goiás, Goiânia, 2023.

MARIANO, D. C. L.; SILVA, J. B. **Barragens de terra: características de seus alteamentos**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, e277111133469, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i11.33469>.

MARQUES, E. **Mapeamento de reservatórios de barragens com inteligência artificial e sensoriamento remoto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2024.

MASSAD, F. **Obras de terra - curso básico de geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. ISBN 978-85-86238-97-0.

MELFI, A. J. **Características geoquímicas e mineralógicas dos estádios iniciais da alteração superficial das rochas ultrabásicas de Barro Alto (GO)**. *Boletim IG*, v. 5, n. 0, p. 117, 1974. DOI: 10.11606/issn.2316-8978.v5i0p117-128.

MELFI, A. J.; PEDRO, G. **Estudo geoquímico dos solos e formações superficiais do Brasil**. In *Revista Brasileira de Geociências*, v. 8, p. 11–22, 1978. DOI: 10.25249/0375-7536.19781122.

NARESI JUNIOR, L. A. **Fundações e Geotecnia: Colmatção de drenos**. 2025.

NASCIMENTO, E. F.; AZEVEDO, L. S.; CANDEIAS, A. L. B. **Técnicas de processamento de imagem como subsídio para o monitoramento do volume de água em reservatórios: estudo de caso Ibimirim - PE, Brasil**. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, v. 9, n. 3, p. 146–155, 2019. DOI: 10.29150/jhrs.v9.3.p146-155.

NASCIMENTO, J. W. P. do; STROZBERG, I. M. **Ferrobactérias e sua relação com sistemas drenantes: um estudo de caso na Barragem Jaburu I – CE**. *Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2022)*, Campinas, SP, 2022. DOI: 10.4322/cobramseg.2022.0195.

OLIVEIRA, J. R. de C. **Contribuição para a verificação e controle da segurança de pequenas barragens de terra**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

OLIVEIRA, P. C. de. **Alterabilidade de areias artificiais de basalto: aplicação em sistemas de drenagem e contribuições para armazenamento de CO₂**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

OLIVEIRA, P. C. de. **Caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

PANDOLFI, T. N. **Avaliação da alteração superficial do dreno de pé da barragem de terra de Itaipu, trecho 1: análise qualitativa e parâmetros físico-mecânicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2014.

PAULA, A. E. de; MEDEIROS, L. B. de; FREITAS FILHO, F. B.; SANTOS, F. C. V. dos. **Inspeção e manutenção de barragens de terra: um estudo prático**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

PENG, W.; ESCOBAR, I. C.; WHITE, D. B. **Effects of water chemistries and properties of membrane on the performance and fouling - a model development study**. *Journal of Membrane Science*, v. 238, n. 1–2, p. 33–46, 2004. DOI: 10.1016/j.memsci.2004.02.035.

PETROCELLI, P. de S. **Avaliação da influência do sistema de drenagem inclinado durante o regime operacional transiente de uma barragem de terra**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

POERSCHKE, NELSON. **Amostras de Solos – Tipos, retirada e utilização**. Universidade Federal de Roraima. Roraima: 23p, 2016.

PROÁGUA Semi-Árido Obras (UGPO). **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Ministério da Integração Nacional, Brasília, DF, 148 p, 2002.

RAMOS, C.; MOLINA-GÓMEZ, F.; FERREIRA, C.; DA FONSECA, A. V. **Qualidade de amostras “indeformadas” em solos não coesivos recolhidas com procedimentos avançados**. *Geotecnia*, v. 2021, n. 153, p. 41–62, 2021. DOI: 10.14195/2184-8394_153_3. DOI: 10.14195/2184-8394_153_3.

ROSA, R. **Geotecnologias na geografia aplicada**. *Geography Department, University of Sao Paulo*, p. 81–90, 2005. DOI: 10.7154/RDG.2005.0016.0009.

SCAIONI, M.; MARSELLA, M.; CROSETTO, M.; TORNATORE, V.; WANG, J. **Geodetic and remote-sensing sensors for dam deformation monitoring**. *Sensors*, v. 18, n. 11, 2018. DOI: 10.3390/s18113682.

SHOEMAKER, T. A.; McGUIRE, M. P.; ROUSSEL, G. **Remote sensing approach to upstream slope inspection**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n. 11, art. 04019102, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002159.

SILVA, A. C. V.; SILVA FILHO, F. C. da. **Anomalias, incidentes e acidentes em barragens de terra: estudo de caso da barragem do bezerro em José de Freitas - PI**. ANAIS DO XXI CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2024. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/24. DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/24.

SIMO, A. T. G.; MARACHE, A.; LASTENNET, R.; BREYSSE, D. **Reconstructing hydraulic conductivity field for hydrogeological modeling in an urban environment**. *Engineering Geology*, v. 158, p. 119–134, 2013. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.03.013

SILVA, I. G. da. **Classificação e caracterização de maciços rochosos – Ensaio do esclerômetro e point load test**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, [local da instituição], 2019.

SOARES, M.; PIZZOLATTI, B. S. **Estudo do efeito da colmatação sobre a condutividade hidráulica, porosidade total e remoção da turbidez utilizando diferentes meios filtrantes, como apoio à implementação da técnica da filtração em margem**. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, v. 43, n. 1, p. 130–137, 2020. DOI: 10.11137/2020_1_130_137.

TEIXEIRA, S. H. C.; de Souza, T. F.; PASQUAL, R. S.; LUZ, C. C. da. **Método exemplificado de inspeções de campo para avaliação de anomalias e manifestações patológicas em barragens de terra.** Revista de Engenharia Geotécnica, p. 461–473, 2017. DOI: 10.4322/2SPPC.2017.038.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. **Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications.** *Geomorphology*, v. 179, p. 300-314, 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021

APÊNDICE A

PROTOCOLO PARA MAPEAR E CARACTERIZAR ALTERAÇÕES SUPERFICIAIS EM ROCHAS DE DRENO DE PÉ EM BARRAGENS DE TERRA

Desenvolvido por: Andrielly Nunes de Lara.

Orientação: Prof. Dra. Patrícia Casarotto de Oliveira.

Coorientação: Prof. Dra. Narayana Saniele Massocco.

1. INPEÇÃO VISUAL

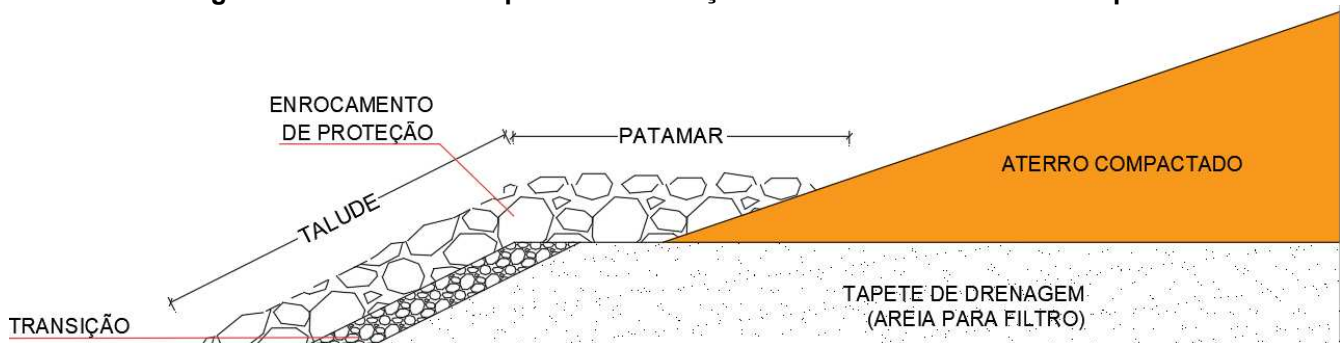
Para dar início à inspeção visual de uma barragem, o primeiro passo do profissional é analisar a documentação técnica disponível. Isso inclui a compreensão dos estudos e dos resultados das investigações geotécnicas da fundação e do maciço, a concepção do projeto, os métodos de dimensionamento utilizados, os critérios adotados, as técnicas executivas aplicadas, eventuais problemas ocorridos durante a construção e os registros das inspeções anteriores. Após essa análise inicial, o profissional deve caminhar entorno do dreno de pé observando e registrando anomalias que indiquem alterações e que possam implicar na segurança ou no bom funcionamento da barragem de terra.

LOCAL:

[PM] – **PATAMAR**: Anomalia identificada no patamar do dreno de pé;

[TD] – **TALUDE**: Anomalia identificada na região do talude do dreno de pé.

Figura A.1 – Desenho esquemático da seção transversal de um dreno de pé.



Fonte: Autoria própria (2025).

SITUAÇÃO:

[NO] – **NÃO OBSERVADA**: Não identificado o problema descrito;

[PV] – **PRIMEIRA VEZ**: O problema descrito foi identificado pela primeira vez;

[AM] – **AUMENTOU**: Foi observado aumento na ocorrência do problema descrito;

[PC] – **PERMANECE CONSTANTE**: Não houve mudança perceptível;

[DM] – **DIMINUIU**: Observada redução visual na ocorrência do problema descrito;

[DS] – **DESAPARECEU**: O problema foi resolvido através de manutenção ou cessou naturalmente;

[RE] – **REPARADO**: O problema foi corrigido por meio de manutenção ou reparo.

MAGNITUDE:

[I] - **INSIGNIFICANTE**: Anomalia pontual, sem sinais de evolução aparente;

[P] - **PEQUENA**: Anomalia de pequena dimensão, até 0,5 m²;

[M] - **MÉDIA**: Anomalia de média dimensão, entre 0,5 e 1 m²;

[G] - **GRANDE**: Anomalia de grande dimensão entre 1 e 2 m²;

[E] - **EXPRESSIVA**: Anomalia expressiva, maior que 2 m², devendo ser registrada suas dimensões.

NÍVEL DE PERIGO (NP):

[0] - **NORMAL**: Anomalia que não compromete a segurança da barragem;

[1] - **ATENÇÃO**: Anomalia que, embora não comprometa imediatamente a segurança da barragem, pode vir a comprometê-la se progredir, exigindo controle, monitoramento ou reparo;

[2] - **ALERTA**: Anomalia que compromete a segurança da barragem, requerendo ações imediatas para sua eliminação;

[3] - **EMERGÊNCIA**: Anomalia com alta probabilidade de ruptura da barragem.

COLETA DE AMOSTRA:

[S] - **SIM**: A amostra será coletada para análise detalhada;

[N] - **NÃO**: Não será necessário coletar amostras no momento, pois não foram observadas alterações significativas que justifiquem essa ação.







CÓDIGO DA AMOSTRA:

Para cada amostra coletada, deverá ser atribuído um código único de identificação, que deve ser registrado e associado à localização, tipo de material e qualquer outra característica relevante. Esse código será utilizado para rastrear a amostra durante as etapas de análise e ensaios laboratoriais.

2. CLASSIFICAÇÃO DO GRAU DE ALTERAÇÃO:

Considerando rochas de dreno de pé de barragens de terra, sugere-se a utilização do Quadro A.1 para a determinação da categoria que representa os eventos de alteração.

Quadro A.1 – Categorias de alteração de rocha para enrocamento de dreno de pé.

Categori a	Exemplo	Características qualitativas
C0		<p>Blocos isolados poucos fraturados ou blocos pontuais em decomposição pela composição mineralógica específica. Grau de alteração A1 ou A2 da ISRM – rocha sã ou pouco alterada, com descoloração ou leve oxidação nas faces. Os blocos possuem as bordas levemente arredondadas.</p>
C1		<p>Áreas com concentração de blocos de rocha moderadamente fragmentados. Grau de alteração A3 da ISRM – metade do material está desintegrado, com superfícies descolorida, com fina capa de oxidação.</p>
C2		<p>Áreas com material rochoso superficial preservado, mas com material fino sob os blocos do enrocamento.</p>
C3		<p>Áreas com poucos blocos de rocha fragmentados, geralmente menor que 0,5m². Há presença de material decomposto em meio aos fragmentos de rocha. Grau de alteração A3 da ISRM – com processos de decomposição e desintegração.</p>
C4		<p>Áreas com blocos de rocha fragmentados com até 1m² de extensão, com maior presença de material decomposto que a categoria anterior. Grau de alteração A4 da ISRM – mais da metade do material rochoso está decomposto ou desintegrado.</p>
C5		<p>Áreas superiores a 1m² de extensão, com blocos de rocha intensamente fragmentados e decompostos. O material decomposto possui coloração avermelhada e consistência de solo. Verifica-se uma mistura de materiais geológicos (alteração e carreado) com diferentes graus de alteração, A4 (muito alterada) à A5 (completamente alterada).</p>

Fonte: Adaptado de Oliveira (2025).

3. SUGESTÃO DE COLETA DE AMOSTRAS E ENSAIOS LABORATORIAIS

No que diz respeito a realização da caracterização geotécnica das rochas utilizadas em sistemas de drenagem de barragens, tem-se diversos tipos de amostras, cada uma

representando uma fase de alteração das rochas. Esses tipos de amostras incluem blocos de rocha intactos (não alterados), rochas em desintegração/decomposição (deformadas e indeformadas, em função da granulometria das partículas). O Quadro A.2 que apresenta os tipos de amostras com os respectivos ensaios. Os ensaios necessários para caracterizar as amostras foram agrupados nas categorias de análise mineralógica, índices físicos, estudo mecânico e durabilidade. Cada ensaio segue normas específicas para garantir a padronização e a confiabilidade dos resultados. E o Quadro A.3 apresenta o checklist elaborado para a inspeção visual de dreno de pé de barragem de terra.

Quadro A.2 – Tipos de amostras versus ensaios.

TIPO DE AMOSTRA	ENSAIOS												
	Análise Mineralógica			Análise Química		Índices físicos			Estudo mecânico			Durabilidade	
Blocos de rocha (sem ou pouco alterada)	Difração de Raio X (DRX)	Petrografia		Fluorescência de Raio X (FRX)	MEV-EDS	Densidade	Absorção de Água	Porosidade	Carga Pontual	Esmagamento	Abrasão Los Angeles	Ciclagem com Etilenoglicol (CEtil)	
Rocha alterada (Fração areia grossa)													
Rocha alterada (Fração areia fina)													
Rocha em decomposição (deformada)													
Rocha em decomposição (indeformada)													
			Micromorfologia de Solo						Carga Pontual		Abrasão Los Angeles		

Fonte: Autoria própria (2025).

[1] ABNT NBR 15845-1 (2015)

[2] ABNT NBR 15845-2 (2015)

[3] ISRM (1985)

[4] ABNT NBR 16974 (2022)

[5] ABNT NBR 12697 (1992) -

CANCELADA SEM SUBSTITUIÇÃO

Quadro A.3 – Checklist para inspeção visual de dreno de pé de barragem de terra.

Trecho:										Coordenadas:											
DRENO DE PÉ	LOCAL		SITUAÇÃO							MAGNITUDE					NP				COLETA DE AMOSTRA		CÓDIGO DA AMOSTRA
	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Depósito de solo erodido do aterro	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Presença de água de drenagem	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Surgência de água (em ponto concentrado e específico)	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Rebaixamentos localizados	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Descoloração dos blocos de rocha	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Blocos de rocha desagregados em partículas menores, sem presença de finos	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Blocos de rocha em decomposição, com alta presença de finos	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Bloco de rocha sobre finos (exposição do filtro)	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Rolamento de blocos	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Crescimento de vegetação	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Formação de canal de drenagem por escoamento superficial (chuva)	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Precipitação de carbonatos ¹	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
Ação de ferro bactérias ²	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
³	PM	TD	NO	PV	AM	PC	DM	DS	RE	I	P	M	G	E	0	1	2	3	S	N	
¹ descrever características ² descrever características ³ nova anomalia identificada																					
COMENTÁRIOS:																					

Fonte: Autoria própria (2025).

3.1 Coleta de blocos de rocha por grau de alteração

O Quadro A.4 foi elaborado com o objetivo de organizar e facilitar a visualização dos trechos, dos graus de alteração e dos códigos das amostras coletadas, proporcionando uma análise mais estruturada e eficiente.

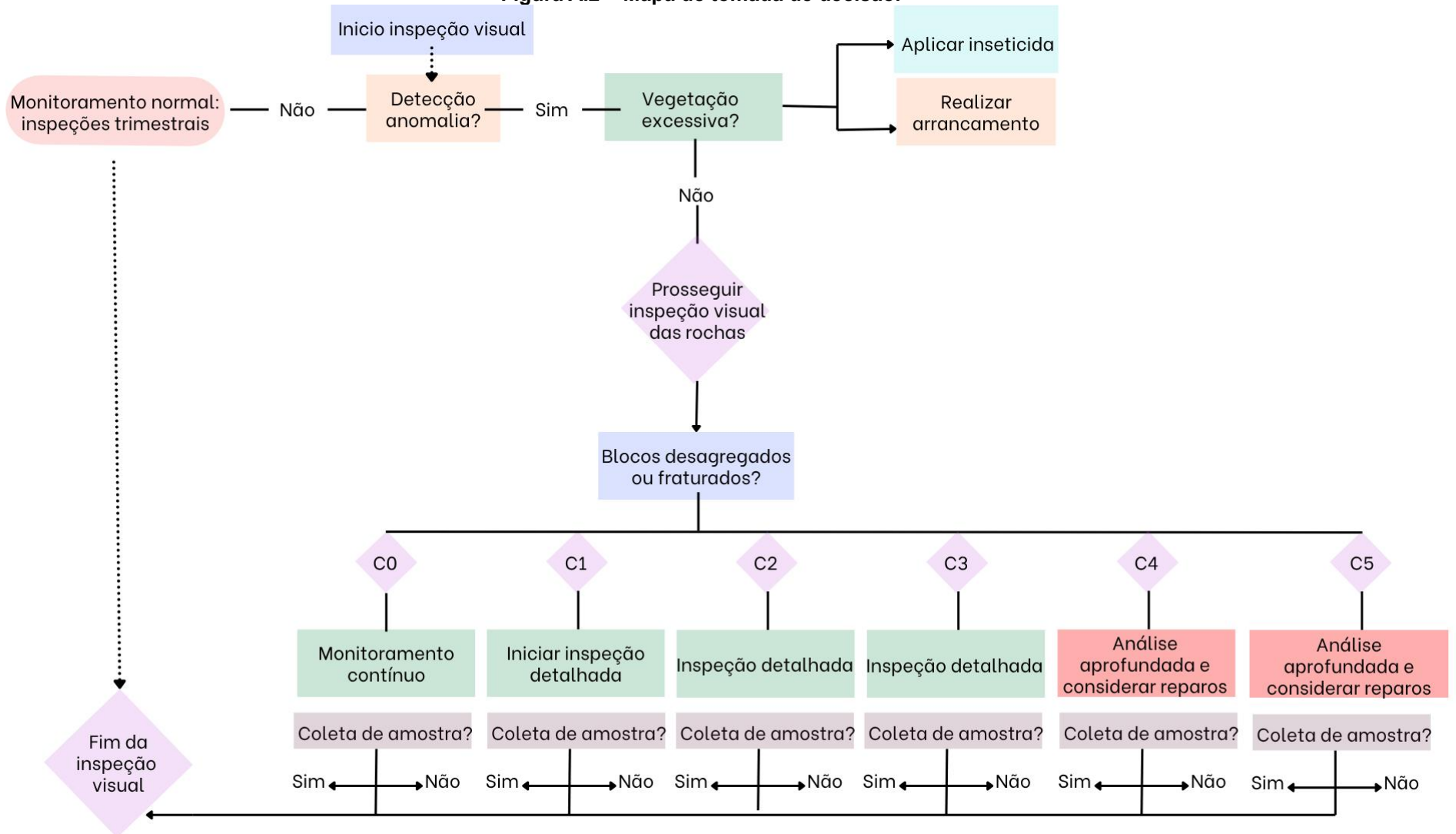
Quadro A.4 – Resumo das Amostras Coletadas: Trechos, Alterações e Códigos.

TRECHO:		COORDENADAS:				
Grau de alteração	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Código da amostra						

Fonte: Autoria própria (2025).

Para facilitar o entendimento das decisões a serem tomadas durante a inspeção, tem-se a Figura A.2.

Figura A.2 – Mapa de tomada de decisão.



Fonte: Autoria própria (2025).

APÊNDICE B

PLANO DE VOO PARA MAPEAMENTO DE ENROCAMENTO EM BARRAGENS DE TERRA

Desenvolvido por: Andrielly Nunes de Lara.

Orientação: Prof. Dra. Patrícia Casarotto de Oliveira.

Coorientação: Prof. Dra. Narayana Saniele Massocco.

1. OBJETIVO DA MISSÃO

Realizar o mapeamento de áreas de alteração em barragens para monitoramento estrutural, utilizando fotogrametria para gerar ortomosaicos e modelos digitais de elevação (DEM).

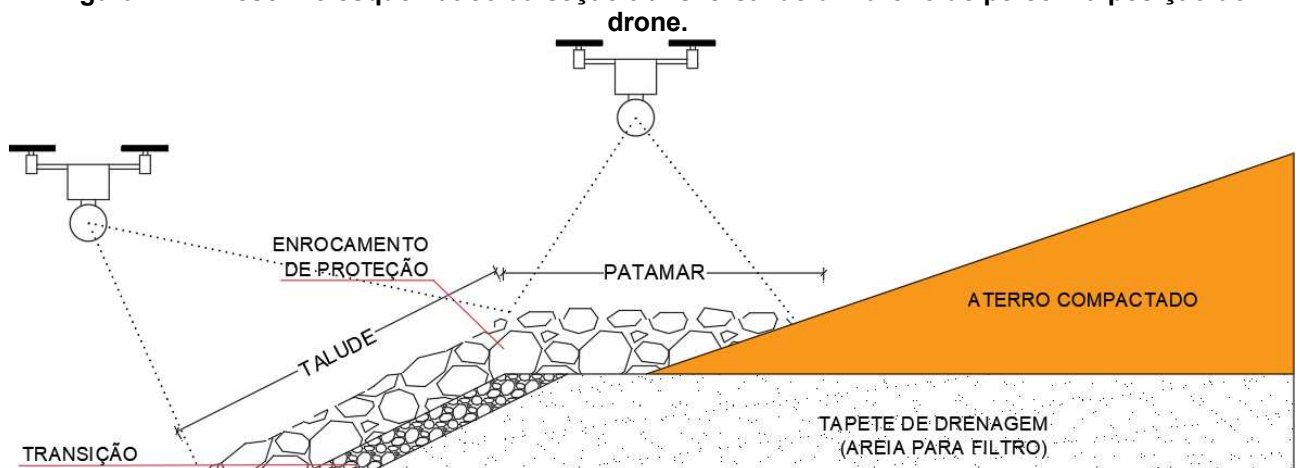
2. DEFINIÇÕES INICIAIS

- Áreas de interesse: talude de jusante e patamar de dreno de pé.
- Drones recomendados: DJI Phantom 4 RTK ou equivalente (câmera ≥ 20 MP).
- Software de planejamento de missão: Drone Deploy.

3. PARAMÊTROS DE VOO

- Altura de voo: 5m é o ideal por apresentar um bom equilíbrio entre segurança e resolução.
- GSD (Ground Sampling Distance) esperado: $\sim 1,2\text{cm/pixel}$. Esse GSD é suficiente para a análise de pequenos detalhes e alterações na superfície do dreno de pé.
- Sobreposição de imagens: frontal $\geq 80\%$; lateral $\geq 70\%$. Essas porcentagens garantem reconstrução 3D estável e reduz erros em superfícies irregulares.
- Tipo de voo: malha em grid, com linhas paralelas cobrindo toda a área.
- Velocidade: ≤ 3 m/s.
- Ângulo da câmera: vertical para mapeamento direto e ângulo oblíquo de 30° a 45° para capturar melhor a superfície inclinada do talude, do patamar e de detalhes, como observado na Figura B.1.

Figura B.1 – Desenho esquemático da seção transversal de um dreno de pé com a posição do drone.



Fonte: Autoria própria (2025).

4. CONDIÇÕES DE VOO

- **Clima:** dia nublado ou sol suave. Deve-se evitar sombras contrastantes que possam dificultar a análise.
- **Vento:** <20km/h, garantindo a estabilidade do drone e a precisão das imagens.
- **Horário:** o voo deve ser realizado no meio da manhã ou no meio da tarde, quando a luz do sol é mais suave e não gera sombras intensas, facilitando a captura de imagens claras e precisas.

5. PONTOS DE CONTROLE

- **GCPs (Ground Control Points):** serão distribuídos a cada 100m alvos georreferenciados. Os alvos podem ser quadrados de madeira, com dimensões de 30x30cm, divididos em 4 quadrados de 15x15cm (preto e branco). Deve ser colocado ao menos 2 ou 3 checkpoints adicionais para validação independente da acurácia do modelo 3D gerado, garantindo que os dados do drone estejam dentro de uma margem de erro permitida.
- **Precisão do Levantamento dos GCPs:** Utilização de GNSS RTK ou Estação total para georreferenciamento dos pontos de controle, para garantir precisão e validação geoespacial precisa dos dados obtidos.

6. PROCESSAMENTO DE DADOS

- **Software de Processamento:** Os dados capturados podem ser processados utilizando Pix4D Mapper ou software equivalente, permitindo a geração de ortomosaicos, MDS (Modelos Digitais de Superfície) e nuvem de pontos densa.
- **Saídas Esperadas:**
 - **Ortomosaico de alta resolução:** produzido com base no GSD de 1,2 cm/pixel, adequado para análise detalhada da superfície e para detectar pequenas anomalias.
 - **Modelo Digital de Superfície (MDS):** para representar as variações de elevação e realizar comparações temporais para monitoramento.
 - **Nuvem de Pontos Densa:** Para detalhamento da topografia e análise de rugosidade da superfície.
- **Análises:**
 - **Comparação temporal:** Análise de mudanças na superfície do dreno de pé ao longo do tempo, identificando áreas que apresentam evolução de anomalias.

- Cálculo de rugosidade: determinação da rugosidade da superfície para avaliar o estado do dreno de pé e mudanças de geometria dos blocos que constituem o enrocamento.
- Detecção de deslocamento de blocos, após voos em diferentes períodos (série histórica): Análise dos dados 3D para verificar se há movimentação ou alterações nos blocos do dreno de pé, sinalizando possíveis problemas.

7. RESUMO DOS PARAMÊTROS PRINCIPAIS

- Altura de Voo: 5m
- Resolução (GSD): Aproximadamente 1,2 cm/pixel
- Sobreposição das Imagens: 80% frontal / 70% lateral
- Velocidade de Voo: 2–3 m/s
- Ângulo da Câmera: vertical + oblíquos 30°– 45°
- Padrão de Voo: Grid duplo
- GCPs: Pelo menos 5 GCPs + checkpoints para validação.
- Software de Processamento: Agisoft Metashape, Pix4D Mapper ou equivalente.

REFERÊNCIAS

LEITE, D. T.; MARCELINO, J.; GONÇALVES, S. Application of drones and OSS for mapping and visual inspection of embankment dams. *In Proceedings of the Fourth International DAM WORLD Conference* (Vol. 1, pp. 527-532).

SHOEMAKER, T. A.; MCGUIRE, M. P.; RUSSELL, G. Remote Sensing Approach to Upstream Slope Inspection. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 145, n. 11, p. 04019102, 2019. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002159.

WESTOBY, M. J. et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, v. 179, p. 300–314, 2012. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.