



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

EUDES JOSÉ MELO DE BARROS

**UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EMBARCADA EM RPA
COMO ALTERNATIVA DE MONITORAMENTO DE SURGÊNCIAS EM UMA
BARRAGEM DE MINERAÇÃO**

Tucuruí – PA

2024

EUDES JOSÉ MELO DE BARROS

**UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EMBARCADA EM RPA
COMO ALTERNATIVA DE MONITORAMENTO DE SURGÊNCIAS EM UMA
BARRAGEM DE MINERAÇÃO**

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção de créditos referentes à Dissertação de Mestrado.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Fernanda Pereira Gouveia.

Tucuruí – PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B277u Barros, Eudes José Melo de.
UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA
EMBARCADA EM RPA COMO ALTERNATIVA DE
MONITORAMENTO DE SURGÊNCIAS EM UMA
BARRAGEM DE MINERAÇÃO / Eudes José Melo de Barros. —
2024.
80 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^a. Dra. Fernanda Pereira Gouveia

1. Termografia infravermelha. 2. RPA. 3. Inspeção de
barragem. 4. Surgências. I. Título.

CDD 624

EUDES JOSÉ MELO DE BARROS

**UTILIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EMBARCADA EM RPA
COMO ALTERNATIVA DE MONITORAMENTO DE SURGÊNCIAS EM UMA
BARRAGEM DE MINERAÇÃO**

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará para obtenção de créditos referentes à Dissertação de Mestrado. Orientadora: Prof.^a Dr.^a. Fernanda Pereira Gouveia. Tucuruí, 17 de maio de 2024.

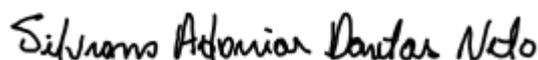
Aprovado por:

Documento assinado digitalmente
gov.br FERNANDA PEREIRA GOUVEIA
Data: 26/08/2024 21:43:15-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a. Fernanda Pereira Gouveia, Dr.^a. em Estruturas e Construção Civil
(NDAE/PEBGA/UFPA)
(Orientadora)



Prof. Julio de Alencar Junior, Dr. em Engenharia Civil (NDAE/PEBGA/UFPA)
(Examinador Interno)



Prof. Silvrano Adonias Dantas Neto, Dr. em Geotecnia (PPGEC/UFC)
(Examinador Externo)

RESUMO

As inspeções de segurança têm por objetivo a detecção de anomalias das estruturas, devendo o empreendedor garantir estes procedimentos, conforme Resolução ANM n° 95/2022. Assim, muitas mineradoras vêm buscando métodos ou técnicas mais eficientes que possibilitem menor uso de recursos e ao mesmo tempo, maior controle das informações dos locais inspecionados. Nos casos de detecção de áreas com surgências, pesquisas demonstram que a termografia infravermelha embarcada em RPA (Remotely Piloted Aircraft), popularmente conhecido como drone, (TERMO-RPA) é eficiente na identificação de áreas com umidade e infiltrações. Logo, o objetivo da pesquisa é propor a utilização desse método nos procedimentos de inspeção de uma barragem de mineração, visando a detecção de áreas com surgências. A metodologia adotada compreendeu as seguintes etapas: a) Caracterização da barragem; b) Descrição da metodologia dos procedimentos de inspeção TERMO-RPA; c) Tratamento das imagens da câmera térmica após inspeções; d) Ensaios de caracterização do solo coletado das regiões para a classificação e análise de possível influência na detecção das surgências; e) Determinação das variáveis ambientais das regiões inspecionadas; f) Elaboração e análise do mapeamento termográfico TERMO-RPA, g) Descrição dos procedimentos de inspeção de rotina da barragem e vantagens da inspeção com o método TERMO-RPA. Concluiu-se que existe uma correlação inversamente proporcional entre as temperaturas obtidas da termografia do solo e a umidade do solo, ou seja, as áreas de menor temperatura apresentaram maiores percentuais de umidade, enquanto que nas áreas de maior temperatura, a umidade foi menor, sendo este comportamento verificado nos dois períodos (seco e chuvoso). Não foi possível obter uma conclusão assertiva sobre a influência do tipo de solo e a eficácia da detecção de surgências, já que as regiões com presença de umidade são compostas pelo mesmo tipo de solo. Foi possível identificar vantagens no uso do TERMO-RPA quando comparado com as inspeções de rotina realizadas pelo empreendedor, sendo estas: aspecto da segurança com redução a exposição de riscos; maior agilidade; ausência de restrições quanto ao acesso aos locais de inspeção; no aspecto campo de alcance possibilita a variação de tomada de imagens termográficas da barragem, conforme altitudes desejadas. Por fim, sugere-se como trabalhos futuros avaliar a influência das condições ambientais como temperatura e umidade, bem como a presença de vegetação na superfície do solo no uso do método TERMO-RPA.

Palavras-chave: termografia infravermelha; RPA, inspeção de barragem, surgências.

ABSTRACT

Safety inspections aim to detect anomalies in structures, and the entrepreneur must guarantee these procedures, in accordance with ANM Resolution No. 95/2022. Therefore, many mining companies have been seeking more efficient methods or techniques that allow for less use of resources and, at the same time, greater control of information from inspected locations. In cases of detecting areas with emergencies, research shows that infrared thermography on board a RPA (Remotely Piloted Aircraft), popularly known as a drone, (TERMO-RPA) is efficient in identifying areas with humidity and infiltrations. Therefore, the objective of the research is to propose the use of this method in the inspection procedures of a mining dam, aiming to detect areas with emergencies. The methodology adopted comprised the following steps: a) Characterization of the dam; b) Description of the methodology of TERMO-RPA inspection procedures; c) Treatment of thermal camera images after inspections; d) Characterization tests of the soil collected from the regions for classification and analysis of possible influence on the detection of emergencies; e) Determination of environmental variables in the inspected regions; f) Preparation and analysis of TERMO-RPA thermographic mapping, g) Description of routine dam inspection procedures and advantages of inspection with the TERMO-RPA method. It was concluded that there is an inversely proportional correlation between the temperatures obtained from soil thermography and soil humidity, that is, areas with lower temperatures presented higher percentages of humidity, while in areas with higher temperatures, humidity was lower. This behavior was observed in both periods (dry and rainy). It was not possible to reach an assertive conclusion about the influence of the type of soil and the effectiveness of detecting emergencies, since the regions with the presence of humidity are composed of the same type of soil. It was possible to identify advantages in using TERMO-RPA when compared to routine inspections carried out by the entrepreneur, namely: safety aspect with reduced risk exposure; greater agility; absence of restrictions on access to inspection sites; In terms of range, it makes it possible to vary the taking of thermal images of the dam, depending on desired altitudes. Finally, future work is suggested to evaluate the influence of environmental conditions such as temperature and humidity, as well as the presence of vegetation on the soil surface when using the TERMO-RPA method.

Keywords: infrared thermography; RPA, dam inspection, water outcrop.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal de uma barragem de terra homogênea.	7
Figura 2 - Diagrama com o esquema de monitoramento por satélite.	13
Figura 3 - Aerolevante Laser.	14
Figura 4 - Imagem gerada do sonar em uma barragem.	15
Figura 5 – Infiltração a jusante da barragem.	18
Figura 6 – Detecção de variação térmica na zona de ruptura da barragem artificial.	19
Figura 7 - a) Imagem térmica de uma torre de resfriamento b) imagem visual.	20
Figura 8 – B, C e D são regiões úmidas identificadas pela termografia infravermelha.	20
Figura 9 – Barragem de terra artificial e imagens térmicas.	21
Figura 10 – Fluxograma das Etapas da metodologia da Pesquisa.	23
Figura 11 - Seção transversal do barramento conforme Relatório <i>As Is</i>	24
Figura 12 - Vista em perfil do sistema extravasor da barragem.	26
Figura 13 - Vista em planta do sistema extravasor da barragem.	27
Figura 14 - Seções transversais da barragem com indicação dos piezômetros.	27
Figura 15 – Equipamento termo visor infravermelho embarcado em RPA.	30
Figura 16 - Regiões inspecionadas e o percurso da rota de sobrevoo.	31
Figura 17 – Planejamento das inspeções TERMO-RPA.	32
Figura 18 – Dados de pluviometria.	33
Figura 19 – Etapas definidas para o tratamento das imagens obtidas da câmera térmica.	34
Figura 20 – Exemplo da imagem termográfica resultante do processo de tratamento.	34
Figura 21 – Tabela de classificação do solo conforme metodologia TRB.	35
Figura 22 – Registro da etapa de coleta das amostras de solo.	35
Figura 23 - Mapeamento termográfico resultante da inspeção TERMO-RPA no período seco.	39
Figura 24 - Mapeamento termográfico resultante da inspeção TERMO-RPA no período chuvoso.	40
Figura 25 – Modelo reduzido da Ficha de Inspeção Regular –FIR utilizada pelo empreendedor.	50
Figura 26 – Fluxograma proposto para as inspeções TERMO-RPA.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo comparativo dos principais métodos construtivos de barragens de rejeito.	6
Quadro 2 - Instrumentos utilizados para monitoramento das barragens de mineração.	11

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configurações definidas para o sobrevoo.....	29
Tabela 2 - Classificação obtida para os solos das quatro regiões.....	38
Tabela 3 – Informações dos procedimentos de inspeção adotados pelo empreendedor.	49
Tabela 4 – Comparação inspeção convencional adotada pelo empreendedor e inspeção com o TERMO-RPA.....	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores médios da umidade do solo e D.P para as regiões no período seco.....	41
Gráfico 2 – Valores médios da temperatura do solo e D.P para as regiões no período seco.	42
Gráfico 3 – Valores associados de umidade e temperatura do solo para as regiões no período seco. ..	42
Gráfico 4 – Correlação entre temperatura do solo e umidade do solo para as regiões inspecionadas no período seco.	43
Gráfico 5 – Valores médios da umidade do solo e D.P para as regiões no período chuvoso.....	44
Gráfico 6 – Valores médios da temperatura do solo, e D.P conforme as regiões no período chuvoso.	44
Gráfico 7 - Valores combinados de umidade e temperatura do solo para as regiões no período chuvoso.	45
Gráfico 8 - Correlação entre temperatura do solo versus umidade do solo no período chuvoso.	45

LISTA DE NOMENCLATURAS E ABREVIATURAS

ABCP Associação de Concreto Portland

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI *American Concrete Institute*

ASTM *American Society for Testing and Materials*

CBDB Comitê Brasileiro de Barragens

CCR Concreto Compactado com Rolo

CCV Concreto Massa Convencional

ICOLD *International Commission on Large Dams*

MMF Método do Módulo de Finura dos Agregados

NBR Norma Brasileira Regulamentadora

NM Norma Mercosul

PNSB Política Nacional de Segurança de Barragens

RAA Reação Álcali-Agregado

SIGBM Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração

SNISB Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

TERMO-RPA Termografia infravermelha embarcada em RPA

UHE Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.1.1	Objetivo Geral	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.2	JUSTIFICATIVA	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	BARRAGENS DE MINERAÇÃO.....	5
2.1.1	Barragem de aterro de seção homogênea.....	7
2.1.2	Propriedades e classificação dos solos	8
2.2	MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE MINERAÇÃO.....	9
2.3	TECNOLOGIAS APLICADAS À MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE BARRAGEM ...	12
2.3.1	Monitoramento por Satélite.....	12
2.3.2	Monitoramento com LASER – LIDAR.....	13
2.3.3	Sonar para monitoramento de áreas submersas	14
2.3.4	RPA (<i>Remotely Piloted Aircraft</i>).....	15
2.4	UTILIZAÇÃO DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS POR MEIO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.....	17
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	23
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO	23
3.1.1	Fundação	24
3.1.2	Maciço.....	25
3.1.3	Drenagem interna	25
3.1.4	Drenagem superficial	26
3.1.5	Sistema Extravasor.....	26
3.1.6	Instrumentação da barragem	27
3.2	METODOLOGIA DOS PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO COM O USO DO MÉTODO TERMO-RPA.....	28
3.2.1	Plano do sobrevoo e parâmetro de sobrevoo.....	28
3.2.2	Definição das regiões de inspeção e rota do sobrevoo	30
3.2.3	Campanha de inspeções das regiões analisadas	31
3.3	TRATAMENTO DAS IMAGENS DA CÂMERA TÉRMICA APÓS INSPEÇÕES COM TERMO-RPA.....	33
3.4	REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO COLETADO IN SITU PARA A CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL.....	34
3.5	OBTENÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA DO AR PARA OS PONTO DE INSPEÇÃO.....	36

3.6 ELABORAÇÃO E ANÁLISE DO MAPEAMENTO TERMOGRÁFICO DA BARRAGEM .	36
3.7 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO DE ROTINA DA BARRAGEM E VANTAGENS DA INSPEÇÃO COM O MÉTODO TERMO-RPA.	37
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
4.1 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO COLETADOS DAS REGIÕES INSPECIONADAS	38
4.2 RESULTADO DAS INSPEÇÕES COM O USO DO MÉTODO TERMO-RPA	38
4.2.1 Análise do mapeamento termográfico resultante das inspeções TERMO-RPA no período seco.....	41
4.2.2 Análise do mapeamento termográfico resultante das inspeções TERMO-RPA período chuvoso	43
4.2.3 Influência do tipo do solo das regiões inspecionadas na eficácia da detecção das surgências controladas	46
4.3 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO DE ROTINA DA BARRAGEM E VANTAGENS DA INSPEÇÃO COM O MÉTODO TERMO-RPA	47
4.3.1 Descrição dos procedimentos de inspeção da barragem estudo de caso	47
4.3.2 Proposta das inspeções com o uso do método TERMO-RPA.....	52
5 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE A	61
APÊNDICE B	64

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de barragens é realizado, basicamente por meio das inspeções visuais, leituras e análises dos dados de instrumentos. Segundo Scaioni et al. (2018), tal atividade não tem apenas o objetivo de alertar um colapso próximo, mas fornecer informações úteis para verificar os parâmetros do projeto, investigar os motivos causadores dos processos de deformação e aprender lições a serem implementadas em projetos futuros.

Conforme as Resolução ANM n° 95/2022, o empreendedor deve realizar inspeções regulares e especiais. A primeira deve ser realizada regularmente, com a periodicidade quinzenal e visa identificar e avaliar eventuais anomalias que afetem potencialmente as condições de segurança e de operação da barragem, bem como seu estado de conservação. A especial visa avaliar as condições de segurança da barragem em situações específicas, sendo realizada por equipe multidisciplinar de especialistas.

Para as situações específicas são geradas maiores demandas por inspeções visuais, sendo uma boa alternativa o uso de técnicas mais eficientes. Essa inspeção é mais detalhada e é feita quando há anomalias detectadas durante as inspeções regulares. A inspeção especial é fundamental para garantir a estabilidade da barragem.

Nas últimas décadas, o monitoramento de barragens se beneficiou do desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto de plataformas terrestres e de satélite que ofereceram oportunidades sem precedentes para melhorar a análise estrutural, uma vez que estenderam o monitoramento praticamente para todas as estruturas de uma barragem, em vez de um número limitado de pontos de controle (SCAIONI et al., 2018).

Diversas tecnologias já vêm sendo consideradas pelos empreendedores no processo de inspeção das barragens de mineração, podendo citar o uso de RPA (conhecido também como VANT ou drones) para a detecção de fissuras, erosões etc., utilizando o registro de imagens das câmeras destes equipamentos. Especialistas reconhecem o uso dos RPA's como uma ferramenta adequada para inspeções de campo, tanto de obras de infraestrutura, quanto aerofotogrametria e geração de mapas tridimensionais (BUFFI et al., 2017). Já para a detecção de surgências, o que se observa é a adoção de inspeção visual, o que exige mais tempo e recursos humanos, sendo a aplicação de novos métodos ou técnicas de inspeção, uma oportunidade de estudo.

Segundo Cortizo (2007), a partir da década de 90 a evolução do sistema para geração de imagens térmicas estava diretamente relacionada com os avanços da eletrônica e da computação.

A termografia é um método não destrutivo e não invasivo, é possível realizar a detecção da radiação emitida pelo objeto em análise e convertê-la em uma imagem bidimensional junto a um mapa térmico que permita a leitura da temperatura (SANTOS, 2012).

Como consequência, a utilização da termografia infravermelha se expandiu em diversas áreas. Com ampla aplicabilidade, é empregue tanto militarmente, como na indústria, na medicina e na construção civil, por ser uma técnica de monitoração e de ensaios não destrutivos, sendo utilizada em situações nas quais a variação de temperatura na superfície possa indicar alguma inconformidade (TITMAN, 2001).

Neste contexto, tem-se a barragem de terra estudo de caso, localizada no estado do Pará, que serviu de estudo piloto para a aplicação da técnica de termografia, tendo em vista a busca da otimização do processo de monitoramento de quatro regiões com presença de surgências controladas. O empreendedor considera em suas rotinas de inspeção, a técnica convencional baseada em inspeções visuais. Logo, o objetivo da pesquisa é apresentar a metodologia adotada para o acompanhamento das surgências nos dois períodos climáticos destas regiões e os possíveis benefícios obtidos com o uso da técnica para o monitoramento destas áreas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor a utilização da termografia infravermelha embarcada em RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), denominada nesta pesquisa como TERMO-RPA, nos procedimentos de inspeção especial de uma barragem de mineração, visando a otimização do monitoramento de áreas de surgências.

1.1.2 Objetivos específicos

- Validar o uso da técnica TERMO-RPA com base em inspeções de áreas com histórico de surgência por meio da análise de correlação entre as temperaturas detectadas nas regiões inspecionadas com a termografia infravermelha embarcada RPA e a umidade do solo.
- Verificar se há influência do tipo do solo coletado nas regiões na eficácia da detecção das surgências controladas.
- Propor a utilização da termografia infravermelha embarcada em RPA (TERMO-RPA) nas inspeções de segurança especial

1.2 JUSTIFICATIVA

A partir da Lei Federal 12.334/2010 que trata da Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) o empreendedor passou a ter que garantir a execução de procedimentos de inspeção de segurança regular (ISR) e inspeção especial (ISE), devendo realizar o preenchimento das suas Fichas de Inspeção (FIR) de forma periódica, conforme os critérios detalhados na Resolução ANM n. 95/2022.

Na barragem estudo de caso, a inspeção visual é o procedimento padrão utilizado nas inspeções de rotina, periódica e especial, sendo necessário o deslocamento de dois técnicos até os diversos pontos da barragem. As inspeções de rotina ocorrem de quinzenalmente e a adoção de tecnologias que reduzam essa periodicidade, pode promover maior controle e acompanhamento das condições do barramento.

Buffi et al. (2017) comentam que existe a necessidade de adotar abordagens inovadoras de inspeções de estruturas, em conjunto com os métodos tradicionais. Segundo os autores, essa é uma forma de equilibrar a gestão da segurança das barragens com a contenção dos custos de manutenção diretamente ligados à vida útil das estruturas.

Outro aspecto a destacar é que o empreendedor já detém o equipamento de termografia infravermelha embarcada em RPA, porém para a utilização de demandas do Departamento de Emergência, nas atividades de monitoramento de incêndios florestais e prediais. Neste sentido,

há uma sinalização do empreendedor em ampliar o uso do equipamento para as demandas de inspeção de segurança.

Em termos da técnica proposta para auxílio das atividades de inspeção, Jr e Adeli (2018) destacam em suas pesquisas que a termografia infravermelha é capaz de detectar anomalias em grandes áreas da barragem, muito rapidamente em comparação com os métodos tradicionais. Lee et al. (2018) utilizaram imagens termográficas de um drone para detecção de possíveis áreas de vazamento em barragens de terra, visando a inspeção de segurança detalhada no corpo do reservatório, concluindo que a técnica apresentou um custo relativamente baixo e em um curto espaço de tempo, permitindo o diagnóstico de vazamentos em lugares de acesso remoto.

Chen et al. (2018) utilizaram a termografia na identificação de infiltrações e presença de umidade no solo de quatro barragens de terra, fornecendo ao final um índice de monitoramento referente as mudanças de temperatura no barramento em um determinado período. Os autores concluíram que esta metodologia pode ser aplicada ao monitoramento de estabilidade da barragem e previsão de modos de falha.

As pesquisas supracitadas demonstram que o TERMO-RPA pode ser aplicável para o objetivo do trabalho que é a detecção de locais com surgências, haja vista que esta anomalia é uma das mais frequentes em barragens de terra, conforme ANA (2016). Essas surgências caso não sejam controladas podem evoluir e ocasionar infiltrações com carreamento de sólidos e potencial comprometimento da estabilidade do maciço, conforme (SILVA, 2016; CERQUEIRA, 2017).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BARRAGENS DE MINERAÇÃO

As barragens de mineração são barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizadas em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais (ANM, 2022).

A ABNT NBR 13028:2017 que trata da elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água, apresenta em seu texto uma definição semelhante acerca do termo barragem de mineração, trazendo ainda o conceito de barragens para disposição de rejeitos; estruturas utilizadas para reter, de forma planejada, projetada e controlada volumes de rejeitos advindos do processo de beneficiamento de minério.

Os projetos de barragens de mineração têm como base os requisitos de segurança mínimos definidos na norma NBR 13.028/2017 - ABNT (2017) e devem ser elaborados dentro dos critérios de segurança normativos buscando atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação, de forma a minimizar os impactos sociais e ambientais em todo o ciclo de vida da barragem.

De acordo com Cardozo, Pimenta e Zingano (2016), basicamente existem três metodologias construtivas para barragens de rejeito, sendo os métodos da jusante, de montante e da linha de centro. O método a jusante consiste na construção e alteamento do barramento sempre na direção jusante; o método de montante trata da construção e alteamento do barramento sempre à montante sobre o rejeito já consolidado, com uma estrutura inicial de um barramento à montante, com o dique inicial e a praia de rejeito. Finalmente o método linha de centro, consiste na construção e alteamento do barramento tanto à montante quanto à jusante, acompanhando um eixo vertical (linha de centro) sobre o rejeito depositado a montante e sobre o próprio barramento à jusante.

O Quadro 1 contém o resumo comparativo entre os três métodos construtivos citados, destacando se as vantagens, desvantagens, características e propriedades de cada sistema.

Quadro 1 - Resumo comparativo dos principais métodos construtivos de barragens de rejeito.

	Montante	Jusante	Linha de Centro
Tipo de Rejeito	Baixa densidade para que ocorra segregação	Qualquer tipo	Areias de lama de baixa plasticidade
Descarga de rejeitos	Periférica	Independente	Periférica
Armazenamento de água	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Boa	Aceitável
Alteamentos	Ideal menos de 10m por ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Vantagens	Menor custo, utilizado onde há restrição de área	Maior segurança	Flexibilidade construtiva
Desvantagens	Baixa segurança, suscetibilidade a liquefação e piping	Grande quantidade de material requerido proteção de talude a jusante apenas na configuração final	Necessidade de eficiente sistema de drenagem

Fonte: Cardozo et al. (2016).

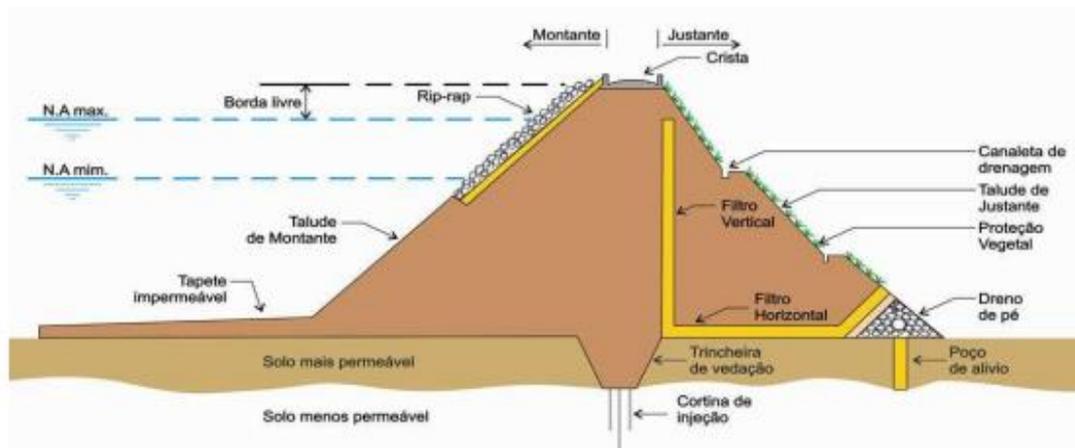
Para a segurança da operação das barragens de rejeito, os instrumentos de controle e monitoramento são obrigatórios para controle de vazões de drenagem interna (superfície freática ou níveis de água no interior do maciço da barragem e de suas fundações). Para o monitoramento adequado destes instrumentos devem ser definidos na fase de projeto os níveis máximos de tolerância (ABNT, 2017).

Os principais componentes de uma barragem são a estrutura de retenção ou barramento, a sua fundação e as ombreiras, a zona vizinha a jusante, as estruturas extravasoras, as estruturas de adução e o reservatório. No caso das barragens de mineração geralmente são construídas de aterro e estas podem classificar-se, segundo ANA (2016) nos seguintes três tipos principais: a) Terra, com seção homogênea ou mista; b) Terra-enrocamento, com uma vedação (ou núcleo) de solo e espaldares de enrocamento situados a montante e a jusante do núcleo; c) Enrocamento, com órgão de vedação no talude de montante (face de concreto).

2.1.1 Barragem de aterro de seção homogênea

A barragem de aterro de seção homogênea é, em geral, menos frequente, face à indisponibilidade de solos com características relativamente homogêneas. Nas barragens de seção mista, aproveitam-se os materiais mais permeáveis para os espaldares, devidamente protegidos contra o efeito de erosões superficiais, e utilizam-se os menos permeáveis na zona central. O zoneamento dos materiais é definido de acordo com as suas características tecnológicas, a sua sequência e época de escavação e de aproveitamento. A Figura 1 apresenta a seção transversal de uma barragem de terra homogênea.

Figura 1 - Seção transversal de uma barragem de terra homogênea.



Fonte: Carvalho, 2011.

Conforme ANA (2016) as barragens de perfil homogêneo são geralmente construídas com solos argilosos. Algumas dispõem de uma zona drenante, vertical ou inclinada ao longo de praticamente toda a sua altura, chamada de filtro chaminé, prolongado na horizontal por um tapete drenante, na zona de contato com a fundação, e por um prisma de blocos de pedra (chamados de enrocamento) na zona do talude de jusante em contato com a fundação. Estas zonas drenantes constituem o sistema de drenagem interna da barragem e servem para conduzir a água que atravessa a zona de montante do barramento, da fundação e das ombreiras para jusante sem provocar danos na barragem.

2.1.2 Propriedades e classificação dos solos

Na identificação dos solos, talvez a característica mais imediata esteja associada ao tamanho das partículas que os constituem. Nesse sentido, os solos são separados em grossos e finos. São considerados grossos os solos cujas partículas são visíveis a olho nu. Em geral costuma-se associar a essa condição um tamanho que é o da abertura da malha da peneira #200 (0,074mm). Os pedregulhos e as areias estão na classe dos solos grossos. A classe dos solos finos compreende os siltes e as argilas. (VILAR, 2021).

Segundo Vilar (2021), a curva de distribuição granulométrica representa os tamanhos e as diversas proporções, em peso seco, de cada componente do solo permitindo a classificação do material, onde aparece primeiro o nome do componente em maior proporção no solo, secundado dos componentes que estão em menor quantidade e complementado pela cor (areia argilosa cinza; argila siltosa vermelha; areia silto-argilosa marrom são algumas das possíveis classificações de solos). A distribuição granulométrica é obtida através de ensaios de peneiramento e de sedimentação, conforme procedimentos apresentados na ABNT NBR 7181.

Outra propriedade importante dos solos no contexto de aterros para barragem é a permeabilidade, a qual conforme Luz et al. (2010), consiste na resistência que determinado material oferece à passagem da água por entre suas partículas. Fatores como geometria das partículas e angulosidade influenciam diretamente à sua permeabilidade.

A classificação sistemática dos solos, de acordo com o DNIT (2006) é realizada com base em metodologias que agrupam propriedades físicas, indicando as frações que o compõem. O Highway Research Board (HRB) considera-se a granulometria, o limite de liquidez, o índice de liquidez e o índice de grupo. Os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de sua granulometria, limites de consistência e do índice de grupo.

Conforme DNIT (2006), o Sistema unificado de classificação de solos (SUCS) baseia-se na identificação dos solos de acordo com as suas qualidades de textura e plasticidade, e grupa-os de acordo com seu comportamento quando usados em estradas, aeroportos, aterros e fundações. Neste sistema, consideram-se as seguintes características dos solos: a) Percentagens de pedregulhos, areia e finos (fração que passa na peneira nº 200: silte e argila); b) Forma da curva granulométrica; c) plasticidade e compressibilidade.

Cita-se ainda o sistema de classificação Miniatura, Compactado e Tropical (MCT), que foi desenvolvido por Nogami e Villibor, com a finalidade básica de melhor caracterizar os solos tropicais. A técnica permite avaliar propriedades fundamentais dos solos associados à contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração d'água, coesão, capacidade de suporte e famílias de curvas de compactação, utilizando corpos de prova de dimensões reduzidas (50 x 50) mm (DNIT, 2006).

2.2 MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE BARRAGEM DE MINERAÇÃO

As inspeções de segurança de barragens são atividades de responsabilidade do empreendedor, e têm a finalidade de avaliar as condições físicas do barramento, estruturas associadas e reservatório, visando identificar possíveis anomalias e manifestações patológicas que potencialmente afetem a segurança, a operação ou o estado de conservação das barragens (ANA, 2016).

A partir da criação da Lei nº 12.334/2010 que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens o empreendedor passou a ter uma série de obrigações no âmbito da gestão de segurança de barragem, tais como: i) elaboração do Plano de Segurança da Barragem e o Plano de Ação de Emergência; ii) realização de Inspeções de Segurança Regular e Especial em sua(s) barragem(s), e iii) realização da Revisão Periódica de Segurança de Barragem. Conforme a Resolução ANM nº. 95/2022, três procedimentos de inspeções devem ser realizados pelo empreendedor, a saber:

- a) Inspeções Regulares de Segurança de Barragens (IRSB): são as inspeções de segurança regular, que, juntamente com o monitoramento (auscultação), fornecem informações importantes quanto ao estado de conservação da barragem. As inspeções regulares são realizadas em intervalos periódicos gerando um relatório de inspeção regular para a ANM é semestral e buscam identificar eventuais problemas técnicos visíveis por meio da inspeção visual, propondo sua correção ou o acionamento de inspeções mais minuciosas específicas para realização de uma inspeção especial, focada especificamente no problema identificado.

- b) Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB): é realizada por parte do empreendedor e tem como propósito, de tempos em tempos, o reexame dos aspectos de segurança e operação da barragem, análise das características hidráulicas, hidrológicas, de estabilidade estrutural e a adequabilidade operacional das diversas instalações, de acordo com critérios de projeto e informações disponíveis quando da realização de cada revisão; ou seja, verificar o estado geral de segurança da barragem, considerando o atual estado em face aos conhecimentos atuais e eventuais alterações ocorridas na barragem. Deve-se recomendar medidas e ações de sua correção e melhoria, visando reduzir eventuais riscos apresentados pela estrutura e aquelas associadas. A periodicidade máxima da RPSB é definida em função do DPA, Resolução ANM nº 95/2022.
- c) Inspeções Especiais de Segurança de Barragens (IESB): deve ser realizada sempre que forem detectadas anomalias com pontuação 10 em qualquer coluna do Quadro 3 - Matriz de Classificação Quanto à Categoria de Risco (1.2 - Estado de Conservação), do Anexo IV, devendo conter, minimamente, o exposto no Anexo III da Resolução ANM nº 95/2022 ou quando exigidas pela Agência Nacional de Mineração.

Nos procedimentos de inspeção o empreendedor deve elaborar suas fichas de inspeção para os devidos registros, conforme recomenda a Resolução ANM nº. 95/2022: a) Ficha de Inspeção Especial (FIE), sendo este documento necessário para registrar as condições da barragem verificadas durante as inspeções de campo, após a identificação de anomalia com pontuação 10 em qualquer coluna do Quadro do Estado de Conservação do Anexo IV da Resolução, devendo conter basicamente, conforme modelo do Anexo III, a identificação e descrição da (s) anomalias, ações corretivas e avaliação da situação após as ações realizadas e b) Ficha de Inspeção Regular (FIR), para registros das condições da barragem, verificadas durante as inspeções rotineiras de campo, devendo conter, minimamente, o quadro de estado de conservação.

Para as barragens de mineração classificadas com DPA alto é obrigatório manter o sistema de monitoramento automatizado de instrumentação, adequado à complexidade da estrutura, com acompanhamento em tempo real e período integral, incluindo redundância no sistema de alimentação de energia, seguindo os critérios definidos pelo projetista, sendo de responsabilidade do empreendedor a definição da tecnologia, dos instrumentos e dos processos de monitoramento.

As informações advindas do sistema de monitoramento, contemplando os dados de instrumentação, devem ser armazenadas e estar disponíveis para a fiscalização das equipes ou sistemas das Defesas Civas estaduais e federais e da ANM, sendo que para as barragens de mineração com DPA alto, estas devem manter videomonitoramento 24 (vinte e quatro) horas por dia de sua estrutura devendo esta ser armazenada pelo empreendedor pelo prazo mínimo de 90 (noventa) dias.

A instrumentação geotécnica é de grande importância para a obtenção de uma assertiva avaliação quanto à segurança de barragens, sobretudo para fornecer informações confiáveis sobre seu comportamento durante as etapas de construção, operação e pós-operação, ou diante de qualquer evento extraordinário (VIEIRA, 2017). Através de vários tipos de instrumentação, pode-se fazer uma avaliação da segurança de uma barragem em seu período útil de vida, além de identificar locais críticos ao longo do projeto.

A instrumentação de barragens é uma ferramenta de monitoramento que permite avaliar o desempenho das estruturas para garantir a segurança. Cada instrumento instalado em um empreendimento é selecionado tomando como base uma pergunta específica que precisa ser respondida. São as questões que possivelmente surgirão durante o projeto, execução e operação, que irão definir os instrumentos e métodos de medição (SILVEIRA; MACHADO, 2016). No quadro 2 será apresentado os principais instrumentos utilizados para monitoramento das barragens de mineração.

Quadro 2 - Instrumentos utilizados para monitoramento das barragens de mineração.

Piezômetros	Apresenta as subpressões em maciços de rocha ou terra. Também ajuda avaliar o padrão de infiltração, zonas de tubulação potencial e a eficácia do controle de infiltração realizadas (MACHADO, 2007). São instalados em um furo preenchido com areia na região de interesse onde será determinado o valor de poro pressão, acima deste ponto utiliza-se uma camada de material impermeável e o restante do furo com uma mistura de cimento e bentonita. A presença de camadas impermeáveis de solos argilosos resulta em poro pressão no solo e estes valores são determinados pelo aumento da coluna d'água no interior dos piezômetros (SESTREM, 2012).
Marcos superficiais	são instrumentos dedicados à determinação dos deslocamentos verticais e horizontais dos maciços de terra e enrocamento. São constituídos de vergalhões de aço CA-50 com 1,1 m de comprimento e diâmetro de meia polegada. No topo do vergalhão é alocada uma semiesfera. A estrutura é então chumbada com um bloco de concreto com 0,3 m de diâmetro e 1,2 m de profundidade, nas regiões de crista, bermas e talude de jusante (FONSECA, 2003).
Inclinômetros	medem os movimentos horizontais e controlam a estabilidade de taludes. Sua composição é feita basicamente de um sensor de inclinação por uma haste cilíndrica, em seu interior. Ele compara as atuais leituras com as que foram realizadas pós instalação e verifica se houve algum tipo de alteração (KANJI e FIGUEIRA, 1990 apud AFFONSO, 2004). Um invólucro de plástico ou alumínio, especialmente projetado com uma ranhura de

	alinhamento ao longo de uma borda, pode ser projetada em um buraco de até 900 pés de profundidade. Instrumentos indicadores de inclinação são baixados para as carcaças em rolos com mola que montam nas ranhuras para manter o alinhamento. O desvio do vertical é detectado monitorando um sinal eletrônico de um circuito de ponte de Wheatstone ou cristais piezoelétricos, dentro do sensor, que é gerado por uma mudança no estresse em um sistema mecânico, como um pêndulo ou braço (FONSECA, 2003).
Medidores de níveis de água e vazão	Segundo Castro (2008), os medidores são instrumentos simples, com a função de identificar a variação e vazão do nível da água. Possuem correlação com a análise de desempenho de barragens de mineração. Por isso, faz-se importante a medição de infiltração e vazão nas barragens, pela segurança das estruturas dessas barragens, e devem, portanto, passar por análises prioritariamente, para verificação.

Fonte: Próprio autor.

2.3 TECNOLOGIAS APLICADAS À MONITORAMENTO E INSPEÇÃO DE BARRAGEM

A segurança de barragens é um aspecto essencial a todos os envolvidos, durante todas as etapas, na concepção, projeto, construção, comissionamento (desativação), as quais devem ser proporcionais aos riscos envolvidos. Para garantir as condições de segurança ao longo da vida útil das barragens devem ser adotadas medidas de prevenção e controle, com a utilização do monitoramento eficaz (ANA, 2016).

Segundo Junior, Moreira e Heineck (2018) o monitoramento é indispensável para o controle periódico das barragens a fim de prever comportamentos de deformação nas estruturas. Existem várias técnicas e metodologias utilizadas para monitorar estruturas

2.3.1 Monitoramento por Satélite

A interferometria do Radar de Abertura Sintética (INSAR) é uma técnica madura para a medição de deslocamentos, usando sensores SAR espaciais, aéreos e terrestres. Ela tem sido aplicada para monitorar fenômenos geológicos, como deslizamentos de terra, subsidência, atividade vulcânica e infraestrutura (DI PASQUALE et al., 2018).

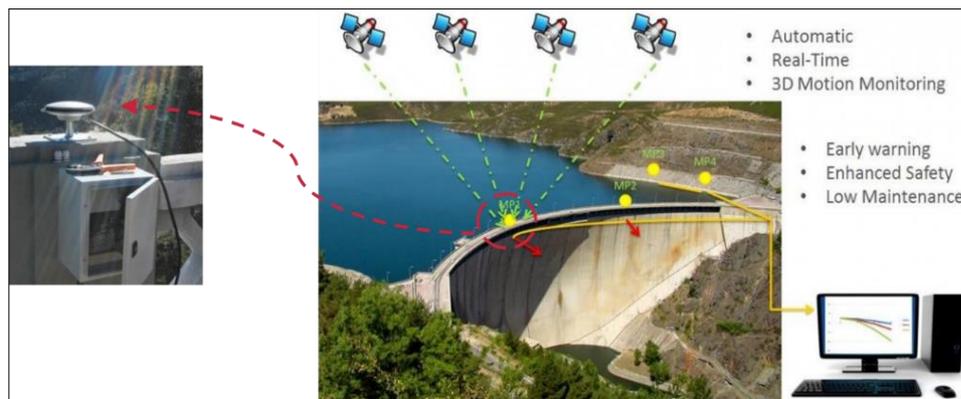
A técnica de interferometria de radar baseada em solo depende de um sistema de radar que observa a mesma cena do mesmo local em momentos diferentes. O conceito básico é um sistema RAR, um radar de onda contínua de frequência escalonada (SF-CW), que emite uma onda contínua com diferentes frequências progressivas dentro de uma determinada banda de frequência. Os ecos correspondentes, retro espalhados pela cena, dão origem aos dados brutos. Um sistema SAR é obtido se as antenas do radar forem movidas ao longo um trilho de

comprimento finito, mudando suas posições em um passo constante. Em cada posição ao longo do trilho, o radar SF-CW transmite frequência aumentando dentro da largura de banda e os ecos correspondentes são coletados. No caso de um sistema SAR, a estrutura de dados brutos consiste em uma matriz com o número de colunas, dado pelas posições de aquisição ao longo do trilho, e linhas, dado pelas frequências transmitidas.

O sistema de monitoramento de barragens por satélite tem objetivo de obter dados em tempo real, processar os dados com *software* e oferecer relatórios e alertas precoces automáticos com base em parâmetros pré-definidos, a partir da seleção de pontos de medição representativos na barragem e no entorno com a coleta contínua de dados, análise automatizada de dados e modelagem computacional (DI PASQUALE et al., 2018).

A metodologia de leitura do satélite consiste em explorar a informação contida na fase do sinal de duas complexas imagens do SAR (Figura 2), obtidas em tempos diferentes sobre a mesma região, utilizadas para formar o chamado interferograma.

Figura 2 - Diagrama com o esquema de monitoramento por satélite.



Fonte: Adaptado de ESA (2020).

2.3.2 Monitoramento com LASER – LIDAR

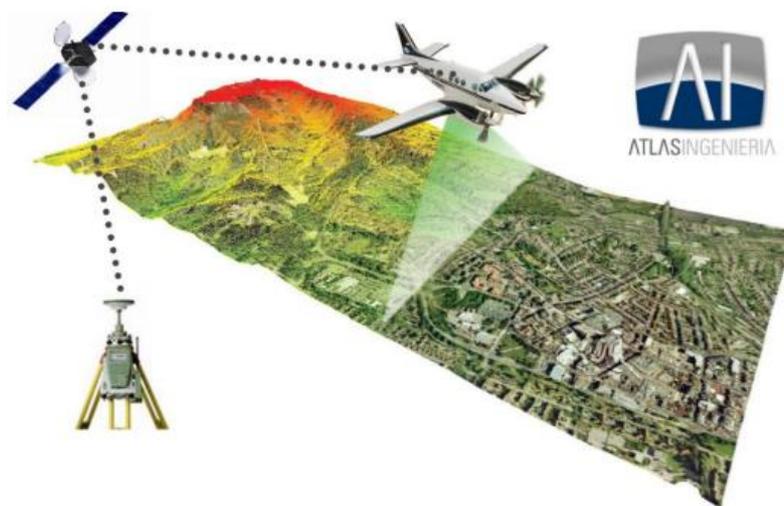
O LIDAR funciona para determinação de deslocamentos ou falhas e fissuras na superfície da barragem. Além dessas aplicações, o sistema pode ser aproveitado para auxiliar em procedimentos de caracterização de maciços rochosos (SILVEIRA E OLIVEIRA, 2019).

O LIDAR utiliza os mesmos princípios do sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o LIDAR utiliza pulsos laser (GIONGO et al., 2010).

A tecnologia Laser Scanner caracteriza-se como uma técnica que visa a mensuração por métodos ativos e a determinação automática de centenas ou milhares de pontos amostrais. A varredura é realizada entorno da posição em que o instrumento foi instalado, com medidas de distâncias feitas sob intervalos regulares de ângulos verticais e horizontais (figura 3). Dessa forma, são obtidas informações tridimensionais de objetos e/ou superfícies de interesse em um curto espaço de tempo (PETRIE; TOTH, 2018; SANTIBAÑEZ, 2010).

O LIDAR também é indicado para o monitoramento de barragens, sendo adotado de três a cinco pontos de fixação do aparelho para possibilitar a digitalização do modelo completo da estrutura. As nuvens de pontos geradas são vinculadas umas às outras para produzir um sistema de coordenadas único (SILVEIRA E OLIVEIRA, 2019).

Figura 3 - Aerolevantamento Laser.



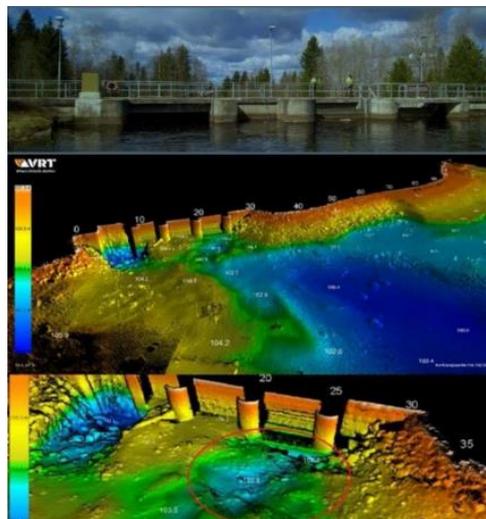
Fonte: AtlasIngenieria, 2017.

2.3.3 Sonar para monitoramento de áreas submersas

Sonar é uma sigla em inglês “*Sound Navigation and Ranging*”, que significa Variação e Navegação através do Som. Um pulso acústico é emitido pelo transdutor e ele viaja através da água até encontrar outra superfície que reflete o pulso ou parte dele de volta para o transdutor, de modo possibilita o cálculo da distância até o obstáculo (SILVEIRA E OLIVEIRA, 2019).

Existem muitos tipos de sonares, mas, geralmente, eles são utilizados para medições ponto a ponto ou para “iluminação” pelo som, de forma a criar uma imagem bidimensional da área sondada. São fornecidos em uma gama extensa de frequências e padrões de feixe (figura 4). Quanto menor a frequência, maior a distância atingida, mas menor a resolução da imagem. Com frequências maiores, pode-se obter uma melhor definição da imagem, mas com menor distância de geração (SILVEIRA E OLIVEIRA, 2019).

Figura 4 - Imagem gerada do sonar em uma barragem.



Fonte: Isomäki e Hänninen (2016).

Um bom exemplo disso é o Robô Subaquático de Inspeção de Barragem, desenvolvido pelo Departamento de Sistemas de Inteligência Humana, Instituto de Tecnologia de Kyushu no Japão. Os autores da pesquisa desenvolveram o uso de um robô de inspeção de água com o objetivo de substituir ou apoiar trabalho de inspeção de mergulhador. No teste de verificação, o robô foi capaz de estimar as coordenadas da posição de tiro usando uma imagem estática do bloco de concreto instalado na parede da barragem, tendo um resultado eficiente no trabalho de inspeção subaquática de barragem (HIRAI; ISHII, 2019).

2.3.4 RPA (*Remotely Piloted Aircraft*)

Os RPA (*Remotely Piloted Aircraft*), conhecidos popularmente como *Drones*, são aeronaves não tripuladas que podem possuir controle autônomo ou ser controlados remotamente de forma manual. Geralmente, são dotados de diferentes sistemas como câmeras, sensores, equipamentos de comunicação, dentre outros (BARRIOS; CUNHA, 2007).

Os RPA são excelentes ferramentas de obtenção de imagens de alta resolução, baixo custo e alta resolução temporal. Essas características os firmam como uma alternativa de qualidade para produção de mapas, modelos numéricos de terreno (MNT) e registro de imagens de alta resolução.

A utilização de RPA na mineração já é uma realidade, permitindo o acompanhamento e o monitoramento de frentes de serviço. Essa funcionalidade é ideal para grandes áreas e locais de difícil acesso, sem contar as outras soluções e tecnologias que o RPA oferece, como o levantamento aerofotogramétrico – que permite obter dados de forma detalhada, rápida, precisa e atualizada sobre a lavra.

Ferraz et al. (2015) complementa que o avanço aeroespacial, a miniaturização dos sensores e a popularização de RPA têm possibilitado a obtenção de imagens de melhor qualidade e a custos cada vez menores. Esse efeito, aliado à profusão de softwares como o Google Earth, deu enorme impulso para a popularização de imagens da superfície terrestre e viabilizou a aplicação do sensoriamento remoto para uma enormidade de propósitos.

Ferreira e Costa (2017) citam que o monitoramento e a fiscalização ambiental de barragens podem ser amplamente beneficiados, considerando-se a elevada resolução espacial obtidas nas tomadas de imagens aéreas com estes instrumentos. A metodologia empregada no estudo de monitoramento das barragens do estado de Goiás, demonstrou ser de grande valia para se monitorar, fiscalizar e avaliar danos ambientais em Áreas de Preservação Permanente (APP), incluindo o próprio represamento e acidentes com barragens em rios de menor ou maior extensão. O uso do RPA neste levantamento de campo propiciou um rápido e sinóptico registro de provas ambientais, provando seu potencial para redução de custos e tempo em atividades periciais, aliado a uma elevada precisão nas avaliações, quando comparado aos métodos tradicionais.

A reduzida acessibilidade das barragens, tanto por necessidades de captação como por sua natureza estratégica e o grande tempo necessário para uma inspeção pelo método tradicional não facilitam a inspeção visual direta. Portanto, o uso do RPA é mais adequado (COLOMINA; MOLINA, 2014).

Buffi et al. (2017) na sua pesquisa considerando a barragem Ridracolli, na vila de Santa Sofia, no centro da Itália, concluíram que a inspeção de obras estratégicas como barragens é de

vital importância tanto para a sua manutenção como para a segurança das populações a jusante, sendo a tecnologia de RPA equipada com câmeras de alto desempenho, permite uma cobertura fotográfica rápida de todo o sistema de barragem.

Ridolfi e Manciola (2018) propuseram uma tecnologia que usa uma plataforma de detecção que engloba um RPA e uma câmera para determinar o nível da água em um lago artificial na Itália central. No reino das observações hidrológicas, os RPA's desempenham um papel fundamental em termos quantitativos, permitindo o acesso remoto ao corpo d'água de interesse. Esta tecnologia é adequada para melhorar a modelagem hidráulica e, portanto, fornece suporte confiável para estratégias de mitigação de enchentes.

2.4 UTILIZAÇÃO DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS POR MEIO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A imagem térmica foi usada pela primeira vez para aplicações militares. Foi estendido para usos diários, como manutenção de máquinas (Boglietti et al. 2009) e monitoramento médico (Janssens et al. 2017).

A termografia por infravermelho é uma técnica que capta por meio de uma câmera termográfica a radiação infravermelha emitida pela estrutura ou sistema construtivo analisado. O resultado é expresso em formato de termograma, que é uma imagem visível com escala de temperaturas, retratada pela radiação. Ainda de acordo com o autor, essa técnica é utilizada nas áreas de agricultura, medicina, veterinária, inspeções industriais, torres de alta tensão e outros (JANKU et al., 2019; LEONI, 2019).

Quanto maior for a temperatura maior é a excitação molecular e, conseqüentemente, maior é a intensidade da radiação emitida. Assim, a temperatura de um objeto pode ser determinada pela intensidade da radiação emitida por sua superfície, fato utilizado pela termografia para realizar medidas de temperatura e visualizar a distribuição térmica de uma determinada superfície, sem a necessidade de contato físico (SANTOS, 2012).

A termografia infravermelha permite obter um mapa de temperatura superficial de qualquer objeto, mesmo de geometria complexa, de forma remota e não invasiva a partir da energia térmica irradiada por tal objeto na banda eletromagnética infravermelha do detector

utilizado (Meola et al. 2017). Seu princípio baseia-se na análise das imagens térmicas capturadas em uma superfície da estrutura suspeita (Bellatar et al. 2012).

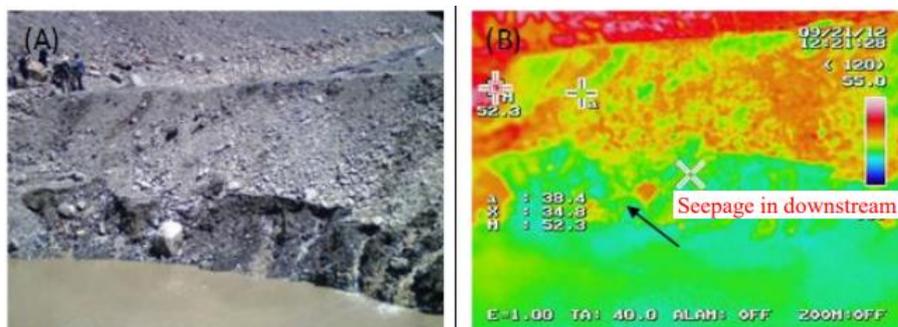
A termografia infravermelha, também conhecida como imagem térmica, utiliza o espectro infravermelho para mostrar as diferenças na dissipação de calor de uma estrutura usando uma câmera de imagem térmica. Em termos mais simples e mais amplos, quando uma estrutura é aquecida por fontes externas, como o sol, temperatura ambiente, fricção ou outras fontes térmicas, ele emite radiação na faixa de infravermelho longo do espectro eletromagnético que é detectado por uma câmera termográfica (JR e ADELI, 2018).

Conforme Noufid e Bellatar (2021) a termografia é um método térmico de teste não destrutivo que pode contribuir para a avaliação da integridade de estruturas de engenharia civil, principalmente para detectar defeitos próximos à superfície com imagens tomadas à distância, facilitando o monitoramento de longo prazo e a inspeção de curto prazo.

Chen et al. (2016) realizaram um estudo em uma barragem de terra situada em Landao Creek na floresta de Huisun, no condado de Nantou e na região central Taiwan. Utilizando uma câmera térmica avaliaram as mudanças internas de temperatura de radiação ao longo da barragem. A infiltração fez com que o solo da barragem de terra ficasse úmido, como pode ser refletido pela termografia. Este estudo descobriu que áreas da superfície da barragem com grande temperatura de radiação podem ser áreas de falha.

Os autores concluíram que o detector de termografia infravermelha é capaz de identificar áreas potencialmente instáveis. Barragem com alto teor de água no solo exibe mudança da temperatura da radiação e podem indicar infiltração. As infiltrações são indicadas por mudanças drásticas no tempo de radiação e temperatura (Figura 5).

Figura 5 – Infiltração a jusante da barragem.



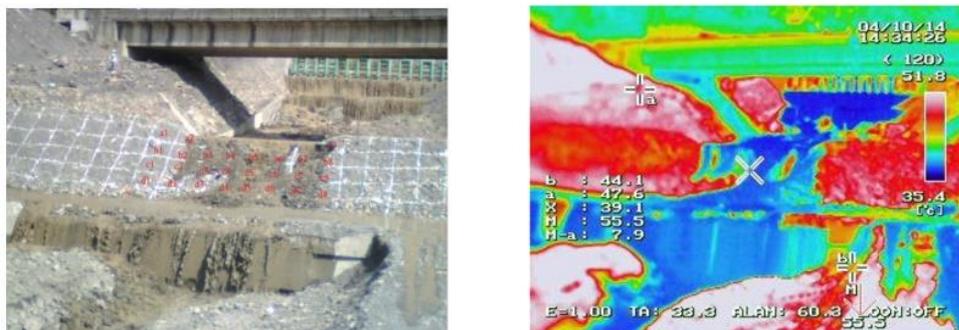
Fonte: Chen et al. (2016).

Chen (2017) apresentou uma metodologia de teste de longa distância e não destrutiva em uma região de Taiwan onde as alterações climáticas globais provocaram aumentos nas chuvas torrenciais provocadas pelos tufões ocasionando deslizamentos de terra, fluxos de detritos e a formação de barragens de terra em áreas montanhosas e de difícil acesso.

O procedimento de teste incluiu a construção de uma barragem artificial de terra na região a jusante do riacho Landou. A água foi interrompida primeiro a montante e liberada durante os testes. O teste modelou os processos e modos de ruptura de barragens naturais de terra, o termovisor foi instalado em uma ponte para monitoramento da face a montante da barragem e na margem lateral para a face a jusante. Imagens térmicas foram tiradas a cada poucos minutos com o aumento do lençol freático durante o teste até a ruptura da barragem.

A termografia pode detectar mudanças de temperatura de radiação superficial na encosta para localizar áreas potencialmente instáveis para monitoramento adicional. Os resultados da análise mostraram que a zona de ruptura da barragem artificial exibiu a maior mudança no índice e o modo de falha potencial pode ser previsto uma vez que a barragem se rompeu (Figura 6). O autor concluiu que o modelo proposto pode ser usado para monitoramento potencial de taludes instáveis.

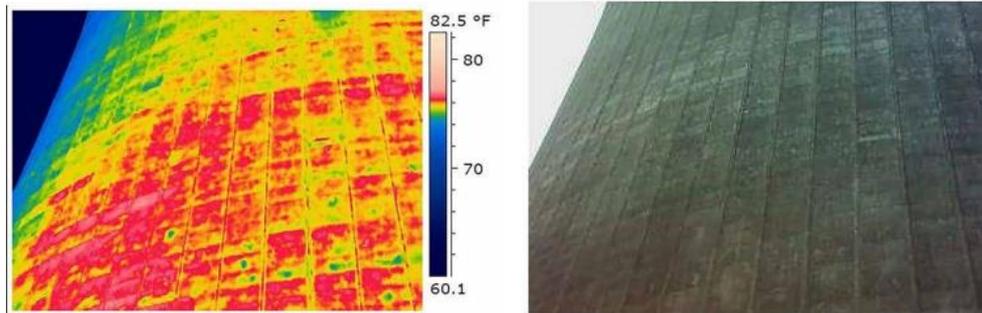
Figura 6 – Detecção de variação térmica na zona de ruptura da barragem artificial.



Fonte: Chen (2017).

Jr. e Adeli (2018) realizaram uma revisão da literatura avaliando a aplicabilidade da termografia para detecção de defeitos em estruturas de concreto (Figura 7). Indicaram que a termografia infravermelha é capaz de detectar anomalias em grandes áreas muito rapidamente em comparação com os métodos tradicionais. Segundo os autores o sucesso da termografia infravermelha em detectar defeitos ou danos em grandes estruturas seria um grande avanço nas inspeções de barragens, pois os métodos convencionais são muito caros e demorados, eles esperam que o interesse em aplicar a tecnologia de termografia infravermelha, para o monitoramento da saúde de grandes estruturas, se incremente cada vez mais.

Figura 7 - a) Imagem térmica de uma torre de resfriamento b) imagem visual.



Fonte: Sirca e Adeli (2018).

Lee et al. (2018) ao estudarem barragens de terra, estimaram importante a necessidade de complementar o método objetivo de inspeção de segurança. Para tanto, seis barragens pilotos foram selecionados para inspeção.

O método de termografia foi sugerido para um diagnóstico preciso de segurança através da comparação direta dos resultados dos dois métodos de levantamento de resistividade elétrica e levantamento de imagens térmicas (Figura 8). A vantagem importante do método de detecção de vazamento foi a simplicidade da aplicação, a rapidez dos resultados e a eficácia do trabalho em combinação com o método de diagnóstico existente. A análise da imagem térmica foi conduzida e os autores concluíram que:

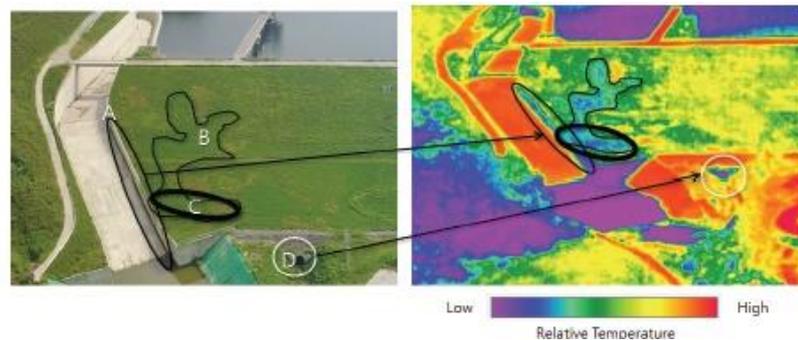
a) a técnica de imagem térmica embarcada em drone cobre uma ampla área a um custo relativamente baixo. É um método que pode adquirir dados em um curto período.

b) a técnica de imagem térmica do drone é um método que pode adquirir dados básicos para o diagnóstico de vazamentos.

c) os resultados da imagem térmica do drone são ideais ao analisar pesquisas de resistividade elétrica.

d) A técnica de imagem térmica do drone é semelhante ou complementar à pesquisa de resistividade elétrica.

Figura 8 – B, C e D são regiões úmidas identificadas pela termografia infravermelha.

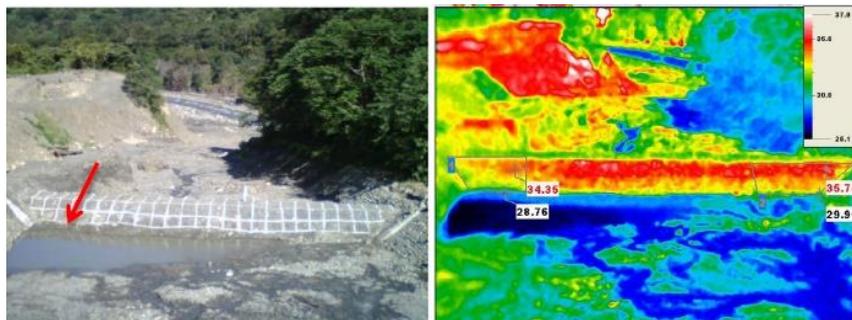


Fonte: Lee et al. (2018).

Os autores concluíram que perante o uso de *drones* usados na indústria, o campo de segurança e inspeção com dados instrumentos cresce rapidamente, devido à combinação de acessibilidade e vantagens das imagens aéreas e tecnologia termografia infravermelha adquirindo dados a um custo relativamente baixo e em um curto espaço de tempo, permitindo o diagnóstico de vazamentos no barramento, em lugares remotos e vulneráveis ao acesso.

Chen et al., (2018) realizaram um estudo para a observação de campo através da termografia aplicada para monitorar e analisar o processo ruptura de grandes barragens de terra. O local de teste da barragem de terra foi Landao Creek no Condado de Nantou, Taiwan onde quatro barragens foram analisadas (Figura 9).

Figura 9 – Barragem de terra artificial e imagens térmicas.



Fonte: Chen et al., (2018).

Um método de longa distância sem contato, não destrutivo de monitorar o processo de ruptura da barragem de terra usando a imagem térmica foi testado pelos autores. Em quatro violações em escala real testes, o processo de rompimento da barragem começou com ponderação em a planície do leito do rio acima; tubulação e infiltração de base ocorreu a jusante; e a barragem logo falhou por galgamento. O fracasso galopante modo foi observado na localização do canal principal e primeiro no lado inicial do lago.

A topografia característica do leito do riacho, a água inicial conteúdo do solo e as condições de descarga afetou o modo de falha e o processo de violação do barragens de terra em testes de campo. Áreas com alto teor de água do solo apresentam menor temperaturas e pode estar sujeito a tubulação e infiltração.

Por fim, os autores concluíram que esta metodologia pode ser aplicada ao monitoramento de segurança da estabilidade da barragem natural e previsão do modo de falha para rompimento da barragem e mitigação de desastres.

Em outro estudo utilizando tecnologia termografia infravermelha, Noufid e Belattar (2021) estudaram a influência da geometria parâmetros de uma heterogeneidade (presença do ar) contidos em uma estrutura de barragem de concreto na distribuição da temperatura em à superfície a jusante, encontrando que a distribuição da temperatura é fortemente relacionada com a posição, espessura e direção do defeito encontrado na superfície sob avaliação; sendo que de fato, essa diferença de temperatura, mostra-se importante se o defeito for próximo à superfície, se for de grande espessura ou se for paralelo à face; assim como a dificuldade de detecção de defeito cuja direção é perpendicular à face. Os autores concluíram que o estudo pode ser usado como um auxílio para o controle térmico não destrutivo da estrutura de barragem, que pode ser muito útil na prevenção o risco de danos em estruturas de concreto.

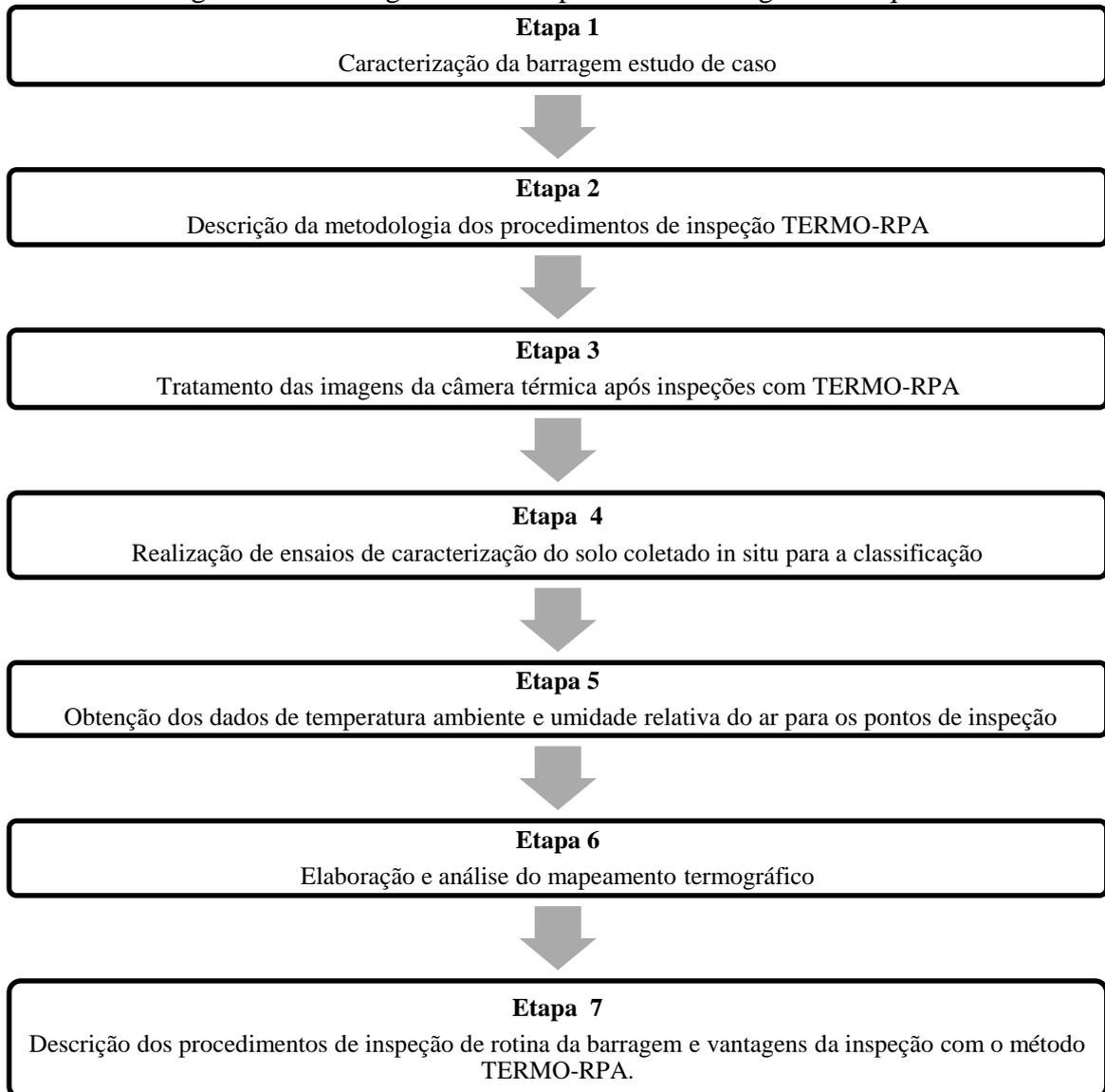
Em outra pesquisa, Pozzer et al., (2021) realizaram uma análise experimental para investigar a desempenho de vários modelos de detecção de danos em imagens térmicas e ópticas de diferentes estruturas de concreto. Este estudo usou uma variedade de imagens tomadas de diferentes distâncias e pontos de vista de um local altamente danificado estrutura da barragem com danos de concreto incluindo, rachaduras, fragmentação e manchas. As performances dos modelos foram comparadas em imagens térmicas e regulares tiradas simultaneamente do mesmo ponto de vista durante as inspeções.

Os modelos de segmentação treinados e testados com o termográfico as imagens foram capazes de identificar, em todos os casos, mais de 88,0% das anomalias existentes na estrutura da barragem, enquanto os classificadores treinados e testados em imagens térmicas mostraram desempenho semelhante ou melhor desempenho na detecção de fissuras em comparação com as imagens ópticas. Esses resultados indicam que as imagens térmicas são adequadas para uso em a detecção e segmentação de superfície (fissura) e subsuperfície (delaminação) danos nas estruturas de concreto.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa foi desenvolvida com base em sete etapas, sendo estas detalhadas no fluxograma verificado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma das Etapas da metodologia da Pesquisa.



Fonte: Próprio Autor.

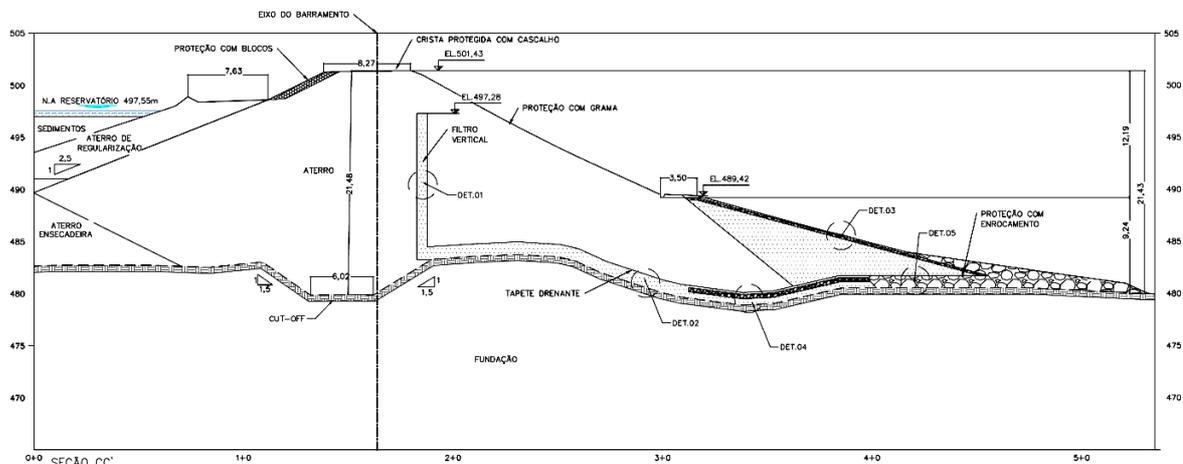
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM ESTUDO DE CASO

A caracterização da barragem foi realizada por meio de consulta dos documentos técnicos referentes ao empreendimento, sendo estes o Manual de Operação, Relatório “As Is”

e o documento de Procedimento Operacionais Inspeccionar Estruturas Geotécnicas, que compõe o Volume II do PSB (2023).

A barragem estudo de casa está localizada no estado do Pará e a sua implantação ocorreu em etapa única, sendo concluída na década de 80. A sua finalidade é a regularização de vazão e contenção de sedimentos, cujo volume do reservatório é de 1.710.841,00 m³. A barragem possui Categoria de Risco – CRI Baixo e Dano Potencial Associado - DPA Médio. Após finalização da obra foi construída uma berma à jusante constituída de materiais “bota fora” para promover reforço na região do pé da estrutura (Figura 11). Inspeções realizadas no corpo do aterro compactado da berma mostraram que constituem produtos inorgânicos e heterogêneos que incluem materiais terrosos e até blocos de rocha, que resultaram de antigas escavações para implantação da barragem os quais se encontravam acumulados em depósitos temporários.

Figura 11 - Seção transversal do barramento conforme Relatório As Is.



Fonte: PSB (2022).

3.1.1 Fundação

O maciço da barragem encontra-se instalado na interface entre formações da região as quais encontram-se interligadas e balizadas pelas Zonas de Cisalhamento e Cinzento. A Formação é constituída por formações ferríferas bandadas e corpos de minério de ferro associados, juntamente com camadas de jaspilito. A Formação é representada por rochas vulcânicas básicas, com predominância de metabasaltos e metadacitos. Na ombreira direita, a barragem encontra-se assentada sobre solos de alteração de metamáfica (solo residual e saprolito). Por sua vez, na região central e ombreira esquerda, o barramento encontra-se

disposto sobre canga química, maciço rochoso de jaspilito (semi compacto e compacto), solo residual de metamáfica e saprólito de metamáfica.

3.1.2 Maciço

A barragem foi implantada em etapa única e possui maciço homogêneo, embora haja variação em suas características granulométricas. A crista tem comprimento de 140m, largura de 8m e elevação variável, sendo que a cota mínima cadastrada foi a El.500,94m, arredondada para El.501,00 (elevação atual da crista). Na base do maciço, há um *cutoff* com largura de 6,0m. A estrutura possui berma ao longo do talude de jusante na elevação El.489,5m de largura de 3,5m. Abaixo desta berma, ocorre a região de lançamento de “bota fora”, protegida superficialmente por areia, brita e enrocamento.

Na ombreira direita, há um platô de aproximadamente 25m de largura na elevação El.493m. Esta região compreende o antigo canal de desvio, assim, entende-se que este platô possivelmente foi implantado para aumentar o caminho de percolação a jusante.

O talude de jusante possui inclinação entre bermas de 1,0V:2,0H, com exceção do talude abaixo da berma El.489,5m (“bota fora”), que tem inclinação de aproximadamente 1,0V:3,5H. A inclinação do talude de montante da barragem é de 1,0V:2,5H e o da ensecadeira, de 1,0V:3,0H. A inclinação do aterro de montante foi estimada em 1,0V:3,0H.

A barragem possui, como elementos de proteção superficial: blocos de enrocamento no talude de montante e região de “bota fora”, grama na berma e talude de jusante e cascalho na crista e acessos. O talude de montante, na região do maciço, foi implantado uma proteção granular do tipo “rip-rap” para possíveis passagens de cheias que possam solicitar a região.

3.1.3 Drenagem interna

A barragem possui sistema de drenagem interna na região central do maciço e nas ombreiras. A saída do sistema ocorre na região central do talude protegido pelo dreno de pé. O sistema de drenagem interna da barragem é composto por dois dispositivos interligados (filtro vertical e tapete drenante). O filtro tem topo por volta da elevação El. 497m e espessura média de 1m de areia. O filtro vertical tem continuidade para jusante através de um tapete horizontal de areia, apoiado na fundação, com espessura de 1,2m.

3.1.4 Drenagem superficial

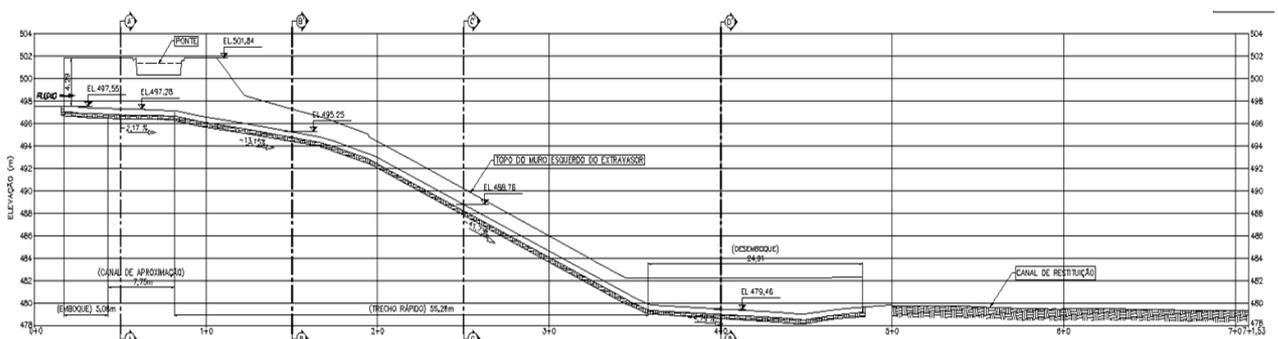
O sistema de drenagem superficial da barragem é composto de canaletas retangulares de concreto, na berma intermediária e na ombreira esquerda, com largura variando de 0,20 a 0,45m, conectadas através de caixas de passagem. Há também uma descida de água em seção retangular, de concreto, cujas dimensões são de 0,40m de base e 0,50m de altura de parede e uma canaleta trapezoidal na ombreira esquerda, com base de 0,60m e altura da parede de 0,30m.

3.1.5 Sistema Extravador

O reservatório é munido de um sistema extravasor implantado na ombreira esquerda, do tipo soleira livre, constituído de um canal de aproximação na El. 497,30m; um emboque na El. 497,55 m, com abertura de aproximadamente 14 metros de largura e muros ala, se estreitando para uma seção retangular, com 4 metros de largura e paredes variando de 3,10 (região da ponte) a 4,30m; um trecho rápido com seção retangular com largura de 4 metros, declividade de aproximadamente 13,15% no primeiro trecho, com altura de parede 1,65m, e declividade de 41,73% no trecho final, altura de parede de 1,25m; desemboque também com 4 metros de largura, parede de 2,40m, na El. 480,00m.

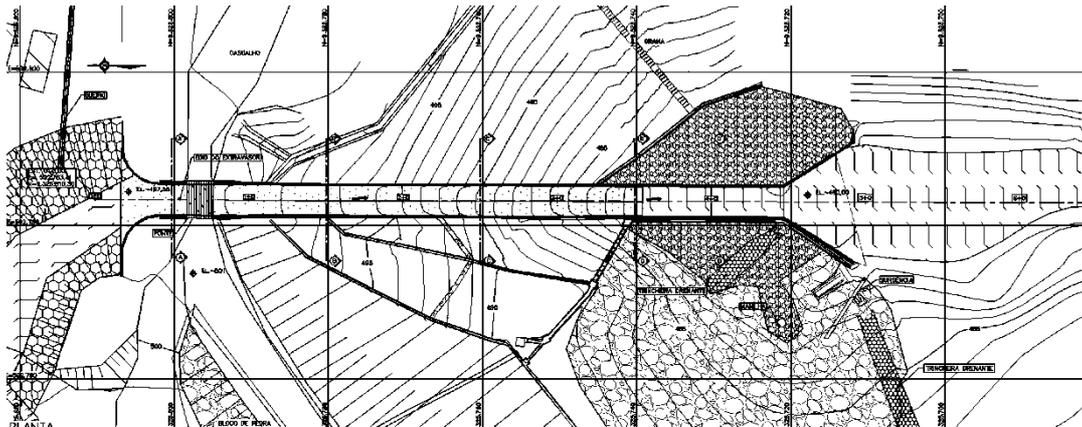
Todos os trechos citados são constituídos de concreto. Ao final da estrutura, há uma ala que encaminha o volume vertido para o curso de água a jusante. As Figuras 12 e 13 apresentam, respectivamente o perfil e a planta do sistema extravasor da barragem.

Figura 12 - Vista em perfil do sistema extravasor da barragem.



Fonte: PSB (2022).

Figura 13 - Vista em planta do sistema extravasor da barragem.



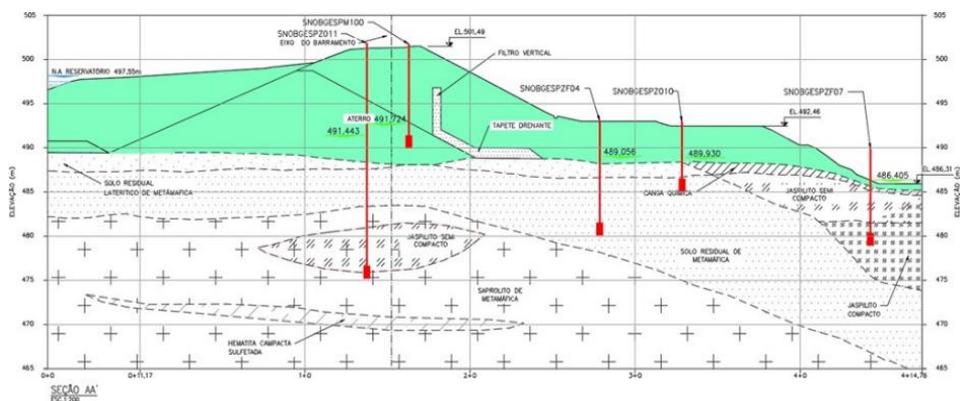
Fonte: PSB (2022).

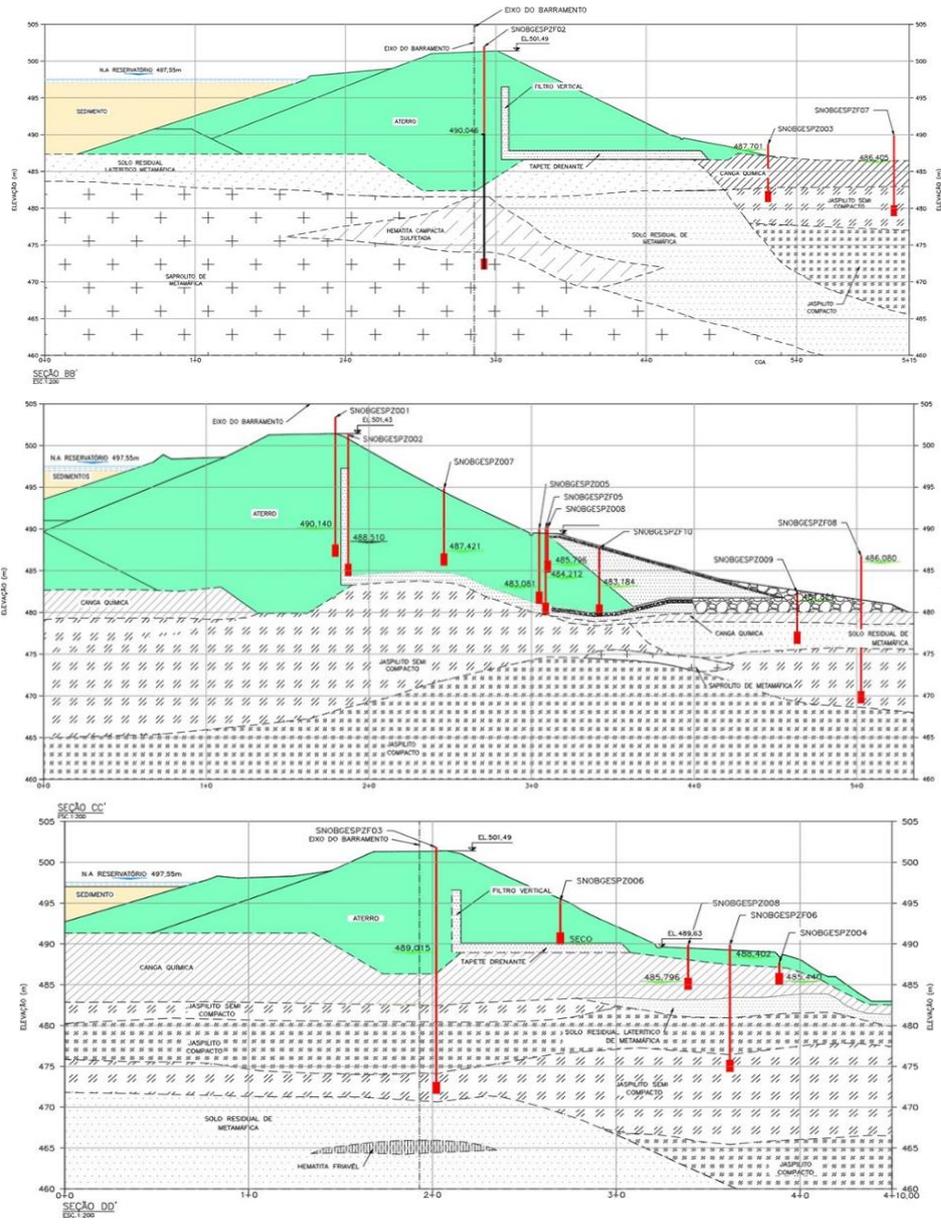
3.1.6 Instrumentação da barragem

Para o monitoramento da barragem encontram-se instalados e ativos 24 piezômetros tipo Casagrande, 5 medidores de vazão do tipo Calha Parshal, 1 medidor de vazão triangular, 4 marcos superficiais, 1 prisma, 1 régua linimétrica de reservatório e 1 régua de reservatório automatizada. Esta instrumentação se encontra automatizada.

A Figura 14 apresentam quatro seções da barragem indicando a posição dos piezômetros na barragem.

Figura 14 - Seções transversais da barragem com indicação dos piezômetros.





Fonte: PSB (2022).

3.2 METODOLOGIA DOS PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO COM O USO DO MÉTODO TERMO-RPA

3.2.1 Plano do sobrevoo e parâmetro de sobrevoo

Antes do início da realização das inspeções pelo método TERMO-RPA, foi necessário preencher no site da ANAC (2024), o plano de voo, no sistema SARPAS em conformidade com Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 da ANAC (RBAC-E nº 94/2017) e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). O plano contempla as

seguintes informações: nome do piloto, nome da aeronave, perfil da operação, nome da operação, tipo de voo, janela de operação (data, hora inicial e final), localização do ponto de decolagem, altura e verificação de interseções.

O tempo para elaboração do plano de voo é de aproximadamente 5 minutos, após essa etapa o piloto realiza a montagem do equipamento (hélices, baterias, trem de pouso, câmera, bem como a verificação dos itens de segurança) esse processo tem uma duração de 5 minutos. O voo é configuração para 13 minutos, sendo realizada a coleta das fotografias. Todo esse procedimento de inspeção contemplando as etapas supracitadas tem a duração de 23 minutos.

Ressalta-se que além da participação do piloto, contou-se com o apoio de um observador, sendo este um colaborador da empresa que está situada a barragem estudo de caso, cuja função era avaliar as possíveis interferências que comprometessem a segurança do voo, como por exemplo, a aproximação de aeronaves, pássaros e obstáculos. Antes do início das inspeções, configurações de voo foram definidas e inseridas ao controle do equipamento (Tabela 1).

Tabela 1 – Configurações definidas para o sobrevoo.

Altitude	80 m
Velocidade de voo	1,8 m/s
Ângulo de Inclinação das linhas de voo	52°
Sobreposição lateral	80%
Sobreposição frontal	80%
Duração do voo	13min
Área analisada	Área da crista e talude de montante

Fonte: Próprio autor.

O equipamento utilizado na pesquisa compreende um termo visor infravermelho da marca DJI, modelo ZENMUSE Ht 2, embarcado em um RPA da marca DJI, modelo MATRICE 300 RTK, e possibilita a aquisição de imagens termográficas da superfície de captura, sendo adquirido pelo empreendedor no ano de 2023 (Figura 15). O termo visor é classificado como uma câmera de imagens térmicas de alto desempenho, que fornece imagens e vídeos bastante claros e detalhados. A faixa de temperatura de trabalho do equipamento é de (- 4 ° C a 500 ° C) com precisão de 0,01 ° C. Todas as especificações da câmera térmica e do drone podem ser verificadas no Apêndice A.

Figura 15 – Equipamento termo visor infravermelho embarcado em RPA.



Fonte: Próprio Autor.

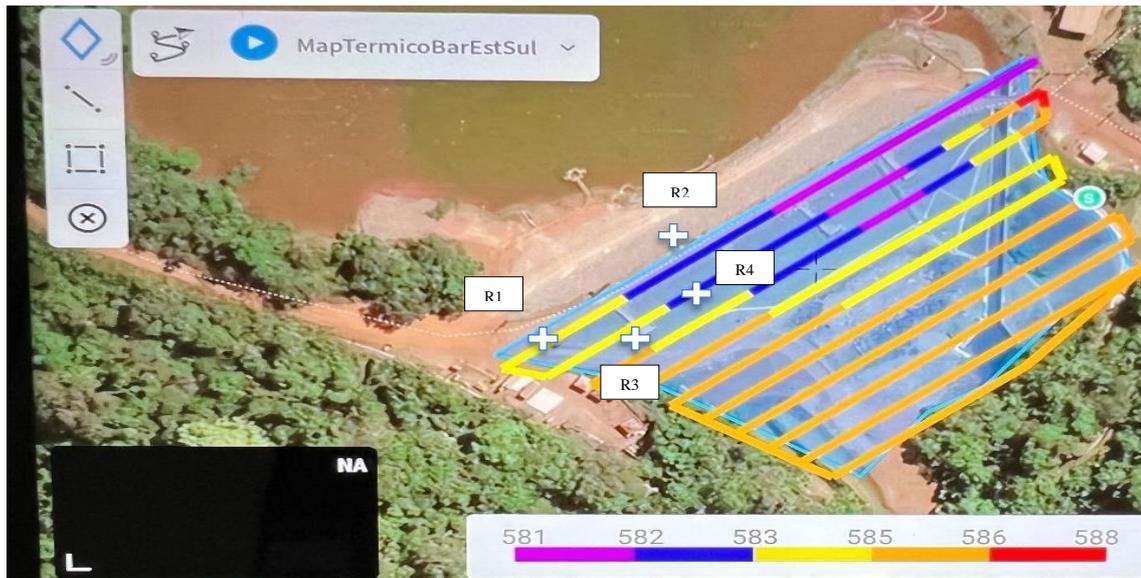
3.2.2 Definição das regiões de inspeção e rota do sobrevoo

Para as inspeções foram selecionadas quatro regiões estratégicas da barragem denominadas de R1, R2, R3 e R4, sendo estes locais caracterizados por presença de surgências controladas, conforme registro do Relatório “As Is”. Para cada região foram realizados quatro furos para coleta de amostras de solo, visando a realização de ensaios de caracterização do material. A seguir tem se o detalhamento das regiões inspecionadas:

- a) R1- Área de contato do aterro com a ombreira direita;
- b) R2- Região imediatamente acima das saídas da drenagem interna;
- c) R3 - Região do pé de talude à jusante;
- d) R4 - Aterro em contato com o sistema extravasor.

A rota do sobrevoo compreendeu a área total da barragem, em um tempo médio de 13 minutos, sendo realizada a captura das imagens termográficas, que posteriormente foram armazenadas no cartão de memória do equipamento, organizados por data e hora, e posteriormente transferidos para o computador. A Figura 16 contém os dados das quatro regiões inspecionadas e o percurso da rota de sobrevoo definido na pesquisa.

Figura 16 - Regiões inspecionadas e o percurso da rota de sobrevoio.



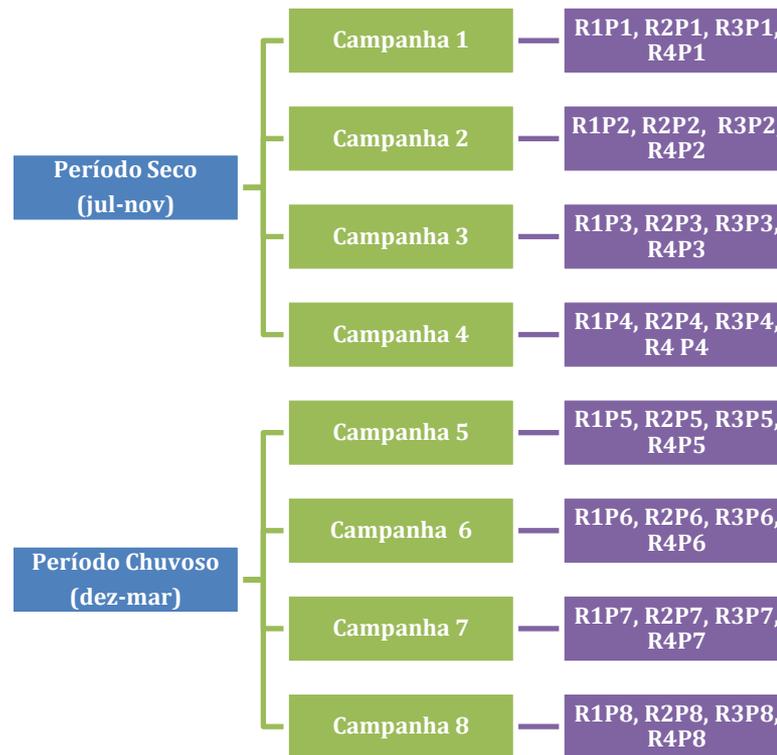
Fonte: Próprio Autor.

No segundo momento, foram feitas as coletas das amostras por ponto de inspeção para os futuros ensaios de caracterização do solo em laboratório, referentes aos ensaios de teor de umidade, granulometria e limites de atterbeg.

3.2.3 Campanha de inspeções das regiões analisadas

As inspeções das quatro regiões foram realizadas no período de agosto de 2023 a fevereiro de 2024, com o objetivo de obter avaliações em dois períodos climáticos, período seco e período chuvoso, totalizando oito campanhas de investigação, conforme Figura 17. As coordenadas dos trinta e dois pontos eram registradas por meio de um aparelho GPS (*Global Positioning System*), marca GRAMIN, modelo GPSMAP 64x. Posteriormente, um trabalho de tratamento das imagens foi realizado para a geração do modelo digital do terreno, contendo a imagem termográfica do barramento, com destaque das quatro regiões de interesse. Esta fase será detalhada no item 3.3.

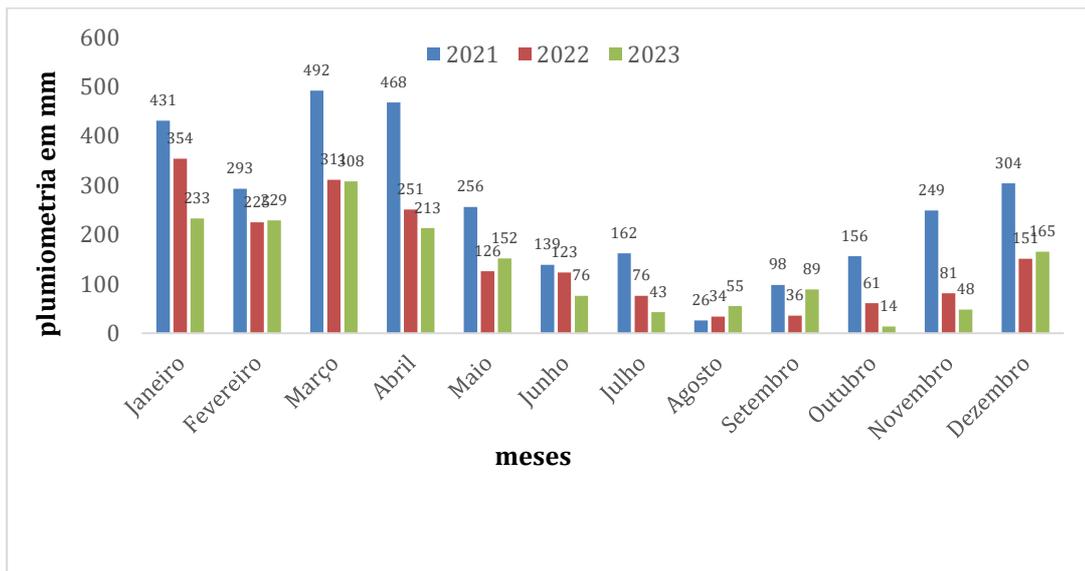
Figura 17 – Planejamento das inspeções TERMO-RPA.



Fonte: Próprio autor.

Para a escolha dos meses foram analisados os dados da estação pluviométrica (marca Vaissala, modelo WXT 530 series), referentes ao período de janeiro/2021 a dezembro/ 2023 (Figura 18). Após a análise dos dados, observou-se que as maiores incidências pluviométricas ocorriam nos períodos de dezembro a abril, enquanto que os meses de maio a novembro, caracterizavam o período seco, validando o período de amostragem selecionado para a pesquisa.

Figura 18 – Dados de pluviometria.



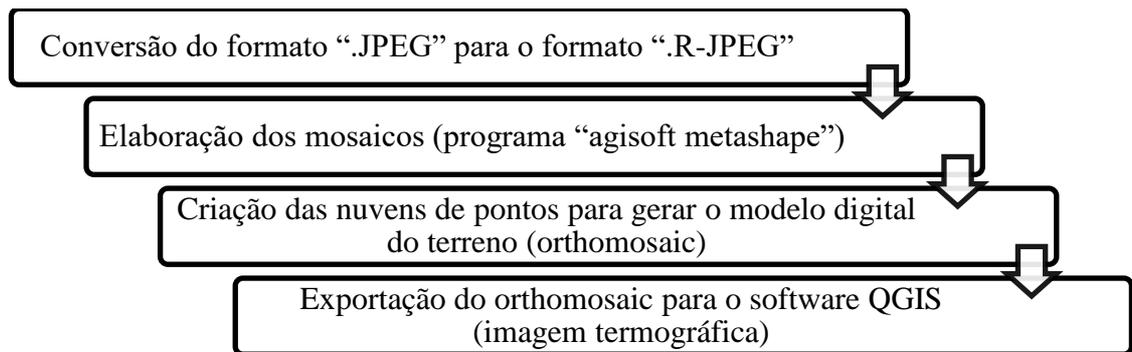
Fonte: Estação Vaissala, modelo WXT 530 series (2023).

3.3 TRATAMENTO DAS IMAGENS DA CÂMERA TÉRMICA APÓS INSPEÇÕES COM TERMO-RPA

O tratamento das imagens contemplou 4 etapas, iniciando pela conversão da extensão do arquivo, em formato “.JPEG” para o formato “. R-JPEG”, o que ocorreu por meio do SDK (Software development kit, versão 4.6, disponibilizado pelo fabricante do próprio equipamento (DJI Thermal SDK, versão 1.4). Em seguida, as imagens foram importadas para o programa “agisoft metashape”, possibilitando assim a elaboração dos mosaicos. A partir dos mosaicos foram criadas as nuvens de pontos e depois gerado o modelo digital do terreno, ou seja, a imagem orthomosaic. Como última etapa procedeu-se a exportação do orthomosaic para o software QGIS (versão 3.22.3-Białowieża) para a definição do “range” de paleta de cores, referente às variações de temperatura da superfície da barragem. O Tempo médio para o tratamento das imagens em uma área de 14.143,97m² é de aproximadamente 30 minutos.

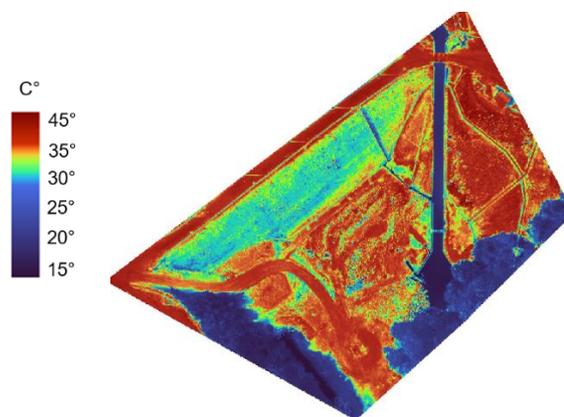
O fluxograma (Figura 19) apresenta de forma resumida estas etapas e a Figura 20, contém um exemplo de uma imagem após tratamento.

Figura 19 – Etapas definidas para o tratamento das imagens obtidas da câmera térmica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Exemplo da imagem termográfica resultante do processo de tratamento.



Fonte: Próprio autor.

3.4 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO COLETADO IN SITU PARA A CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL

Após a realização dos sobrevoos foram coletadas de cada região, e para cada ponto de inspeção uma amostra de solo (2kg) a uma profundidade de 20 cm para a realização dos ensaios de caracterização do solo e a sua classificação. Os ensaios realizados contemplaram: a) análise granulométrica por peneiramento e sedimentação (ABNT NBR 7181) em granulômetro a laser CILAS modelo 1064 LD; b) limites de plasticidade e índice de plasticidade (ABNT NBR 7180); c) limites de liquidez do solo (ABNT NBR 6459), teor de umidade do solo (ABNT NBR 6457).

A classificação do solo foi baseada na metodologia TRB (antigo HRB), descrita na norma DNIT (2006), com o objetivo de verificar se a detecção de umidade obtida na inspeção

TERMO-RPA poderia sofrer alguma influência pelo tipo de solo encontrado em cada ponto. A Figura 21 contém a tabela de classificação.

Figura 21 – Tabela de classificação do solo conforme metodologia TRB.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	50 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006).

Ao final, elaborou-se uma tabela contendo os resultados de cada propriedade física e a respectiva classificação do solo, para cada região. A Figura 22 contém registros fotográficos da etapa de coleta do material nas regiões de interesse.

Figura 22 – Registro da etapa de coleta das amostras de solo.



Fonte: Próprio Autor.

3.5 OBTENÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA DO AR PARA OS PONTOS DE INSPEÇÃO

Os dados referentes à caracterização do ambiente (umidade relativa do ar e temperatura ambiente), a serem registrados no mapeamento termográfico TERMO-RPA foram obtidos dos registros da estação pluviométrica instalada no entorno do empreendimento (marca Vaissala, modelo WXT 530 series).

3.6 ELABORAÇÃO E ANÁLISE DO MAPEAMENTO TERMOGRÁFICO DA BARRAGEM

Após a obtenção dos dados dos sobrevoos foi elaborado um mapeamento termográfico no formato word, contendo todas as informações obtidas para cada região inspecionada, nos períodos seco e chuvoso. Em detalhes, para cada ponto (conforme região) foram inseridas as seguintes informações: as imagens termográficas contendo os valores das temperaturas da superfície do solo obtidas da câmera termográfica; umidade do solo in situ e classificação do solo a partir dos ensaios de caracterização do laboratório; e dados ambientais (umidade relativa do ar e temperatura ambiente), verificados na estação meteorológica selecionada para a pesquisa. Para facilitar a análise dos resultados em cada mapeamento termográfico, os dados foram apresentados seguindo a sequência da maior para menor umidade do solo.

A análise do mapeamento termográfico TERMO-RPA, para cada região, foi desenvolvido, sendo primeiramente elaborado um gráfico com tratamento estatístico (média e desvio padrão) dos pontos para cada região. Posteriormente, procedeu-se com a determinação da correlação (gráfico de dispersão com análise do R^2) entre os parâmetros temperaturas do solo e umidade do solo in situ, buscando identificar se locais com maior temperatura traziam indicativo de pontos de maior umidade, e por conseguinte, pontos de surgências.

Os dados ambientais registrados para cada ponto (ou seja, para cada região), serviram para compor o mapeamento termográfico resultante das inspeções TERMO-RPA, no sentido da caracterização do local nos períodos investigados.

3.7 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO DE ROTINA DA BARRAGEM E VANTAGENS DA INSPEÇÃO COM O MÉTODO TERMO-RPA.

A descrição dos procedimentos de inspeção adotados pelo empreendedor tomou como base os documentos, Manual de Operação e o documento Inspeccionar Estruturas Geotécnicas que compõe o Volume II do PSB (2023). A partir do entendimento das rotinas de inspeção da empresa foi proposto um procedimento de inspeção considerando o TERMO-RPA, sendo validado em campo, possibilitando a identificação das vantagens do uso do método.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO COLETADOS DAS REGIÕES INSPECIONADAS

A Tabela 2 apresenta a classificação obtida para os solos das quatro regiões, a partir da caracterização das amostras coletadas de cada região inspecionada.

Tabela 2 - Classificação obtida para os solos das quatro regiões.

Região	Detalhamento	Classificação, conforme Metodologia TRB	Descrição do tipo de solo
R1	Área de contato do aterro com a ombreira direita	A-7-5(5)	Argila areno-siltosa com pedregulho
R2	Região imediatamente acima das saídas da drenagem interna	A-2-4(0)	Areia com pedregulho
R3	Região do pé de talude à jusante	A-2-4(0)	Areia com pedregulho
R4	Aterro em contato com o sistema extravasor	A-1-b(0)	Areia com pedregulho

Fonte: Próprio autor.

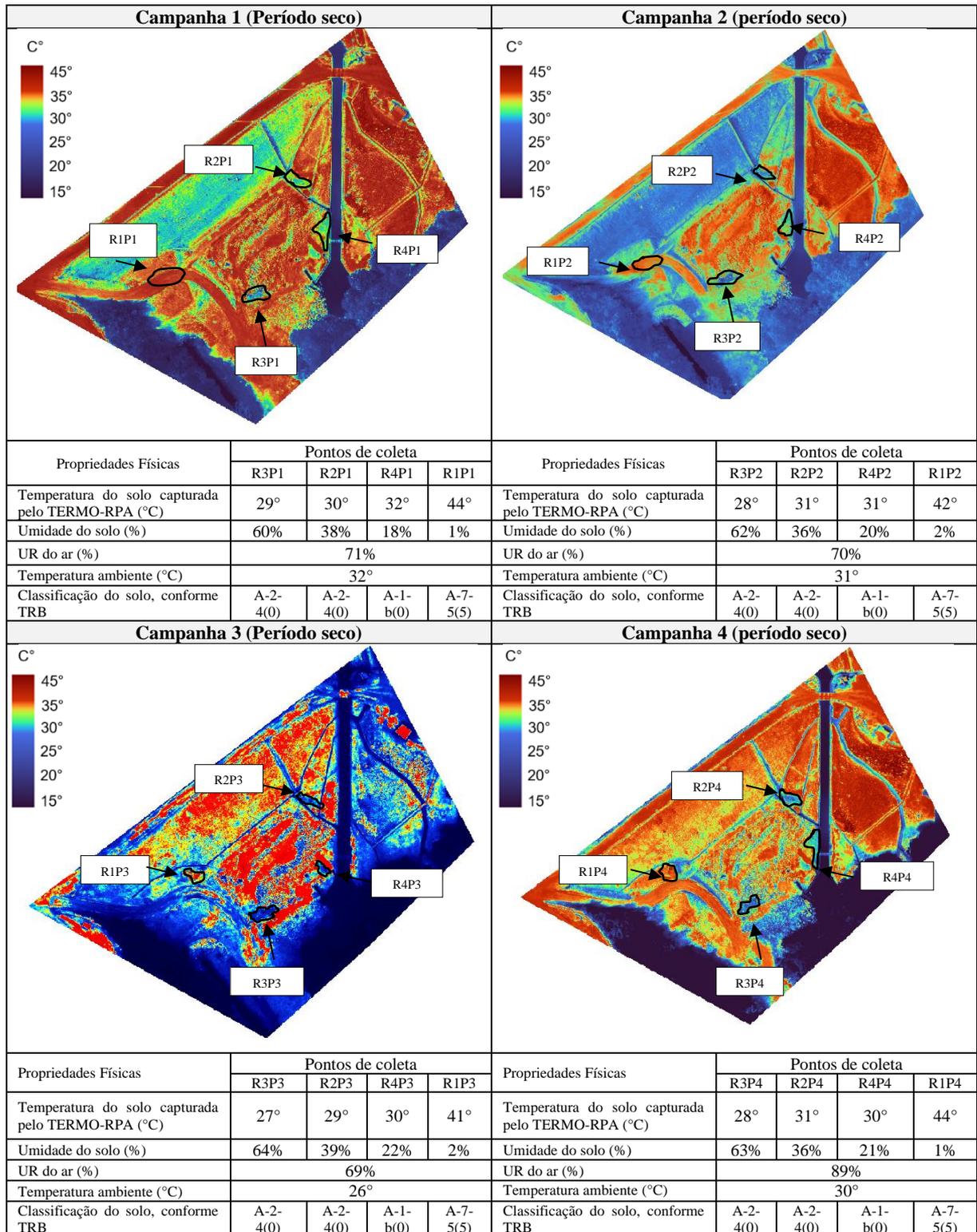
Analisando a Tabela 2, pode-se inferir que os solos coletados das regiões R2, R3 e R4, apresentaram a mesma classificação, enquanto que o material da região R1, trata-se de um solo composto por argila areno-siltosa com pedregulho. Cabe destacar que o maciço da barragem é composto originalmente, conforme verificado no item 4.1 (Caracterização da barragem), por solo argilo arenoso, no entanto, nas regiões analisadas não prevaleceu esta classificação.

Esse resultado é considerado coerente já que nestes locais ocorreram intervenções ao longo dos anos, conforme documento “As Is” (2022), sendo realizados diversos lançamentos de camadas de materiais arenosos e pedregulhosos nas regiões R2, R3 e R4. Logo, esta é a condição atual do barramento e as camadas superficiais são o foco da pesquisa, uma vez que o TERMOR RPA captura a temperatura de superfície do barramento.

4.2 RESULTADO DAS INSPEÇÕES COM O USO DO MÉTODO TERMO-RPA

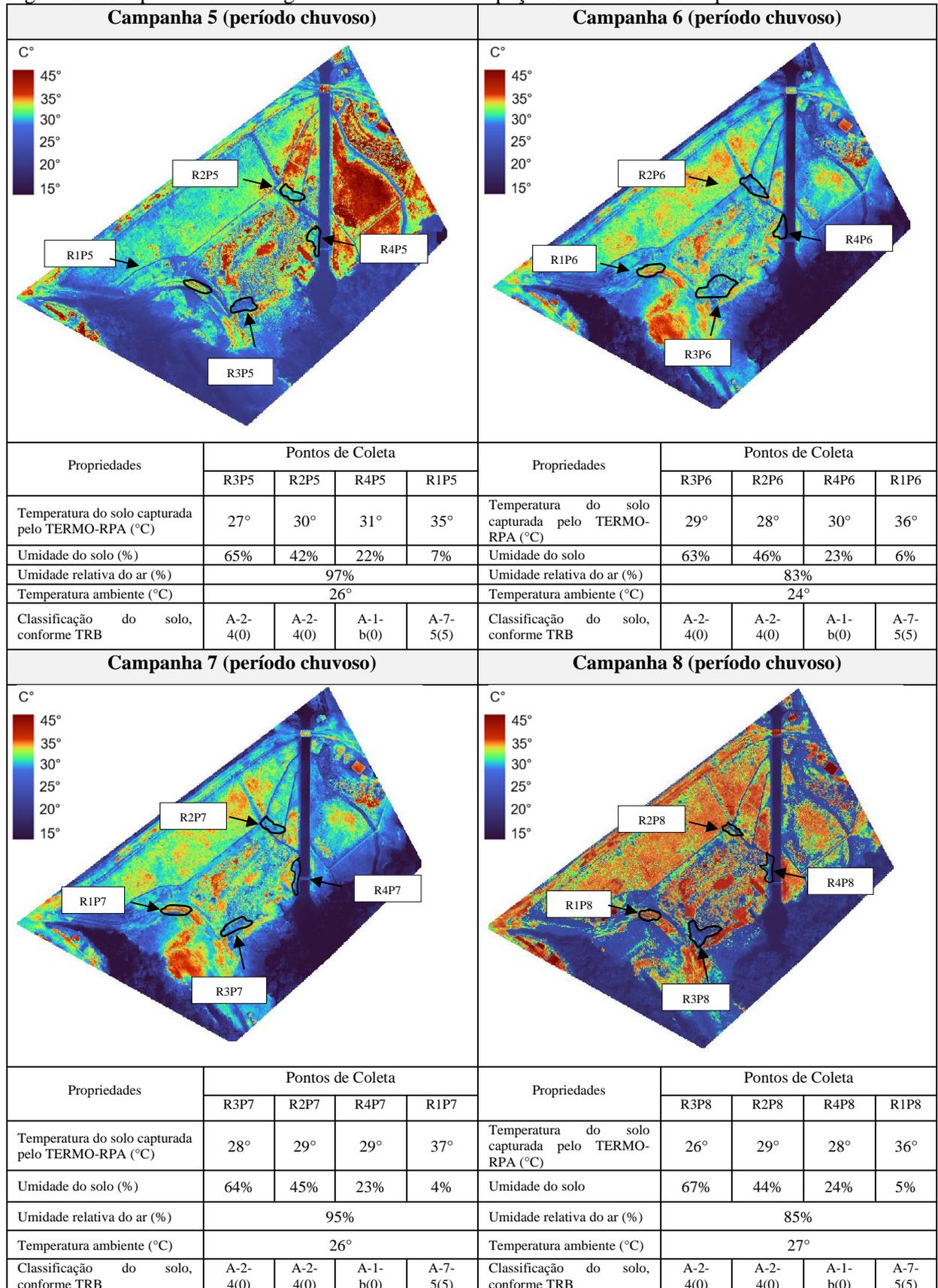
As Figuras 23 e 24 contêm o mapeamento termográfico resultante da inspeção TERMO-RPA para o período seco e período chuvoso, respectivamente, estando a análise dos resultados apresentada a seguir.

Figura 23 - Mapeamento termográfico resultante da inspeção TERMO-RPA no período seco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Mapeamento termográfico resultante da inspeção TERMO-RPA no período chuvoso.

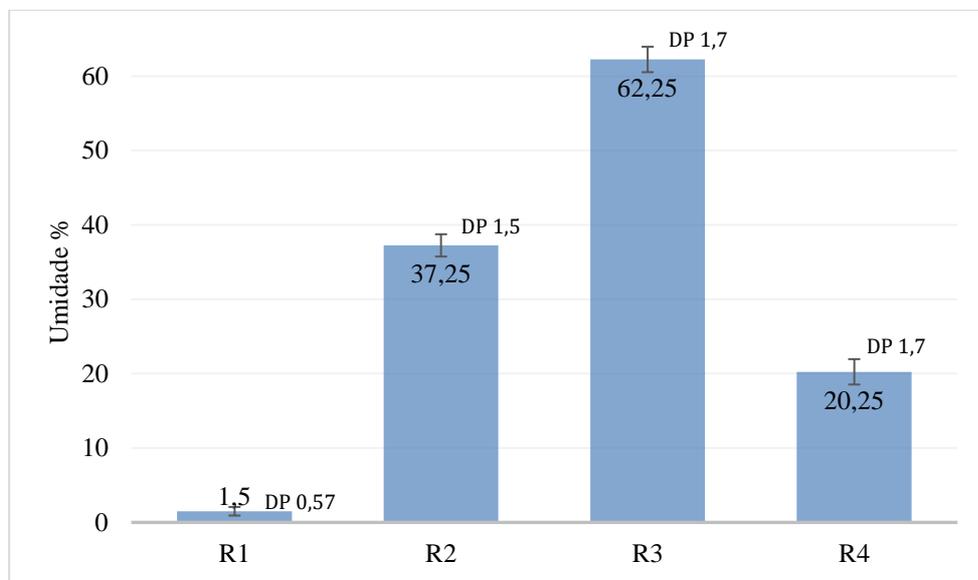


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Análise do mapeamento termográfico resultante das inspeções TERMO-RPA no período seco

No Gráfico 1 constam os valores médios e desvio padrão da umidade para cada região inspecionada no período seco. Observa-se que as regiões com maior percentual de umidade, em ordem decrescente foram R3 (62,2%), R2 (37,2%) e R4 (20,2%), enquanto que para a R1 (1,5%), pode se considerar um valor ínfimo comparado com os demais locais inspecionados. Em termos de D.P dentro da mesma região ao longo do período seco, houve uma variação de 0,57 a 1,7 sendo estes desvios considerados satisfatórios, ou seja, os valores de umidade das regiões não diferiram muito entre uma campanha e outra.

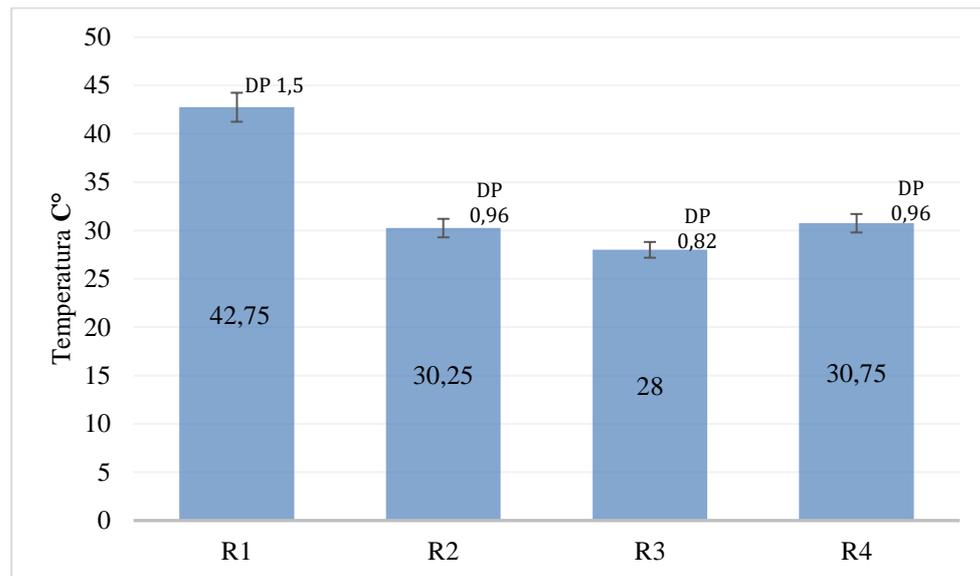
Gráfico 1 – Valores médios da umidade do solo e D.P para as regiões no período seco.



Fonte: Próprio autor.

O Gráfico 2 apresenta os valores médios e desvio padrão obtidos para a temperatura do solo de cada região inspecionada no período seco. Observa-se que as regiões com maior temperatura, em ordem decrescente foram R1 (42,75°C), R4 (30,75 °C) e R2 (30,25 °C), enquanto que para a R3 (28,0 °C). Os D.P observados dentro da mesma região ao longo do período seco, indicaram uma variação de 0,82 a 1,5, sendo valores considerados satisfatórios, ou seja, os valores de temperatura dos pontos, nas regiões não diferiram muito entre uma campanha e outra.

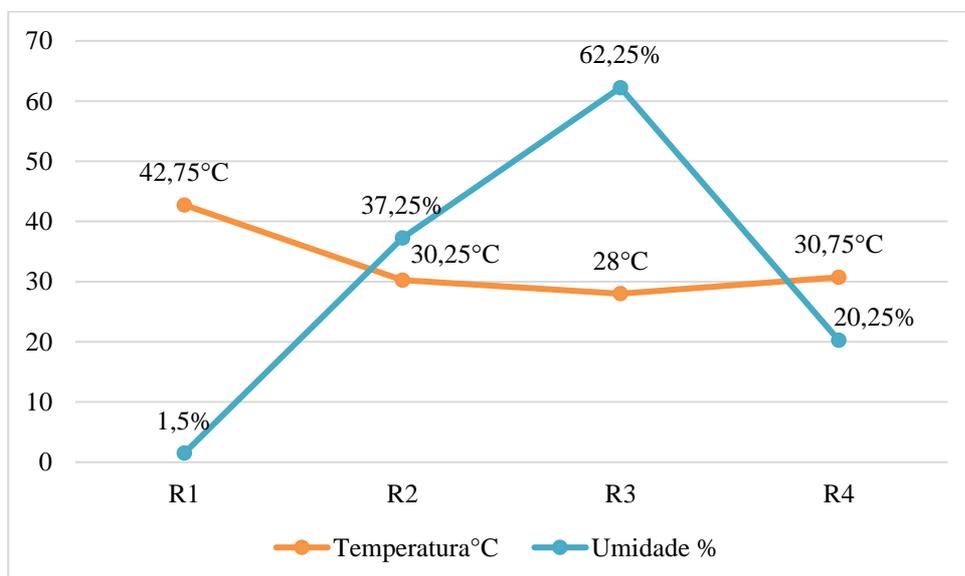
Gráfico 2 – Valores médios da temperatura do solo e D.P para as regiões no período seco.



Fonte: Próprio autor.

Analisando os valores associados de umidade e temperatura registrados para as quatro regiões, conforme Gráfico 3 foi possível constatar que há uma relação inversa entre estes parâmetros, o que ocorreu para todas as campanhas no período seco, apontando que quanto maior a umidade, menor é a temperatura do ponto inspecionado.

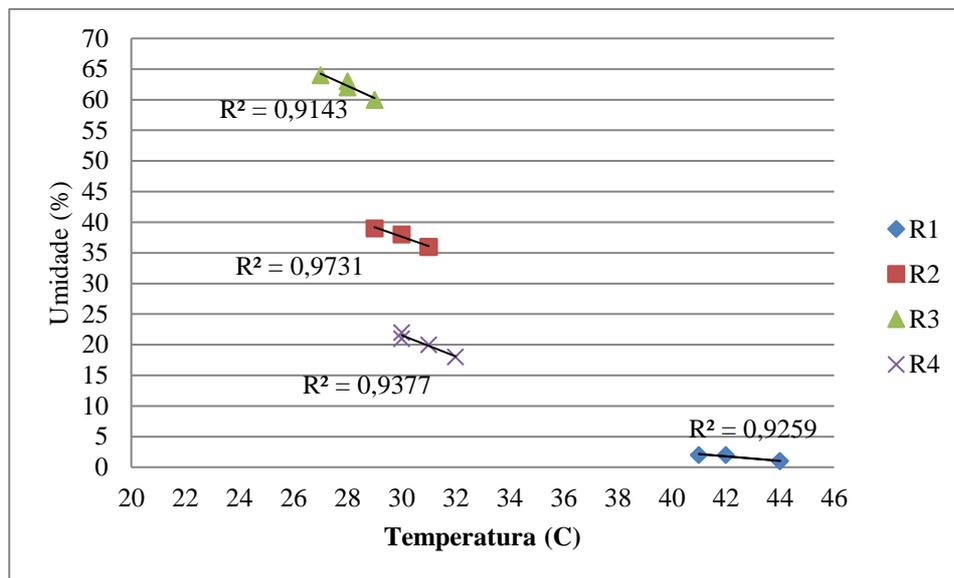
Gráfico 3 – Valores associados de umidade e temperatura do solo para as regiões no período seco.



Fonte: Próprio Autor.

Partindo para uma análise de correlação entre os parâmetros constatou se que o resultado exibido no R^2 de cada linha de tendência apresentou valores próximos a 1,0 para as quatro regiões (variando de 0,91 a 0,97), indicando boa correlação entre as variáveis, temperatura do solo e umidade do solo.

Gráfico 4 – Correlação entre temperatura do solo e umidade do solo para as regiões inspecionadas no período seco.

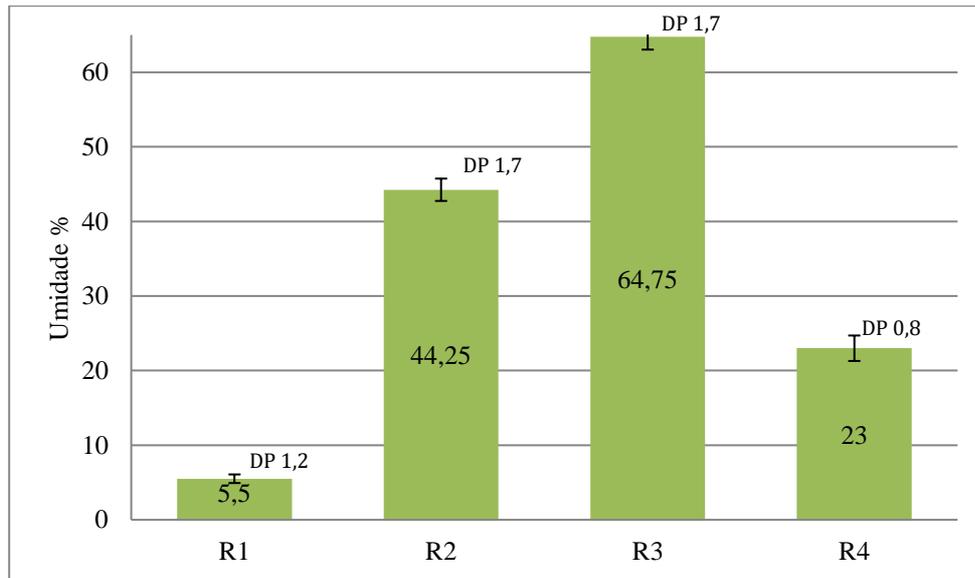


Fonte: Próprio Autor.

4.2.2 Análise do mapeamento termográfico resultante das inspeções TERMO-RPA período chuvoso

No Gráfico 5 constam os valores médios e desvio padrão da umidade para cada região inspecionada no período chuvoso. Observa-se que as regiões com maior percentual de umidade, em ordem decrescente foram R3 (64,7%), R2 (44,2%) e R4 (23%), enquanto que para a R1 (5,5%), pode se considerar um valor ínfimo comparado com os demais locais inspecionados. Em termos de D.P dentro da mesma região ao longo do período chuvoso, houve uma variação de 0,8 a 1,7 sendo estes desvios considerados satisfatórios, ou seja, os valores de umidade das regiões não diferiram muito entre uma campanha e outra.

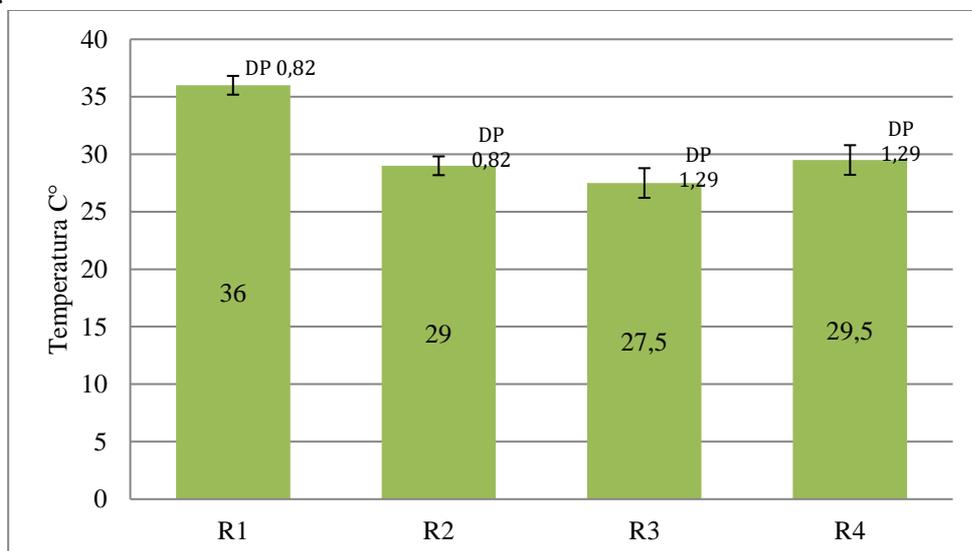
Gráfico 5 – Valores médios da umidade do solo e D.P para as regiões no período chuvoso.



Fonte: Próprio Autor.

O Gráfico 6 apresenta os valores médios e desvio padrão obtidos para a temperatura do solo de cada região inspecionada no período chuvoso. Observa-se que as regiões com maior temperatura, em ordem decrescente foram R1 (36°C), R4 (29,5°C) e R2 (29°C), enquanto que para a R3 (27,5°C). Os D.P observados dentro da mesma região ao longo do período chuvoso, indicaram uma variação de 0,82 a 1,29, sendo valores considerados satisfatórios, ou seja, os valores de temperatura dos pontos, nas regiões não diferiram muito entre uma campanha e outra.

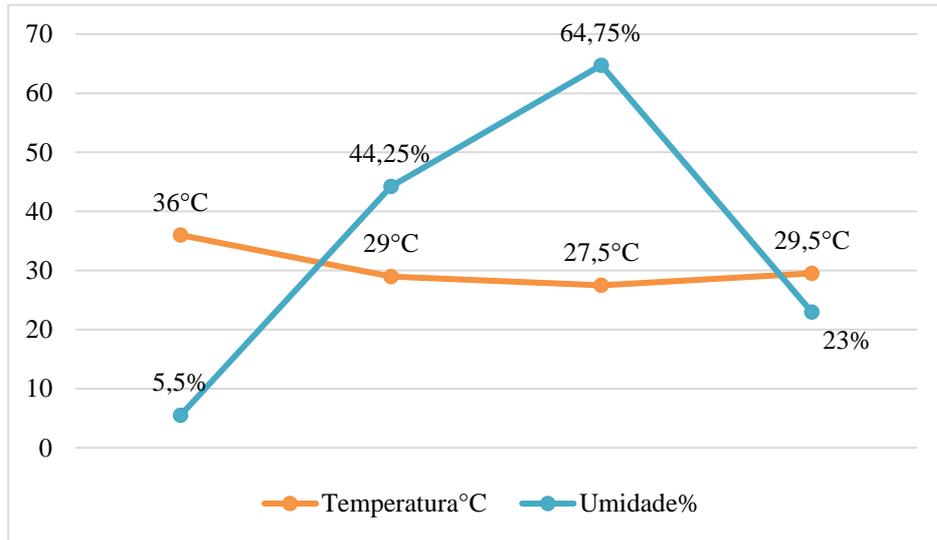
Gráfico 6 – Valores médios da temperatura do solo, e D.P conforme as regiões no período chuvoso.



Fonte: Próprio Autor.

O Gráfico 7, referente ao período chuvoso, indicou também que existe uma relação inversa entre estas propriedades físicas, constatado em todas as campanhas de vistoria, já que nas regiões de menor temperatura, as umidades do solo registraram maiores valores.

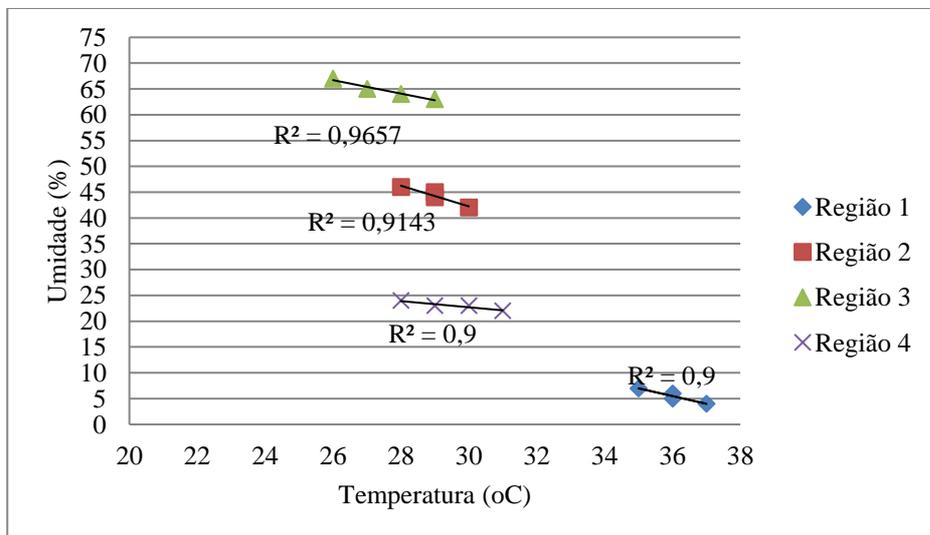
Gráfico 7 - Valores combinados de umidade e temperatura do solo para as regiões no período chuvoso.



Fonte: Próprio Autor.

No gráfico de correlação das variáveis (Gráfico 8), o resultado do R² das linhas de tendência de cada região, também apresentou valores próximos a 1,0 (variando de 0,9 a 0,96), indicando boa correlação entre as variáveis temperatura do solo e umidade do solo.

Gráfico 8 - Correlação entre temperatura do solo versus umidade do solo no período chuvoso.



Fonte: Próprio Autor.

Diante das análises supracitadas, constata-se que as inspeções TERMO-RPA, tanto no período seco, quanto no período chuvoso, indicou uma alta correlação entre a detecção de pontos com surgência e temperaturas obtidas da câmera térmica. A região R3 (pé do talude de jusante), R2 (região imediatamente acima das saídas da drenagem interna) e R4 (aterro em contato com o sistema extravasor) são caracterizados por histórico de surgências, conforme já registrado no documento do empreendedor “As Is” (2022). Enquanto que para a R1 não há ocorrência de surgências relatadas no documento.

É fundamental destacar que todas as três regiões com evidências de surgências são devidamente monitoradas pelo empreendedor e já sofreram as ações/intervenções necessárias para a estabilização da situação, contando com o acompanhamento de profissional habilitado e qualificado na área geotécnica.

Outro ponto importante é que essas surgências não sofrem aumento ou diminuição de percolação ao longo do ano, ou seja, independente de período chuvoso ou período de estiagem elas se mantem com a mesma característica. Esse histórico corrobora com os dados obtidos na pesquisa referente as variáveis temperatura do solo e umidade do solo, que se mantiveram praticamente sem variação ao longo do ciclo.

É importante considerar algumas observações no que se refere ao método da termografia, dada a sua limitação na identificação de temperatura em profundidade, sendo mais eficaz em áreas superficiais NOUFID E BELATTAR (2021). Outro fator que deve ser levado em consideração são as condições ambientais, como temperatura, umidade, que podem influenciar nas leituras de imagens técnicas, o que demanda profissionais com conhecimento técnico pois variações normais de temperatura podem ser confundidas com anomalias ou diagnósticos incorretos CHEN et. al. (2018).

4.2.3 Influência do tipo do solo das regiões inspecionadas na eficácia da detecção das surgências controladas

Cada grupo de solo tem uma característica, um comportamento frente a água presença de umidade/percolação de água. Segundo Mesquita (2001), a granulometria e a estrutura dos solos apresentam influência sobre o espaço poroso do material, sua porosidade total e distribuição de poros, dificultando em maior ou menor intensidade o movimento da água.

Individualmente, os grãos dos solos argilosos (solos coesivos) são muito finos, quase farináceos, e se aderem firmemente um ao outro, não podendo ser reconhecidos a olho nu. Os

espaços vazios entre as partículas são muito pequenos, e por causa de sua estrutura esses solos apresentam resistência à penetração de água, absorvendo-a muito lentamente. Entretanto, uma vez que a água tenha conseguido penetrar no solo, ela também encontra dificuldade para ser extraída de seu interior.

Os solos não coesivos que compreendem os solos compostos de pedras, pedregulhos, cascalhos e areias, ou seja, de partículas grandes e grossas, apresentam muitas partículas individualmente soltas que, no estado seco, não se aderem umas às outras (somente se apoiam entre si), e são altamente permeáveis.

Analisando as regiões inspecionadas, àquelas com presença de umidade (R2, R3 e R4), apresentaram a mesma classificação do solo (arenoso com pedregulhos), não sendo possível realizar uma análise comparativa de como solos diferentes poderiam influenciar na eficácia da detecção dos pontos de umidade, a partir da câmera termográfica. Porém, em pesquisas futuras julga-se importante analisar estes aspectos para a melhor validação das inspeções com TERMO-RPA, com o intuito de evitar, por exemplo, uma baixa detecção de pontos com surgência devido a existência de solos altamente permeáveis.

4.3 DESCRIÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE INSPEÇÃO DE ROTINA DA BARRAGEM E VANTAGENS DA INSPEÇÃO COM O MÉTODO TERMO-RPA

4.3.1 Descrição dos procedimentos de inspeção da barragem estudo de caso

Os procedimentos de inspeção adotados pelo empreendedor são categorizados em cinco tipos: a) inspeção de rotina; b) Inspeções do Engenheiro de Registro (EOR); c) Inspeção de Segurança Regular (ISR); d) Inspeção de Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB) e; e) Inspeção de Segurança especial (ISE). As periodicidades das inspeções são planejadas conforme os critérios definidos na Resolução ANM n. 95/2022.

a) Inspeções de Rotina

São realizadas quinzenalmente por dois técnicos minas e geologia ou mineração e um Geotécnico que compõe o quadro do empreendedor. Os registros dessas inspeções são feitos em ficha impressa denominada Ficha de inspeção Regular – FIR. Posteriormente, estas informações são transferidas para um formato de ficha específica dentro do sistema SIGBM da

ANM, atentando para cadastros das fichas da quinzena anterior até dia 15 ou até o último dia do mês. Na inspeção todos os elementos da barragem são verificados e relatados divergências de padrões operacionais e/ou anomalias, a saber: reservatório; sistema extravasor; taludes ou parâmetros do barramento (maciço); drenagem superficial; torre e tubulação de manutenção de vazão sanitária; cercas e portões de restrição de acesso; escadas e proteções de segurança;

b) Inspeções do Engenheiro de Registro (EOR)

As inspeções do engenheiro de registro (EoR) possuem rotina mensal e é realizada por indivíduo ou equipe de empresa especializada, responsável por orientar, avaliar e validar atividades e condições das estruturas junto à equipe de geotecnia operacional. A compilação dos relatórios mensais se traduz no Relatório de Inspeção de Segurança Regular previsto pela resolução 95/2022 da ANM. Estas inspeções do EoR são acompanhadas pela equipe de geotecnia operacional. Os itens de observação são os mesmos previstos na inspeção de rotina, porém registrados em relatório e assinada pelas partes que acompanharam a inspeção e arquivadas no PSB.

c) Inspeções de Segurança Regular (ISR)

São realizadas semestralmente por indivíduo ou equipe de empresa especializada, responsável por orientar, avaliar e validar atividades e condições das estruturas junto à equipe de geotecnia operacional. Estas informações são utilizadas para compor o Relatório de Inspeção de Segurança Regular (RISR). As ISR são acompanhadas por um ou mais pessoas da equipe de geotecnia operacional. Os itens de observação são os mesmos previstos na inspeção de rotina, porém registrados em relatório e assinada pelas partes que acompanharam a inspeção e arquivadas no PSB.

d) Inspeção de Revisão Periódica de Segurança de Barragem (RPSB)

As inspeções para a RPSB são realizadas por empresa externa especializada contratada com uma periodicidade de 5 anos, uma vez que a barragem apresenta classificação de DPA médio. Os procedimentos desta inspeção seguem o mesmo procedimento das inspeções de rotina e das inspeções do EoR e inspeção de Segurança Regular. No caso de ampliação ou alteração na condição estrutural da barragem, a RPSB deve ser realizada.

e) Inspeção de Segurança Especial (ISE)

A ISE é direcionada para situações específicas e excepcionais, tais como anomalias que comprometam a segurança da estrutura; ou em qualquer tempo, quando exigida por auditorias internas, externas ou órgãos regulamentadores; ou após a ocorrência de situações excepcionais que possam significar impactos nas condições de estabilidade, como chuvas intensas, abalos sísmicos e outros. É realizada sob demanda podendo ter periodicidade diária, semanal ou quinzenal, a critério do engenheiro ou responsável pela estrutura e após avaliação de criticidade. Na Tabela 3 tem-se o resumo dos tipos de inspeção, frequência e responsável pela inspeção.

Tabela 3 – Informações dos procedimentos de inspeção adotados pelo empreendedor.

Tipo de Inspeção	Frequência	Responsável
Inspeção de rotina	Quinzenal	Empreendedor
Inspeção Engenheiro de registro (EOR)	Mensal	Empresa Externa
Inspeção de Segurança Regular (ISR)	Semestral	Empresa Externa
Revisão Periódica de Segurança de Barragens (RPSB)	A cada 05 anos ou quando houver alteração estrutural na barragem	Empresa Externa
Inspeção de Segurança Especial	Sob demanda	Empreendedor

Fonte: Adaptado de PSB (2023).

A Figura 25 apresenta parte da Ficha de Inspeção Regular-FIR utilizada para as inspeções de rotina e especial, com indicação na cor cinza, dos itens de interesse da aplicação do método TERMO – RPA. A FIR contém vários itens acerca do estado de conservação dos elementos que compõem o barramento (acessos, crista, talude de montante e jusante, ombreira esquerda e direita etc.), conforme conteúdo constante no Quadro 3, item 1.2 Estado de Conservação – EC da Resolução ANM nº.95/2022.

Figura 25 – Modelo reduzido da Ficha de Inspeção Regular –FIR utilizada pelo empreendedor.

Código	MANUAL	Código de Treinamento	Não aplica	Código de Referência	PGS - 002768
Departamento		Tipo de Ficha de Inspeção	FIR – Fichas de Inspeção Regular	Tipo de Estrutura	Barragem
Responsável		Descrição	Anexo 03 PRO – 006690: Ficha de Inspeção Geotécnica de Barragens		
Estrutura		Data da Inspeção			
Ordem de Serviço		Responsável Pelo monitoramento			
Estado de conservação da estrutura					
Pergunta		Resposta			Peso
Confiabilidade das Estruturas Extravasoras					
Percolação					
Observação					
Deformações e Recalques					
Deterioração dos Taludes / Paramentos					
Drenagem superficial					
1. Situação dos Acessos					
1.1 Falhas no direcionamento da drenagem / pontos de acúmulo de água					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
1.2 Obstrução					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
1.3 Conservação Geral					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
REGISTRO FOTOGRÁFICO					
2. Crista					
2.1 Falta/falha na camada de revestimento					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
2.2 Presença de árvores ou arbustos					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
2.3 Formigueiros, cupinzeiros e/ou tocas de animais					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
2.4 Tráfego de Animais					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
2.5 Presença de trincas/rachaduras					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			
2.6 Erosões ou ravinas					
Situação não conformidade		Descrição/Justificativa			

2.7 Recalques	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
2.8 Falhas no direcionamento da drenagem / pontos de acúmulo de água	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
2.9 Corrosão/ vazamentos na tubulação	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
2.10 Danos na estrutura de concreto	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
2.11 Conservação Geral	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
REGISTRO FOTOGRÁFICO	
3. Talude de Montante	
3.1 Presença de árvores ou arbustos	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
REGISTRO FOTOGRÁFICO	
3.2 Pontos de surgência/umidade	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
3.3 Presença de trincas/rachaduras	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
3.4 Erosões ou ravinas	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
3.5 Recalques	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
3.6 Escorregamentos	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
REGISTRO FOTOGRÁFICO	
3.7 Falhas no direcionamento da drenagem / pontos de acúmulo de água	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
3.8 Falta/falha na camada de revestimento	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
3.9 Conservação Geral	
Situação não conformidade	Descrição/Justificativa
REGISTRO FOTOGRÁFICO	

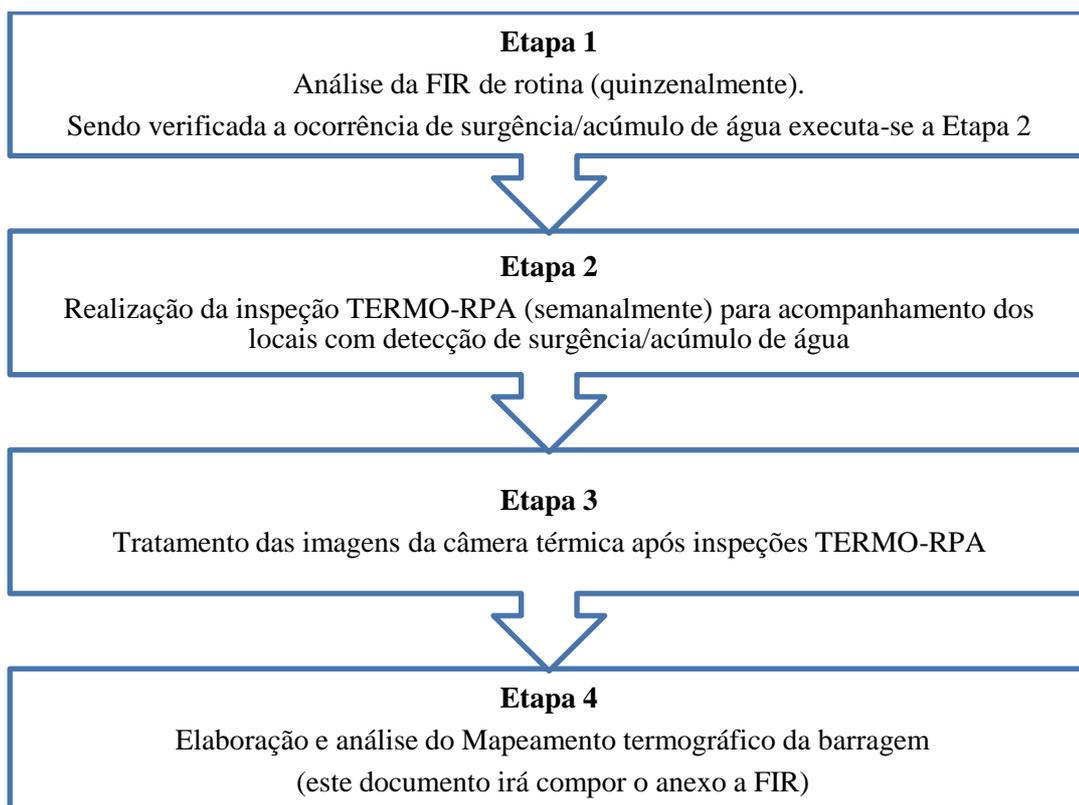
Fonte: PSB (2023).

4.3.2 Proposta das inspeções com o uso do método TERMO-RPA

A partir da análise da FIR que contém o *check list* dos itens a serem verificados nas inspeções de rotina e especial, observou-se que os itens “**falhas no direcionamento da drenagem/pontos de acúmulo de água**” e “**pontos de surgência/umidade**” representam dois cenários de anomalias aderentes às aplicações do método, uma vez que o foco das inspeções com TERMO-RPA está direcionado a áreas com presença de umidade. Neste sentido, a inspeção pelo método TERMO-RPA pode ser aplicável quando o engenheiro responsável pela inspeção identificar a presença dos cenários mencionados.

Desta forma, o técnico de inspeção passaria a executar as inspeções em períodos mais curtos, utilizando o método TERMO-RPA. Na Figura 26 apresenta-se o fluxograma proposto e validado em campo para a inspeção com o TERMO-RPA, sendo definidas quatro etapas, posteriormente melhor detalhadas.

Figura 26 – Fluxograma proposto para as inspeções TERMO-RPA.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Etapa 1 o engenheiro responsável deve analisar a FIR de rotina, a qual é preenchida quinzenalmente pelo técnico de campo. Em caso de haver marcação dos itens “identificação de falhas no direcionamento da drenagem / pontos de acúmulo de água” e “pontos de surgência/umidade”, o técnico deve proceder a Etapa 2 que trata do processo de acompanhamento dos locais identificados, por meio de inspeções TERMO-RPA. Neste caso, estas inspeções ocorreriam em menor espaço de tempo, ou seja, com frequência semanal.

Concluída a inspeção TERMO-RPA, na Etapa 3, o engenheiro ou outro profissional designado pela empresa deve realizar o tratamento das imagens da câmera térmica, conforme os procedimentos indicados na Figura 19 (apresentado no item 3.3). Destaca-se a necessidade de capacitação aos profissionais envolvidos, acerca dos softwares Agisoft metashape e QGIS.

A próxima fase é a Etapa 4, que visa a elaboração do mapeamento termográfico resultante das inspeções TERMO-RPA (Figuras 23 e 24). O mapeamento deve conter as regiões e os seus respectivos pontos de inspeção, temperatura da superfície do solo ($^{\circ}\text{C}$), umidade do solo (%), umidade relativa do ar, temperatura ambiente e classificação do solo. O mapeamento termográfico deve ser anexado nas próprias FIR de rotina para facilitar as análises por parte do engenheiro geotécnico.

É importante destacar que nos casos em que haja evolução das anomalias “falhas no direcionamento da drenagem/pontos de acúmulo de água” e “pontos de surgência/umidade” que implique em uma situação de NE1, as inspeções passariam a ser do tipo especial, ou seja, realizadas em intervalos mais curtos, com periodicidade diária.

A Tabela 4 apresenta os dados comparativos verificados entre as inspeções de rotina adotada pelo empreendedor e as inspeções com TERMO-RPA.

Tabela 4 – Comparação inspeção convencional adotada pelo empreendedor e inspeção com o TERMO-RPA.

		Inspeção TERMO-RPA
a) Aspectos segurança	Riscos existentes	Redução a exposição a riscos
b) Tempo de inspeção	1h30 min	20 min
c) Recursos materiais	Frascos para coleta de água; coador; trena; GPS; máquina fotográfica; prancheta; caneta.	RPA com câmera termográfica
d) Recursos Humanos	2 profissionais	2 profissionais
e) Acesso aos locais de inspeção	Restrito	Irrestrito
f) Campo de alcance da inspeção	Limitada ao alcance da visão	Amplo alcance, variando conforme parâmetros do sobrevôo

Fonte: Próprio autor.

Seis aspectos nortearam a avaliação, sendo que no aspecto da segurança dos colaboradores houve uma redução da exposição ao risco de queda em trabalho em talude, risco de ataque de animais peçonhentos, risco de corte, risco de torção e exposição a intempéries. Já no aspecto tempo de duração das inspeções verificou-se uma maior agilidade com o TERMO-RPA, cuja duração foi de aproximadamente 20 minutos, enquanto que, no método tradicional a duração leva em média, 1h 30min.

Os recursos humanos necessários nas duas inspeções foram similares, sendo que para o TERMO-RPA, tem-se a colaboração do piloto e o observador, e nas inspeções convencionais, pelo menos dois profissionais da equipe geotécnica realizam a atividade. No aspecto acesso aos locais de inspeção, o método TERMO-RPA não apresenta restrições, possibilitando inclusive, inspeções em cenários de emergências declaradas (NE 2 e NE 3), onde fica proibida a permanência de pessoas na área da barragem (conforme a Resolução ANM no. 95/2022), e consequentemente, procedimentos de inspeção visual.

O uso do TERMO-RPA também demonstrou que no aspecto campo de alcance, este método é mais vantajoso, em relação às inspeções tradicionais, uma vez que possibilita a variação de tomada de imagens termográficas da barragem, conforme altitudes desejadas.

5 CONCLUSÃO

A partir do mapeamento termográfico das quatro regiões analisadas, identificou-se uma correlação inversamente proporcional bem definida entre as variáveis, temperaturas e umidade do solo, indicando que áreas de menor temperatura implicam em áreas com maiores percentuais de umidade, enquanto que áreas de maior temperatura, a umidade é menor, sendo este comportamento verificado nos dois períodos analisados.

Constatou-se ainda que as imagens termográficas representaram satisfatoriamente o atual estado de conservação das regiões inspecionadas, uma vez que (R2, R3 e R4), são áreas com presença de surgências controladas e R1, trata-se de uma área sem registros de surgências. Pelo aspecto da influência do tipo de solo na detecção dos pontos com umidade, não foi possível obter uma conclusão assertiva da eficácia do método, já que as três regiões com presença de surgências controladas (R2, R3 e R4) são compostas pelo mesmo tipo de solo.

Em relação a proposta do uso do TERMO-RPA nas rotinas de inspeção adotada pela empresa, verificou-se que é possível agregar na própria FIR o método da termografia embarcada, aos itens relativos às falhas de drenagem/pontos de acúmulo de água e pontos de surgência/umidade.

Neste sentido, o teste realizado em campo, permitiu identificar vantagens no uso do TERMO-RPA, quando comparado com as inspeções de rotina realizadas pelo empreendedor, sendo estas: aspecto da segurança, com redução a exposição de riscos; maior agilidade com redução no tempo de realização de inspeção; ausência de restrições quanto ao acesso aos locais de inspeção, possibilitando inclusive, inspeções em cenários de emergências declaradas (NE 2 e NE 3), onde fica proibida a permanência de pessoas na área da barragem; no aspecto campo de alcance possibilita a variação de tomada de imagens termográficas da barragem, conforme altitudes desejadas. É importante ressaltar que para o uso do método deve haver capacitação do piloto do RPA no que se refere aos procedimentos de operação e manuseio do equipamento, tratamento das imagens e mapeamento termográfico.

Por fim, com o intuito de ampliar as análises das inspeções de barragem com o uso do método TERMO-RPA, sugere-se como trabalhos futuros avaliar a influência das condições ambientais como temperatura e umidade, bem como a presença de vegetação na superfície do solo.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, H. M. M. Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento. 2004, 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PUC Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Resolução n. 95, de 7 de fevereiro de 2022. **Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-95-de-7-de-fevereiro-de-2022-380760962>>.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (ANA) – Diretrizes para a Elaboração de Projeto de Barragens: **Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens, Volume V**. Brasília, 2016.

ANAC. 2018. **Agência Nacional de Aviação Civil**. Disponível em: <http://www2.anac.gov.br/estatistica>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) ABNT NBR 6457: AMOSTRAS DE SOLOS – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro/RJ

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 6459: SOLO – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 7180: SOLO – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) ABNT NBR 7181: SOLO – Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ.

BARRIOS, E.; CUNHA, A. M. DA. **Um Protótipo de Sistema Especialista para VANTs**. SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA. **Anais...** In: IX SIGE. São José dos Campos, São Paulo, Brasil: 2007.

BELATTAR S, RHAZI J, ELBALLOUTI A (2012) Ensaios não destrutivos por termografia infravermelha do vazio e defeito tipo favo de mel no concreto. *Int J Microstruct Mater Proposta* 7:235–253

BOGLIETTI, A., CAVAGNINO, A., Staton, D., Shanel, M., Mueller, M., & Mejuto, C. (2009). Evolução e abordagens modernas para análise térmica de máquinas elétricas. *Transações IEEE em Eletrônica Industrial*, 56, 871– 882.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2010.

BUFFI, G.; MANCIOLA, P.; GRASSI, S.; BARBERINI, M.; GAMBI, A. Survey of the Ridracoli Dam: UAV-based photogrammetry and traditional topographic techniques in the

inspection of vertical structures. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, 8:2, 1562-1579, 2017. DOI: 10.1080/19475705.2017.1362039.

CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO – UMA REVISÃO. **HOLOS**, v. 8, n. 0, p. 77–85, 2016.

CASTRO, L. V. P. **Avaliação do comportamento do nível d’água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante**. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia ambiental. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

CERQUEIRA, H. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**, Ouro Preto, 2017.

CHEN, C.-Y.; CHEN, S.-C.; CHEN, K.-H. Earth Dam Monitoring by Using Infrared Thermography Detection. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, [S. l.], v. 4, p. 40–42, 2016. Disponível em: <https://ojs.imeti.org/index.php/PETI/article/view/254>.

CHEN, C.-Y. Applications of Thermal Images for Monitoring Surficial Temperature Changes of Naked Slope. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, [S. l.], v. 5, p. 37–40, 2017. Disponível em: <https://ojs.imeti.org/index.php/PETI/article/view/928>.

Chen, CY., Chen, SC., Chen, KH. *et al.* Monitoramento térmico e análise do processo de rompimento de barragem em campo de grande porte. *Ambiental Monit Avaliar* 190, 483 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6869-y>

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79–97, 1 jun. 2014.

CORTIZO, E. C. Avaliação da técnica da termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico. Tese de Doutorado (Faculdade de Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Minas Gerais, 2007

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 719. Manual de Pavimentação. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006.

DE SOUZA JÚNIOR, Tennison Freire; MOREIRA, Eclesielter Batista; HEINECK, Karla Salvagni. BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO NO BRASIL. **HOLOS**, [S. l.], v. 5, p. 2–39, 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.7423. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7423>.

DI PASQUALE, A. et al. Monitoring Strategies of Earth Dams by Ground-Based Radar Interferometry: How to Extract Useful Information for Seismic Risk Assessment. **Sensors**, v. 18, n. 1, p. 244, 2018.

FERRAZ, C. A. DE M. et al. O uso de geotecnologias como uma nova ferramenta para o controle externo. **Revista do TCU**, p. 14, 2015.

FERREIRA, M. E.; COSTA, J. V. S. **Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados no monitoramento e perícia ambiental de barragens no Estado de Goiás**. São Paulo: 2017.

FONSECA, A. R. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. Dissertação apresentada como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia civil. Ouro Preto: UFOP. 2003.

GIONGO, et al. LiDAR: **princípios e aplicações florestais**. 2010. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/228630890_LiDAR_principios_e_aplicacoes_florestais>. Acesso em 24 nov. 2020.

HIRAI, H.; ISHII, K. Development of Dam Inspection Underwater Robot. **Journal of Robotics, Networking and Artificial Life**, v. 6, n. 1, p. 18–22, jun. 2019.

ISOMÄKI, E.; HÄNNINEN, K. MONITORING OF THE SUBMERGED STRUCTURES OF DAMS. **Energyforsk**, p. 8, 2016.

JANKU, M., CIKRLÉ, P., GROSEK, J., ONDREJ, A., JOSEF, S. **Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges**. *Construction and Building Materials*, V.225, p. 3-5,2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.320>.

JANSSENS, O., VAN DE WALLE, R., LOCCUFIER, M., & VAN HOECKE, S. (2017). Aprendizado profundo para monitoramento da integridade da máquina com base em imagens térmicas infravermelhas. *Transações IEEE/ASME em Mecatrônica*, 23(1), 151–159.

Lee, J. G., Ryu, Y. C., Kim, Y. H., Choi, W., & Kim, H. J. (2018). Método de termografia infravermelha por drone para inspeção de vazamento de aterro de reservatório. *Jornal da Sociedade Coreana de Engenheiros Agrônomos*, 60 (6), 21–31. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2018.60.6.021>.

LEONI, M., FURLAN, C., OLIVEIRA, L., OLIVEIRA, P., SAHADE, R. **Novos Patologistas: Um legado de paixão pela boa engenharia**. E-book. <https://www.doccity.com/pt/ebook-novos-patologistas-um-levado-de-paixao-pela-boa-engenharia/5780037>.

LUZ *et al.* **Tratamento de Minérios**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT - 5ª Edição, p. 3, 4 e 842, 2010.

MACHADO, G. de F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo – MG, 2007.

MEOLA C, BOCCARDI S, CARLOMAGNO GM, BOFA ND, RICCI F, SIMEOLI G, RUSSO P (2017) Danos por impacto em compósitos por meio de monitoramento on-line e avaliação não destrutiva com termografia infravermelha. *END E Int* 85:34–42

MESQUITA, M. G. B. F. Caracterização estatística da condutividade hidráulica saturada do solo. 2001. 110 f. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2001.

NBR 13.028/2017 - ABNT. **Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos.** (ISBN 978-85-07-07286-7) ABNT, 2017.

Noufid, A., Belattar, S. Simulation of a Defect in a Concrete Dam Structure Using Steady-State Infrared Thermography. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng* **45**, 187–196 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s40996-020-00534-2>.

PETRIE, Gordon; TOTH, Charles K. *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.

Pozzer, S.; Dalla Rosa, F.; Pravia, Z.M.C.; Rezazadeh Azar, E.; Maldague, X. Long-Term Numerical Analysis of Subsurface Delamination Detection in Concrete Slabs Via Infrared Thermography. *Appl. Sci.* 2021, 11, 4323.

RIDOLFI, E.; MANCIOLA, P. Water Level Measurements from Drones: A Pilot Case Study at a Dam Site. **Water**, v. 10, n. 3, p. 297, mar. 2018.

SANTOS, L. “Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados”. 161 f. Dissertação (Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica). 2012

SCAIONI, M. et al. Geodetic and Remote-Sensing Sensors for Dam Deformation Monitoring. **Sensors**, v. 18, n. 11, p. 3682, nov. 2018.

SANTIBAÑEZ, Sebastian Alfredo Fuentes. **Avaliação da Influência do Modelo de Ajustamento de Observações e da Densidade de Pontos Laser Scanner Terrestre para a Representação Paramétrica de Superfícies Planas**. 2010, 87f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2010.

SANTOS, L. “Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados”. 161 f. Dissertação (Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica), 2012.

SILVEIRA, J. F. A.; OLIVEIRA, K. D. **Métodos de inspeção remota de barragens**. Revista brasileira de engenharia de barragens, Comitê brasileiro de barragens, ano V n ° 07, fevereiro de 2019.

SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO (SIGBM). **Cadastro Nacional de Barragens de Mineração. Agência Nacional De Mineração- ABM.** Database: fevereiro de 2020

SILVA, D. S. **Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens.** 2016. 162 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2016.

SILVEIRA, J. F. A.; MACHADO, J. A. DE. **A Importância de Implementação de Planos Emergenciais para as Barragens à Montante de Centros Urbanos.** Comitê Brasileiro de Barragem, XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens, Goiânia, 11-15 April 2015. 2016.

SIRCA JR., G. F.; ADELI, H. Infrared thermography for detecting defects in concrete structures. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 24, n. 7, p. 508-515, 13 Nov. 2018.

SESTREM, L. P. Concepção e implantação de um plano de instrumentação para avaliação das condicionantes geotécnicas de uma encosta litorânea. Dissertação apresentada como requisito parcial da Universidade Federal do Paraná para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção Civil. Curitiba: UFPR, 2012.

TITMAN, Applications of thermography in non-destructive testing of structures, *NDT&E International* 34 (2001) 149–154.

VALE. Plano de Segurança de Barragem (PSB) - Manual de operação da barragem. Parauapebas, 2023.

VIEIRA, M. F., et al. Influência do lago da UHE Tucuruí sobre a barragem de concreto: um estudo sobre os MTJ's. *Revista CIATEC-UPF*.2017, Vol.9 Issue 1, p1-14. 14p

APÊNDICE A

Especificações RPA Matrice 300 rtk e da câmara térmica Zenmuse XT 2.

Aerovane	
Dimensões (hélices excluídas)	810×670×430 mm (C×L×A)
Dimensões (dobrado)	430×420×430 mm (C×L×A)
Distância entre eixos diagonal	895 mm
Peso (baterias excluídas)	3600g
Carga útil máxima	2700g
Peso Máximo de decolagem	9.000g
Frequência de operação	2,400 - 2,4835 GHz; 5,725 - 5,850 GHz
Potência do Transmissor (EIRP)	2,400 - 2,4835 GHz: 29,5dBm (FCC); 18,5dBm (CE); 18,5dBm (SRRC); 18,5dBm (MIC) 5,725 - 5,850 GHz: 28,5dBm (FCC); 12,5 dBm (CE); 28,5dBm (SRRC)
Precisão de pairar (sem vento ou com vento)	Vertical: ±0,1 m (sistema de visão ativado)) ±0,5 m (modo P com GPS) ±0,1m (D-RTK) Horizontal: ±0,3 m (sistema de visão ativado)) ±1,5 m (modo P com GPS) ±0,1m (D-RTK)
Velocidade angular máxima	Inclinação: 300°/s, Guinada: 100°/s
Ângulo máximo de inclinação	30° (modo P e sistema de visão frontal habilitados: 25°)
Velocidade máxima de subida	6m/s
Velocidade máxima de descida (vertical)	5m/s
Velocidade máxima de descida (inclinação)	7m/s
Velocidade horizontal máxima	23m/s
Teto máximo de serviço acima do nível do mar 5.000 m (com hélices 2.110 e peso de decolagem 7 kg) / 7.000 m (com 2195 hélices de alta altitude e baixo ruído e peso de decolagem 7 kg)	
Resistência máxima ao vento	12m/s
Tempo máximo de voo direto (nível do mar)	45 minutos (peso da carga 700 g)
Tempo máximo de flutuação (nível do mar)	43 minutos (peso da carga 700 g)
Modelo de motor	6009
Modelo de hélices	2110
Gimbals DJI suportados	Zenmuse XT2 / Zenmuse XT S / Zenmuse Z30 / Zenmuse H20 / Zenmuse H20T / Zenmuse P1 / Zenmuse L1 / Zenmuse H20N
Configurações de cardan suportadas	Gimbals duplos para baixo, gimbal único para cima, único para baixo Gimbal, Gimbal Único Descendente + Gimbal Único Ascendente, Duplo Gimbals descendentes + Gimbal ascendente único
Outros produtos DJI suportados	Radar CSM, Coletor 2
Classificação de proteção de entrada	IP45

GNSS	GPS+GLONASS+BeiDou+Galileo
Temperatura de operação	-20° a 50°C (-4° a 122°F)
Controlador Inteligente	
Operação empresarial OcuSync Alcance de frequência	2,400 - 2,4835 GHz; 5,725 - 5,850 GHz*
Distância máxima de transmissão	NCC/FCC: 15 km
(Desobstruído, livre de interferência)	CE/MIC: 8 km SRRC: 8 km
Potência do Transmissor (EIRP)	2,400 - 2,4835 GHz: 29,5dBm (FCC); 18,5 dBm (CE); 18,5dBm (SRRC); 18,5dBm (MIC) 5,725 - 5,850 GHz: 28,5dBm (FCC); 12,5 dBm (CE); 20,5dBm (SRRC)
Bateria externa	Nome: Bateria Inteligente WB37 Capacidade: 4920mAh; Tensão: 7,6 V Tipo de bateria: LiPo; Energia: 37,39Wh Tempo de carga (usando estação de bateria inteligente BS60): 70 min (15° a 45° C); 130 min (0° a 15° C)
Bateria embutida	Tipo de bateria: íon de lítio 18650 (5000 mAh a 7,2 V) Tipo de carga: Suporta carregador USB classificado como 12 V / 2 A Potência nominal: 17 W** Tempo de carregamento: 2 horas e 15 minutos (usando um carregador USB classificado 12V/2V)
Expediente	Bateria embutida: Aprox. 2,5 horas Bateria embutida + bateria externa: Aprox. 4,5 horas
Tensão/corrente da fonte de alimentação (porta USB-A)	5V/1,5A
Faixa de temperatura de operação	-20° a 40° C (-4° a 104° F)
Capacidade de armazenamento	Rom: 32 GB + escalável com microSD
Sistema de visão	
Faixa de detecção de obstáculos	Frente / Trás / Esquerda / Direita: 0,7 - 40 m Para cima/para baixo: 0,6 - 30 m
Campo de visão	Para frente/para trás/para baixo: 65°(H), 50°(V) Esquerda/Direita/Cima: 75°(H), 60°(V)
Ambiente operacional	Superfícies com padrões claros e iluminação adequada (> 15 lux)
Sistema de detecção infravermelha	
Faixa de detecção de obstáculos	0,1 - 8m
campo de visão	30°
Ambiente operacional	Obstáculos grandes, difusos e reflexivos (refletividade >10%)
Bateria de voo inteligente	
Capacidade	5.935mAh
Tensão	52,8 V
Tipo de Bateria	Li-Po 12S

Energia	274Wh
Peso Líquido (Unico)	Aproximadamente. 1,35kg
Temperatura de operação	-4° a 122°F (-20° a 50°C)
Temperatura de armazenamento	71,6° a 86°F (22° a 30°C)
Temperatura de carregamento	41° a 104°F (5° a 40°C)
Potência máxima de carregamento	470 W
Camera FPV	
Resolução	960p
campo de visão	145°
Taxa de quadros	30 fps

Fonte: Manual Matrice 300 RTK (2024).

APÊNDICE B

Resultado de ensaio de caracterização do solo nas regiões R1, R2, R3 e R4.

		IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	
GEOMINAS GEOLOGIA E CONSTRUTORA LTDA		GEOMINAS	GEO 4138
INTERESSADO: Vale	MATERIAL: Solc	NORMA:	
OBRA: REFORÇO DE ESTRUT. CARA	DESCRIÇÃO: Argila areno-siltosa com pedregulho	AMOSTRA: 01	
PROCEDÊNCIA: REGIÃO-1	PROFUNDIDADE: 20 cm	DATA: 11/08/2023	
IDENTIFICAÇÃO FOTOGRÁFICA DA AMOSTRA		CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES	
 <p style="font-size: small; text-align: right;">GEOMINAS FOTOS 11 de nov. de 2022 15:58:03</p>		Massa da Amostra	
		3,00 kg	
		Cor da Amostra	
		INDIFERENCIADA	
		Classificação segundo a origem	
		-	
Granulometria Tátil Visual		Argila siltosa	
RESUMO GERAL			
ENSAIOS	NORMA	VALORES	UNIDADES
UMIDADE NATURAL DA AMOSTRA	NBR 6457/2016		%
LIMITE LIQUIDEZ	NBR 6459/2016	58,41	%
LIMITE DE PLASTICIDADE	NBR 7180/2016	33,15	%
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	-	25,26	%
MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	NBR 6458/2016	2,906	g/cm ³
GRANULOMETRIA	NBR 7181/2016	Argila areno-siltosa com pedregulho	
CLASSIFICAÇÃO HRB (IG)	Manual de Pav. DNIT 2006	A-7-5(5)	

		IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	
GEOMINAS GEOLOGIA E CONSTRUTORA LTDA		GEOMINAS	GEO 4141
INTERESSADO: Vale	MATERIAL: Solc	NORMA:	
OBRA: REFORÇO DE ESTRUT. CARA	DESCRIÇÃO: Areia com pedregulho	AMOSTRA: 01	
PROCEDÊNCIA: REGIÃO - 2	PROFUNDIDADE: 20 cm	DATA: 11/08/2023	
IDENTIFICAÇÃO FOTOGRÁFICA DA AMOSTRA		CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES	
 <p>GEOMINAS FOTOS 11 de nov. de 2022 16:05:21</p>		Massa da Amostra 3,12 kg	
		Cor da Amostra Marrum/Amarelo	
		Classificação segundo a origem -	
		Granulometria Tactil Visual Argila silúcea	
RESUMO GERAL			
ENSAIOS	NORMA	VALORES	UNIDADES
UMIDADE NATURAL DA AMOSTRA	NBR 6457/2016		%
LIMITE LIQUIDEZ	NBR 6459/2016	27,99	%
LIMITE DE PLASTICIDADE	NBR 7180/2016	17,55	%
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	-	10,44	%
MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	NBR 6458/2016	2,973	g/cm ³
GRANULOMETRIA	NBR 7181/2016	Areia com pedregulho	
CLASSIFICAÇÃO HRB (IG)	Manual de Pav. DNIT 2006	A-2-4(0)	

		IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	
GEOMINAS GEOLOGIA E CONSTRUTORA LTDA		GEOMINAS	GEO 4140
INTERESSADO: Vale	MATERIAL: Solc	NORMA:	
OBRA: REFORÇO DE ESTRUT. CARA	DESCRIÇÃO: Areia com pedregulho	AMOSTRA: 01	
PROCEDÊNCIA: REGIÃO 3	PROFUNDIDADE: 20 cm	DATA: 11/08/2023	
IDENTIFICAÇÃO FOTOGRÁFICA DA AMOSTRA		CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES	
		Massa da Amostra	
		444,44 g	
		Cor da Amostra	
		Vermelha	
		Classificação segundo a origem	
-		Granulometria Tactil Visual	
-		Argila silteosa	
RESUMO GERAL			
ENSAIOS	NORMA	VALORES	UNIDADES
UMIDADE NATURAL DA AMOSTRA	NBR 6457/2016		%
LIMITE LIQUIDEZ	NBR 6459/2016	27,25	%
LIMITE DE PLASTICIDADE	NBR 7180/2016	19,38	%
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	-	7,87	%
MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	NBR 6458/2016	3,569	g/cm ³
GRANULOMETRIA	NBR 7181/2016	Areia com pedregulho	
CLASSIFICAÇÃO HRB (IG)	Manual de Pav. DNIT 2006	A-2-4(0)	

		IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	
GEOMINAS GEOLOGIA E CONSTRUTORA LTDA		GEOMINAS	GEO 4142
INTERESSADO: Vale	MATERIAL: Solo	NORMA:	
OBRA: REFORÇO DE ESTRUT. CARA	DESCRIÇÃO: Areia com pedregulho	AMOSTRA: 01	
PROCEDÊNCIA: REGIÃO - 4	PROFUNDIDADE: 20 cm	DATA: 11/08/2023	
IDENTIFICAÇÃO FOTOGRÁFICA DA AMOSTRA		CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES	
		Massa da Amostra	
		3,96 kg	
		Cor da Amostra	
		marrom	
		Classificação segundo a origem	
		-	
Granulometria Tactil Visual		Areia com pedregulho	
RESUMO GERAL			
ENSAIOS	NORMA	VALORES	UNIDADES
UMIDADE NATURAL DA AMOSTRA	NBR 6457/2016		%
LIMITE LIQUIDEZ	NBR 6459/2016	25,42	%
LIMITE DE PLASTICIDADE	NBR 7180/2016	19,43	%
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	-	5,99	%
MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS	NBR 6458/2016	3,512	g/cm ³
GRANULOMETRIA	NBR 7181/2016	Areia com pedregulho	
CLASSIFICAÇÃO HRB (IG)	Manual de Pav. DNIT 2006	A-1-b(0)	