



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
CAMPUS MARCO ZERO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

BÁRBARA CAROLINA COSTA DE OLIVEIRA

**USO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO FERRAMENTA
COMPLEMENTAR DE DIAGNÓSTICO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
URBANOS**

Macapá - AP

2026

BÁRBARA CAROLINA COSTA DE OLIVEIRA

**USO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO FERRAMENTA
COMPLEMENTAR DE DIAGNÓSTICO EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS
URBANOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao curso de Engenharia Civil do
Campus Marco Zero da Universidade
Federal do Amapá como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharela em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Adenilson Costa de
Oliveira, Me.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP
Elaborado por Cristina Fernandes— CRB-2 1569

O48t Oliveira, Bárbara Carolina Costa de.
Uso da termografia infravermelha como ferramenta complementar de diagnóstico em pavimentos flexíveis urbanos / Bárbara Carolina Costa de Oliveira. - Macapá (AP), 2026.
1 recurso eletrônico.
69 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amapá, Macapá (AP), 2026.
Orientador: Adenilson Costa de Oliveira.

Modo de acesso: World Wide Web.
Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Construção civil. 2. Pavimentos - Projetos e construção. 3. Pavimentos - Diagnósticos. I. Oliveira, Adenilson Costa de, orientadora. II. DCET. III. Título.

CDD 23. ed. – 625.84

OLIVEIRA, Bárbara Carolina Costa de. **Uso da termografia infravermelha como ferramenta complementar de diagnóstico em pavimentos flexíveis urbanos**. Orientador: Adenilson Costa de Oliveira. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amapá, Macapá (AP), 2026.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por me conceder a vida, a sabedoria e o discernimento necessários para trilhar esta jornada acadêmica.

De modo muito especial, dedico esta conquista à memória dos meus pais, Eulálio Modesto e Joana Filha, que, embora tenham partido antes da conclusão desta etapa, foram e continuam sendo exemplos de força, fé e determinação em minha vida.

Agradeço profundamente ao meu esposo, João Haziel, e à minha filha, Safira Maravilha, que são minha inspiração diária e o motivo do meu desejo constante de vencer. Vocês são a luz e a alegria dos meus dias.

Expresso também minha gratidão aos meus irmãos, tanto aos que estão presentes quanto aos que partiram precocemente, por todo o apoio, carinho e cumplicidade ao longo dessa caminhada.

Aos meus professores, deixo meu sincero agradecimento pelos ensinamentos, pela dedicação e por contribuírem de forma significativa para a minha formação acadêmica e pessoal.

Por fim, agradeço a todos os meus familiares, amigos e sogros, que de alguma forma me apoiaram, incentivaram e contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

O presente trabalho, intitulado “Uso da Termografia Infravermelha como Ferramenta Complementar de Diagnóstico em Pavimentos Flexíveis Urbanos”, tem como objetivo avaliar a eficácia da termografia infravermelha na identificação complementar de defeitos e possíveis áreas com presença de umidade em pavimentos flexíveis urbanos, por meio de um estudo de caso realizado no município de Macapá — AP. A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, sendo desenvolvida a partir da análise comparativa entre inspeção visual convencional e imagens termográficas obtidas em campo. A metodologia adotada envolveu levantamento bibliográfico, definição da área de estudo, inspeção visual das condições do pavimento, registro fotográfico convencional e coleta de imagens térmicas utilizando câmera infravermelha. Foram analisados dois trechos distintos de vias urbanas: um com manifestações patológicas evidentes e outro recentemente recapeado, permitindo a comparação do comportamento térmico entre superfícies degradadas e íntegras. Os resultados evidenciaram que pavimentos com defeitos apresentam maior variabilidade térmica, associada à presença de umidade, descontinuidades estruturais e heterogeneidade dos materiais, enquanto pavimentos em melhores condições apresentam comportamento térmico mais uniforme, com predominância de temperaturas elevadas e distribuição homogênea do calor. Além disso, observou-se que regiões com acúmulo de água apresentaram temperaturas inferiores, indicando possível deficiência de drenagem superficial e maior suscetibilidade ao desenvolvimento de defeitos. Dessa forma, conclui-se que a termografia infravermelha se mostrou uma técnica eficiente como ferramenta complementar de diagnóstico, permitindo a identificação de áreas potencialmente comprometidas, inclusive em estágios iniciais de deterioração. Sua aplicação contribui para o planejamento de ações de manutenção preventiva, favorecendo a durabilidade, o desempenho e a conservação dos pavimentos urbanos.

Palavras-chave, pavimentos flexíveis; termografia infravermelha; diagnóstico complementar; inspeção não destrutiva; manutenção viária.

ABSTRACT

This study, entitled *"Use of Infrared Thermography as a Complementary Diagnostic Tool in Urban Flexible Pavements"*, aims to evaluate the effectiveness of infrared thermography in the identification of defects and potential moisture-affected areas in urban flexible pavements through a case study conducted in the city of Macapá, Amapá, Brazil. The research is characterized as qualitative and was developed based on a comparative analysis between conventional visual inspection and thermographic images obtained in the field. The adopted methodology involved a literature review, definition of the study area, visual inspection of pavement conditions, conventional photographic documentation, and thermal image acquisition using an infrared camera. Two distinct sections of urban roads were analyzed: one presenting evident pavement defects and another recently resurfaced section, allowing a comparison of the thermal behavior between deteriorated and intact surfaces. The results showed that pavements with defects exhibit greater thermal variability, associated with the presence of moisture, structural discontinuities, and material heterogeneity, whereas pavements in better condition present a more uniform thermal pattern, characterized by higher temperatures and homogeneous heat distribution. Furthermore, areas with water accumulation exhibited lower temperatures, indicating possible deficiencies in surface drainage and greater susceptibility to pavement deterioration. Therefore, it can be concluded that infrared thermography proved to be an effective complementary diagnostic, enabling the identification of potentially compromised areas, including those in the early stages of deterioration. Its application contributes to the planning of preventive maintenance actions, promoting the durability, performance, and preservation of urban pavements.

Keywords: flexible pavements; infrared thermography; complementary diagnosis; non-destructive inspection; pavement maintenance.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRUTURA BÁSICA DE UM PAVIMENTO FLEXÍVEL.....	15
FIGURA 2 - CORTE ESQUEMÁTICO DE PAVIMENTO FLEXÍVEL	16
FIGURA 3 - SÍNTESE DAS PRINCIPAIS INFORMAÇÕES DA ABNT NBR 7207:2022	17
FIGURA 4 - TRINCA EM MALHA (COURO DE JACARÉ).....	18
FIGURA 5 - AFUNDAMENTO EM TRILHA DE RODA.....	19
FIGURA 6 - DESAGREGAÇÃO SUPERFICIAL DO REVESTIMENTO ASFÁLTICO	20
FIGURA 7 - EXTRAÇÃO DE CORPO E PROVA EM PAVIMENTO ASFÁLTICO	21
FIGURA 8 - ABERTURA DE TRINCHEIRA PARA INSPEÇÃO DE PAVIMENTO.....	22
FIGURA 9 - ENSAIO DE PLACA DE CARGA EM PAVIMENTO	23
FIGURA 10 - EXEMPLO DE IMAGEM TERMOGRÁFICA (TERMOGRAMA).....	25
FIGURA 11 - APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA NA INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS ...	26
FIGURA 12 - ESQUEMA DOS PARÂMETROS TÉRMICOS (EMISSIVIDADE, REFLETIVIDADE E TRANSMISSIVIDADE)	26
FIGURA 13 - APLICAÇÕES DA TERMOGRAFIA (EDIFICAÇÕES, SISTEMAS ELÉTRICOS E EQUIPAMENTOS)	28
FIGURA 14 - APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA EM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	29
FIGURA 15 - SÍNTESE DOS PRINCIPAIS REQUISITOS DA ABNT NBR ISO 9712.....	31
FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE PAVIMENTO ÍNTEGRO E PAVIMENTO DETERIORADO EM TERMOGRAFIA	32
FIGURA 17 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA ADOTADA NA PESQUISA	37
FIGURA 18 - CÂMERA TERMOGRÁFICA TG165-X.....	38
FIGURA 19 - EXEMPLO DE REGISTRO FOTOGRÁFICO COM IDENTIFICAÇÃO DE DATA, HORA E LOCALIZAÇÃO	40
FIGURA 20 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E IDENTIFICAÇÃO DOS TRECHOS DE PAVIMENTO ANALISADOS, EM MACAPÁ – AP.	41
FIGURA 21 - TRECHO COM PAVIMENTO RECENTEMENTE RECAPEADO	42
FIGURA 22 - TRECHO COM MANIFESTAÇÕES DE DEFEITOS NO PAVIMENTO.....	42
FIGURA 23 - CONDIÇÕES CLIMÁTICAS MÉDIAS E SUA INFLUÊNCIA NO PAVIMENTO	44
FIGURA 24 - IMAGEM TERMOGRÁFICA DESTACANDO A HETEROGENEIDADE TÉRMICA ENTRE REGIÕES ÍNTEGRAS E ÁREAS COM UMIDADES	47
FIGURA 25 - IMAGEM TERMOGRÁFICA DO PAVIMENTO EVIDENCIANDO ACÚMULO DE ÁGUA. ...	48
FIGURA 26 - TRINCAS OBSERVADAS NA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO FLEXÍVEL NO TRECHO ANALISADO.	50
FIGURA 27 - PRESENÇA DE PANEAS COM EXPOSIÇÃO DA CAMADA INFERIOR DO PAVIMENTO	51
FIGURA 28 - EVOLUÇÃO DAS PANEAS NO PAVIMENTO ENTRE FEVEREIRO E MAIO DE 2026.	53
FIGURA 29 - TRECHO RECAPEADO	54
FIGURA 30 - COMPARAÇÃO TÉRMICA ENTRE ÁREA SOMBREADA E ÁREA EXPOSTA AO SOL EM PAVIMENTO RECAPEADO	55
FIGURA 31 - DESGASTE SUPERFICIAL DO PAVIMENTO COM PERDA DE AGREGADOS	56
FIGURA 32 - VARIAÇÕES TÉRMICAS ASSOCIADAS À PRESENÇA DE FISSURAS E UMIDADE NO PAVIMENTO.....	57
FIGURA 33 - EVOLUÇÃO DE FISSURAS NO PAVIMENTO MONITORADO.....	58
FIGURA 34 - REMENDO NO PAVIMENTO COM SINAIS DE DESGASTE SUPERFICIAL	60

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS ADOTADOS PARA A COLETA E ANÁLISE TERMOGRÁFICA DO PAVIMENTO.....	38
TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA CÂMERA TERMOGRÁFICA FLIR TG165-X.....	39
TABELA 3 - SÍNTESE DOS DEFEITOS NO PAVIMENTO.....	62

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - RELAÇÃO ENTRE FAIXA DE COR E TEMPERATURA DO PAVIMENTO ANALISADO..47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa	12
1.2	Problema de pesquisa	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivos específicos	13
1.4	Delimitações da pesquisa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Pavimentos	15
2.2	Pavimento flexível	16
2.3	Defeitos em pavimentos flexíveis	18
2.3.1	Defeitos de couro de Jacaré	18
2.3.2	Defeitos de afundamento em trilha de roda.....	19
2.3.3	Defeito de desagregação superficial	20
2.4	Ensaio destrutivo aplicado à avaliação de pavimentos flexíveis	20
2.4.1	Extração de corpos de prova (sondagem rotativa).....	21
2.4.2	Abertura de trincheiras e poços de inspeção	22
2.4.3	Ensaio de placa de carga.....	22
2.4.4	Limitações dos ensaios destrutivos.....	23
2.4.5	Relação com os ensaios não destrutivos	24
2.5	Termografia Infravermelha	24
2.5.1	Emissividade, refletividade e transmissividade	26
2.5.2	Aplicações da termografia.....	28
2.6	Limitações da termografia infravermelha	33
3.	METODOLOGIA	34
3.1.	Levantamento bibliográfico	34
3.2.	Definição da área de estudo.....	34
3.3.	Inspeção visual do pavimento	34
3.4.	Registro fotográfico convencional.....	35
3.5.	Aquisição das imagens termográficas	35
3.6.	Análise comparativa das imagens	35
3.7.	Interpretação dos resultados	36
3.8.	Monitoramento da evolução dos defeitos	36
3.9.	Materiais e equipamentos	38
3.10.	Área de Estudo	41

3.11. Caracterização das áreas de estudo.....	43
3.12. Condições ambientais da área de estudo	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1. Levantamento dos defeitos no pavimento.....	49
4.1.1. Trincas no pavimento.....	49
4.1.2. Painelas no pavimento	51
4.1.3. Evolução das painelas no pavimento ao longo do monitoramento	52
4.1.4. Trecho recapeado.....	54
4.1.5. Desgaste superficial (desagregação do revestimento).....	56
4.1.6. Evolução de desgaste para trincas ao longo do monitoramento	58
4.1.7. Remendos no pavimento	59
4.2. Análise geral dos defeitos identificados no pavimento asfáltico	61
4.3. Comparação entre trechos analisados.....	62
4.4. Síntese de defeitos no pavimento	62
5. CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura viária urbana exerce papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico das cidades, sendo responsável por garantir a mobilidade da população, o escoamento de bens e serviços e o acesso a equipamentos públicos essenciais (DNIT, 2006; BALBO, 2007). Nesse contexto, os pavimentos constituem elementos estruturais de grande relevância, devendo apresentar condições adequadas de desempenho, segurança e conforto aos usuários.

Contudo, observa-se que considerável parte das vias urbanas brasileiras, especialmente em cidades localizadas em regiões de clima quente e úmido, como Macapá — AP, apresentam manifestações de defeitos recorrentes nos pavimentos flexíveis (BERNUCCI et al., 2010). Para Balbo (2007) esses defeitos estão frequentemente atrelados à ação da água, às variações térmicas, ao tráfego e à deficiência de manutenção antecipatória, culminando em trincas, afundamentos, desagregações e remendos, que enfraquecem a vida útil do pavimento.

Tradicionalmente, a avaliação das condições operacionais dos pavimentos é conduzida por meio de inspeções visuais, as quais, embora amplamente utilizadas, apresentam limitações quanto ao diagnóstico de defeitos incipientes e de inconformidades estruturais ainda não manifestados superficialmente (DNIT, 2003; YODER; WITCZAK, 1975). Assim, torna-se necessária a adoção de métodos complementares que possibilitem uma análise mais eficiente e preventiva do estado dos pavimentos.

Nessas circunstâncias, a termografia infravermelha surge como uma alternativa consistente, por se tratar de um método não destrutivo capaz de identificar variações térmicas na superfície dos materiais (MALDAGUE, 2001; HOLST, 2000). Essas variações podem estar conectadas à presença de umidade e a descontinuidades internas, fatores diretamente relacionados ao surgimento de defeitos em pavimentos flexíveis (BERNUCCI et al., 2010; MALDAGUE, 2001). Assim, a aplicação da termografia pode contribuir para a identificação complementar de áreas críticas, auxiliando no planejamento de ações de manutenção e conservação viária.

Diante desse contexto, este trabalho propõe o uso da Termografia Infravermelha como Ferramenta de Diagnóstico complementar em Pavimentos Flexíveis Urbanos”, considerando sua utilização como ferramenta auxiliar às técnicas tradicionais de inspeção, conforme discutido por Maldague (2001) e Bernucci et al.

(2010).

1.1 Justificativa

A escolha do tema justifica-se, inicialmente, pela relevância técnica relacionada à necessidade de aprimoramento dos métodos de avaliação e manutenção de pavimentos urbanos, conforme indicado por Medina (2015). A identificação complementar de defeitos pode favorecer significativamente para a adoção de medidas preventivas, mitigando custos de intervenções corretivas e prolongando a vida útil das vias.

À luz da ciência, a pesquisa busca contribuir para a ampliação do conhecimento acerca da aplicação da termografia infravermelha na área de pavimentação, principalmente no contexto urbano e em regiões de clima equatorial, onde a interferência da umidade e da temperatura é mais pronunciada (MALDAGUE, 2001; HOLST, 2000). Ressalta-se que os estudos ainda são condicionados a serem aplicados à realidade amazônica, o que corrobora a importância da presente investigação.

Do ponto de vista social e urbano, a melhoria das condições dos pavimentos impacta diretamente na segurança viária, no conforto dos usuários e na qualidade de vida da população. Outrossim, a utilização de métodos não destrutivos e preventivos pode auxiliar os gestores públicos no planejamento mais adequado das ações de manutenção viária. Nesse contexto, a aplicação da termografia infravermelha destaca-se como uma alternativa promissora, uma vez que possibilita a identificação de anomalias de forma rápida, sem a necessidade de intervenções destrutivas na estrutura do pavimento.

Além disso, trata-se de uma técnica que demanda menor tempo de execução em campo quando comparada a métodos tradicionais de investigação, permitindo a inspeção de grandes áreas em curto período. Do ponto de vista econômico, a termografia contribui para a redução de custos operacionais, ao minimizar a necessidade de ensaios invasivos, equipamentos pesados e equipes numerosas. Consequentemente, há uma diminuição na mobilização de mão de obra e na interferência no tráfego urbano.

Assim, este trabalho se justifica pela sua relevância técnica, científica e social, ao utilizar um método de análise que gera previsibilidade no surgimento de defeitos em pavimentos flexíveis, os quais geram transtornos no âmbito viário e, por sua vez,

na função efetiva das vias de uma cidade.

1.2 Problema de pesquisa

Diante do exposto, estabelece-se como problema de pesquisa a seguinte questão: A termografia infravermelha é uma ferramenta eficaz para identificar, de forma complementar, defeitos e possíveis áreas com presença de umidade em pavimentos flexíveis urbanos?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a eficácia da termografia infravermelha como ferramenta de diagnóstico complementar na identificação de defeitos e possíveis áreas com presença de umidade em pavimentos flexíveis urbanos na cidade de Macapá.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre pavimentos flexíveis, seus principais defeitos e os fundamentos da termografia infravermelha, destacando suas aplicações na engenharia civil
- Avaliar trechos de pavimentos com diferentes condições de conservação por meio de inspeção visual e termografia infravermelha, comparando os resultados obtidos a fim de verificar a aplicabilidade da técnica termográfica na identificação de defeitos superficiais.
- Verificar a relação entre variações de temperatura e a ocorrência de defeitos no pavimento;

1.4 Delimitações da pesquisa

A presente pesquisa está delimitada à análise de pavimentos flexíveis (asfálticos) localizados em vias urbanas da cidade de Macapá-AP. A pesquisa utiliza a aplicação da termografia infravermelha como método não destrutivo e auxiliar, não tendo como objetivo propor substituição dos métodos tradicionais de avaliação de pavimentos.

A análise adotada foi de natureza qualitativa, baseada na interpretação das imagens térmicas e na correlação com a inspeção visual, não abrangendo ensaios laboratoriais, modelagens estruturais ou avaliações quantitativas de capacidade de carga do pavimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

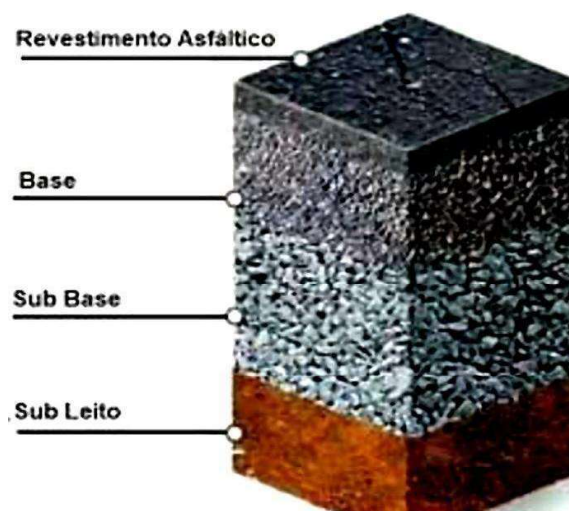
2.1 Pavimentos

Os pavimentos compõem em estruturas projetadas para suportar e distribuir convenientemente as cargas provenientes do tráfego às camadas subjacentes, assegurando condições satisfatórias de segurança, conforto e durabilidade ao usuário (DNIT., 2006; BERNUCCI et al., 2010). Tais estruturas são compostas por diferentes camadas, cada uma com funções específicas no desempenho estrutural e funcional da via. Nesse contexto, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes destaca que:

O pavimento é uma estrutura constituída por um conjunto de camadas superpostas, construídas sobre o subleito, com a finalidade de resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego, proporcionando condições adequadas de rolamento, segurança e conforto aos usuários. (DNIT, 2006, p. 9).

Diante disso, verifica-se que o correto dimensionamento e execução das camadas do pavimento são essenciais para assegurar o desempenho adequado ao longo da vida útil, evitando a ocorrência precoce de defeitos no pavimento. A estrutura básica de um pavimento pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 - estrutura básica de um pavimento flexível



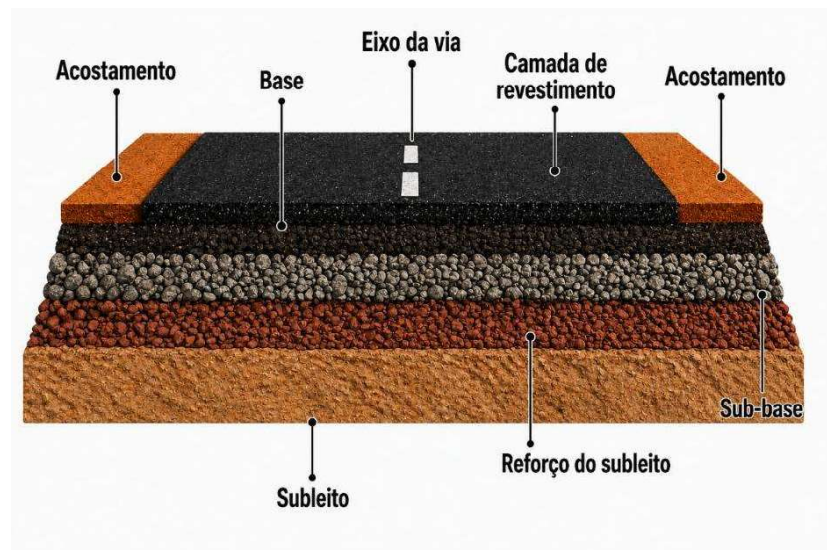
Fonte: DNIT (2006).

De acordo com Bernucci et al. (2010), os pavimentos podem ser classificados em flexíveis, rígidos e semirrígidos, diferenciando-se principalmente quanto ao comportamento estrutural e aos materiais empregados.

2.2 Pavimento flexível

O pavimento flexível sendo o objeto de estudo desse trabalho, é caracterizado por apresentar revestimento asfáltico apoiado sobre camadas granulares, distribuindo as tensões de forma gradual até o subleito. Conforme Medina (2015), nesse tipo de estrutura as deformações são mais significativas quando comparadas aos pavimentos rígidos. A composição típica de um pavimento flexível pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Corte esquemático de pavimento flexível



Fonte: Adaptado Bernucci et al. (2010).

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (figura X), por meio da NBR 7207:2022, a pavimentação asfáltica compreende um conjunto de camadas construídas sobre o subleito com a finalidade de proporcionar condições adequadas de rolamento, conforto, segurança e suporte às cargas provenientes do tráfego. Além disso, a norma estabelece a terminologia técnica aplicada à área de pavimentação, contribuindo para a padronização dos conceitos e definições utilizados em estudos, projetos e avaliações de pavimentos. Dessa forma, a utilização da NBR 7207:2022 neste trabalho auxilia na uniformização dos termos empregados na caracterização dos defeitos observados nos pavimentos analisados (ABNT, 2022).

Figura 3 - Síntese das principais informações da ABNT NBR 7207:2022

 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS	NBR 7207:2022	
PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA — TERMINOLOGIA		
Estabelece a terminologia dos termos utilizados na pavimentação asfáltica, visando uniformizar conceitos, facilitar a comunicação técnica e apoiar projetos, execução, controle, manutenção e avaliação de pavimentos.		
DADOS GERAIS  NORMA ABNT NBR 7207  EDIÇÃO 4ª edição  DATA DE PUBLICAÇÃO 31/05/2022  STATUS Válida  IDIOMA Português  ICS 93.080.20 Materiais e construções para engenharia civil	 OBJETIVO Padronizar os termos empregados na pavimentação asfáltica, garantindo clareza e precisão na comunicação técnica entre profissionais da área.	
 PRINCIPAIS CONTEÚDOS A norma apresenta definições para os termos relacionados a: • Tipos de pavimentos • Materiais asfálticos • Camadas do pavimento • Processos executivos • Manifestações patológicas (defeitos) • Conservação e manutenção • Ensaios e controles		EXEMPLOS DE TERMOS DEFINIDOS • Pavimento asfáltico: estrutura constituída por camadas executadas com materiais asfálticos, sobre a qual atua a carga do tráfego. • Revestimento asfáltico: camada destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las às camadas inferiores. • Base: camada situada imediatamente abaixo do revestimento, destinada a resistir e distribuir os esforços verticais. • Subleito: terreno de fundação do pavimento. • Defeito: irregularidade ou dano que compromete o desempenho do pavimento.
 IMPORTÂNCIA Promove a padronização da linguagem técnica, reduz ambiguidades e contribui para a qualidade e durabilidade dos pavimentos asfálticos.	 APLICAÇÃO Aplicável a profissionais e organizações envolvidos com projeto, execução, controle tecnológico, conservação e avaliação de pavimentos asfálticos.	 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207:2022 – Pavimentação asfáltica — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
 A NBR 7207:2022 é fundamental para assegurar a uniformidade dos termos técnicos e fortalecer a comunicação na área de pavimentação asfáltica.		

Fonte: Elaboração própria com base na ABNT NBR 7207:2022.

Bernucci et al. (2010) destaca que a água atua como um dos preponderantes agentes de deterioração dos pavimentos flexíveis, uma vez que implica na redução da resistência das camadas granulares, além de comprometer a aderência entre o ligante asfáltico e os agregados, estimulando assim o surgimento de irregularidades no pavimento. Sendo assim, Bernucci et al (2010, p. 119) ressalta que “a presença de água no interior do pavimento acelera os mecanismos de degradação, reduzindo a capacidade estrutural e a durabilidade da via”. Por isso, evidencia-se que o controle da umidade e a adequada drenagem são fatores determinantes para o desempenho e a vida útil dos pavimentos.

2.3 Defeitos em pavimentos flexíveis

2.3.1 Defeitos de couro de Jacaré

Os defeitos em pavimentos flexíveis podem se manifestar de formas superficiais e estruturais e assim comprometer o desempenho e a vida útil da via. O Manual de Identificação de Defeitos em Pavimentos Asfálticos do (DNIT, 2003) apresenta como principais manifestações as trincas, os afundamentos, a desagregação e os remendos. A Figura 4 apresenta exemplo de trincamento em pavimento asfáltico, denominado couro de jacaré.

Figura 4 - Trinca em malha (couro de jacaré)



Fonte: DNIT (2003).

As trincas do tipo couro de jacaré são caracterizadas por um conjunto de fissuras interligadas, sem direção preferencial, formando uma malha semelhante à pele de um jacaré. Esse tipo de defeito está geralmente associado ao processo de fadiga do revestimento asfáltico, decorrente da repetição das cargas do tráfego e da perda da capacidade estrutural das camadas do pavimento (DNIT, 2003).

2.3.2 Defeitos de afundamento em trilha de roda

Outro defeito catalogado pelo manual do Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT, 2003), chame-se afundamento em trilha de roda, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Afundamento em trilha de roda



Fonte: DNIT (2003).

O afundamento em trilha de roda baseia-se em uma deformação permanente que ocorre ao longo do caminho percorrido pelas rodas dos veículos, caracterizando-se pela origem de depressões longitudinais na superfície do pavimento. Essa categoria de defeito está relacionada, principalmente, à deformação plástica das camadas estruturais do pavimento ou do subleito, que podem ocorrer através de (DNIT, 2003):

- Repetição das cargas do tráfego, especialmente de veículos pesados;
- Compactação inadequada dos materiais durante a execução da obra;
- Baixa capacidade de suporte das camadas que compõem a estrutura do pavimento.

Em decorrência disso, esse defeito pode comprometer as condições de conforto e segurança dos usuários da via, além de favorecer o acúmulo de água nas trilhas de roda, o que aumenta o risco de aquaplanagem e acelera o processo de deterioração do pavimento (BERNUCCI et al., 2010).

2.3.3 Defeito de desagregação superficial

Dentre os defeitos catalogados, há um que provém do envelhecimento do pavimento resultando na heterogeneidade do material asfáltico, que por sua vez prejudica o conforto viário. De acordo com DNIT (2003) este defeito trata-se da desagregação superficial do revestimento asfáltico, representado na Figura 6.

Figura 6 - Desagregação superficial do revestimento asfáltico



Fonte: DNIT (2003).

Yoder e Witczak (1975) ressaltam que muitos desses defeitos estão associados a falhas de drenagem, variações térmicas e solicitações repetidas do tráfego, sendo a presença de umidade fator determinante para a perda de capacidade estrutural.

2.4 Ensaios destrutivos aplicados à avaliação de pavimentos flexíveis

A avaliação das condições estruturais dos pavimentos flexíveis pode ser realizada por meio de diferentes métodos, destacando-se os ensaios destrutivos e não destrutivos. Os ensaios destrutivos diferenciam-se pela necessidade de intervenção direta na estrutura do pavimento, implicando a retirada de material ou a execução de aberturas que comprometem, ainda que localmente, a integridade da via (Laura Motta Bernucci et al., 2010).

Esses métodos são amplamente utilizados com objetivo de obter informações detalhadas sobre as propriedades físicas e mecânicas das camadas que compõem o

pavimento, permitindo a análise da espessura, da condição dos materiais e da capacidade de suporte da estrutura. Entretanto, sua aplicação demanda maior tempo de execução, custos elevados e, em muitos casos, a interdição parcial da via (BALBO, 2007).

2.4.1 Extração de corpos de prova (sondagem rotativa)

O ensaio de extração de corpos de prova consiste na retirada de amostras cilíndricas do revestimento asfáltico por meio de equipamentos específicos (Figura 7), permitindo a análise laboratorial das propriedades do material, como densidade, teor de ligante e grau de compactação. Esse ensaio é considerado altamente preciso, sendo amplamente utilizado para controle tecnológico e avaliação de pavimentos em serviço (BERNUCCI et al., 2010).

Figura 7 - Extração de corpo e prova em pavimento asfáltico



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2010).

Apesar de sua confiabilidade, a técnica apresenta limitações relacionadas à sua natureza invasiva, uma vez que provoca danos localizados no pavimento, exigindo posterior recomposição da área analisada.

2.4.2. Abertura de trincheiras e poços de inspeção

Outro método destrutivo consiste na abertura de trincheiras ou poços de inspeção ao longo do pavimento, permitindo a visualização direta das camadas estruturais (Figura 8). Esse procedimento possibilita a avaliação da espessura das camadas, identificação de falhas construtivas e verificação da presença de umidade ou materiais inadequados (BALBO, 2007).

Figura 8 - Abertura de trincheira para inspeção de pavimento



Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

Ademais, esse tipo de ensaio também apresenta elevado grau de interferência na via, sendo geralmente aplicado em estudos mais detalhados ou em fases de diagnóstico avançado.

2.4.3. Ensaio de placa de carga

O ensaio de placa de carga (Figura 9) é muito utilizado para determinar a capacidade de suporte do subleito ou de camadas do pavimento, isso acontece por meio da aplicação de cargas controladas sobre uma placa circular apoiada na

superfície analisada. A partir das deformações medidas, é possível avaliar o comportamento mecânico do solo ou da estrutura do pavimento (DNIT, 2006).

Figura 9 - Ensaio de placa de carga em pavimento



Fonte: Elaborado por autora (2026).

Apesar deste método fornecer resultados importantes para o dimensionamento e reabilitação de pavimentos, o mesmo requer equipamentos específicos e tempo considerável para execução.

2.4.4. Limitações dos ensaios destrutivos

De modo geral, os ensaios destrutivos apresentam como principais limitações:

- Intervenção direta na estrutura do pavimento;
- Necessidade de recomposição da área analisada;
- Maior custo operacional;
- Tempo elevado de execução;
- Interrupção parcial do tráfego.

Dessa forma, embora forneçam informações detalhadas e precisas, sua

aplicação em larga escala torna-se limitada, especialmente em áreas urbanas com elevado fluxo de veículos.

2.4.5. Relação com os ensaios não destrutivos

Ao compreender as limitações de ensaios convencionais, observa-se uma necessidade e a crescente busca na utilização de métodos não destrutivos, um destes é a termografia infravermelha, a qual permite avaliação das condições do pavimento de forma rápida, sem causar danos à estrutura e com menor interferência no tráfego. Esses métodos em sua maioria atuam de forma complementar aos ensaios destrutivos, sendo frequentemente utilizados em etapas complementares de diagnóstico (Xavier Maldague, 2001).

2.5. Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha constitui um método de ensaio não destrutivo amplamente utilizado na Engenharia Civil, baseado na detecção da radiação térmica emitida pelos corpos em função de sua temperatura. É importante salientar, que todo material cuja temperatura esteja acima do zero absoluto emite energia na forma de radiação infravermelha, sendo essa emissão diretamente relacionada às propriedades físicas do material e às condições ambientais em que se encontra (Xavier Maldague, 2001; Gerald C. Holst, 2000).

Historicamente, a utilização da radiação infravermelha teve início no século XIX, a partir das descobertas do astrônomo William Herschel, que identificou a existência de uma forma de radiação além do espectro visível. Contudo, o desenvolvimento tecnológico da termografia ocorreu de forma mais significativa a partir da metade do século XX, impulsionado por aplicações militares e industriais, sendo posteriormente difundido para diversas áreas da engenharia (HOLST, 2000).

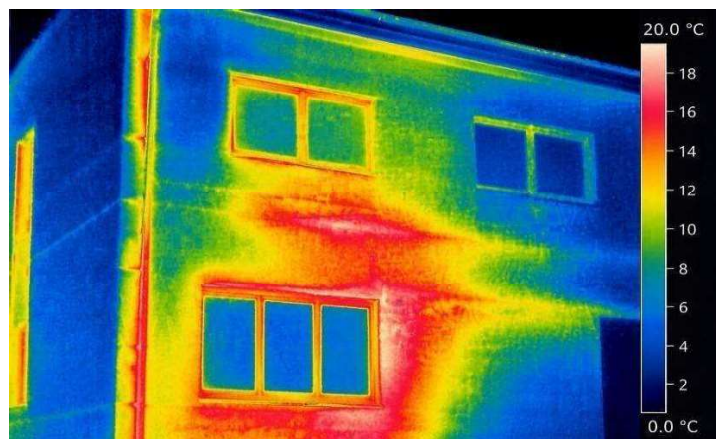
A termografia infravermelha baseia-se na detecção da radiação eletromagnética emitida naturalmente pelos corpos em função de sua temperatura. Todo objeto com temperatura acima do zero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) emite energia na forma de radiação térmica, cuja intensidade depende da temperatura e das propriedades físicas do material. Essa radiação encontra-se predominantemente na faixa do infravermelho do espectro eletromagnético e pode ser captada por sensores

específicos, permitindo a determinação da distribuição térmica superficial dos objetos sem a necessidade de contato direto (HOLST, 2000; MALDAGUE, 2001).

O princípio de funcionamento da termografia consiste na captação dessa radiação por meio de um equipamento denominado câmera termográfica, que converte os sinais térmicos em imagens visuais, chamadas de termogramas. Essas imagens representam a distribuição de temperatura na superfície analisada, permitindo a identificação de variações térmicas associadas a possíveis anomalias (MALDAGUE, 2001).

A distribuição de temperatura captada pela câmera termográfica gera variações de faixa cores. Estas variações são determinadas de acordo com as cores quentes e cores frias, como demonstrado na figura 10.

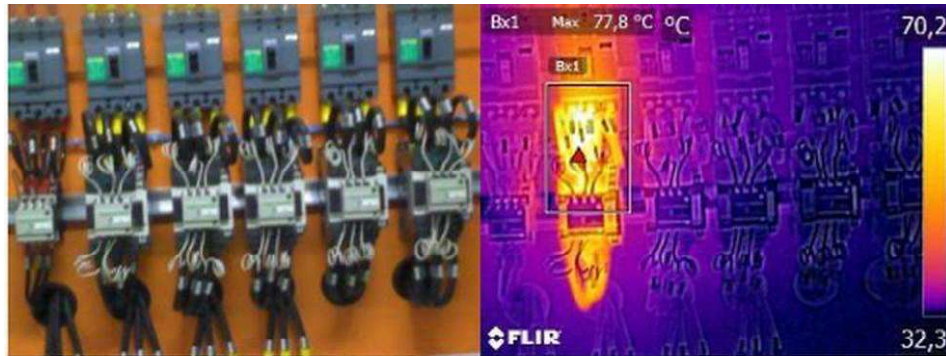
Figura 10 - Exemplo de imagem termográfica (termograma)



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Como exemplo prático da aplicação da termografia no contexto industrial, a Indústria 4.0 Portal (2025) apresenta a aplicação da termografia infravermelha na inspeção de equipamentos elétricos, permitindo a identificação de pontos de aquecimento anormal sem a necessidade de contato físico com os componentes. Como ilustrado na Figura 11, observa-se o aquecimento localizado em um dos disjuntores, evidenciando uma possível anomalia operacional. Essa técnica possibilita a realização de manutenções preventivas de forma mais segura e eficiente, contribuindo para a continuidade e confiabilidade dos processos produtivos.

Figura 11 - Aplicação da termografia na inspeção de equipamentos elétricos

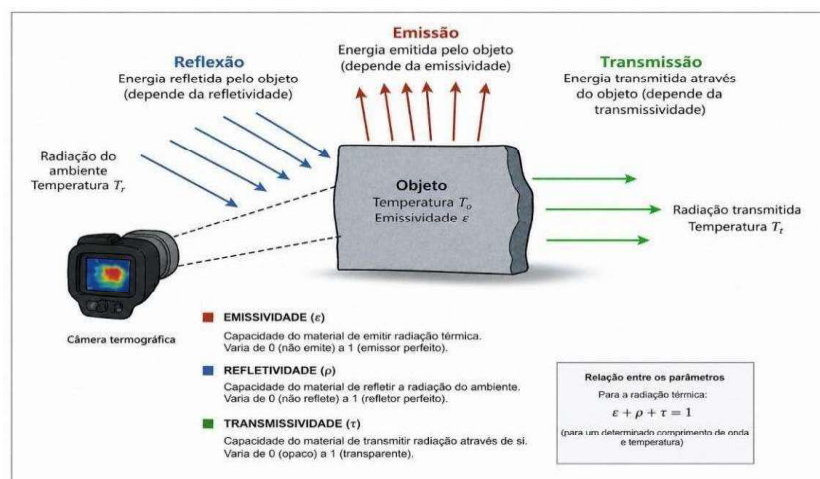


Fonte: Adaptado de Indústria 4.0 Portal (2025).

2.5.1 Emissividade, refletividade e transmissividade

A intensidade da radiação detectada é influenciada por diversos fatores, destacando-se a emissividade do material, a refletividade, a transmissividade e as condições ambientais, como incidência solar, umidade e temperatura do ar (Figura 12). Dessa forma, a correta interpretação dos termogramas requer o conhecimento desses parâmetros, uma vez que diferentes materiais apresentam comportamentos térmicos distintos (HOLST, 2000).

Figura 12 - Esquema dos parâmetros térmicos (emissividade, refletividade e transmissividade)



Fonte: Elaborado pela autora com base em Gerald C. Holst (2000).

No presente estudo, os parâmetros térmicos de emissividade, refletividade e transmissividade foram considerados durante a interpretação qualitativa das imagens termográficas obtidas nos pavimentos analisados. A emissividade corresponde à capacidade que um material possui de emitir radiação infravermelha em função de

sua temperatura (HOLST, 2000; MALDAGUE, 2001). Segundo a FLIR Systems (2024), superfícies asfálticas apresentam emissividade elevada, geralmente situada entre 0,93 e 0,98, sendo amplamente adotado o valor de 0,95 para medições termográficas em pavimentos. Dessa forma, o revestimento asfáltico tende a emitir radiação térmica de maneira eficiente, favorecendo a obtenção de temperaturas mais próximas das condições reais da superfície analisada.

A refletividade refere-se à parcela da radiação proveniente do ambiente que é refletida pela superfície analisada (HOLST, 2000). Embora o pavimento asfáltico possua baixa refletividade quando comparado a materiais metálicos, fatores como incidência solar intensa, presença de poças d'água e superfícies úmidas podem aumentar a reflexão de energia térmica, influenciando parcialmente os valores registrados pela câmera termográfica. Por essa razão, as inspeções foram realizadas buscando minimizar interferências ambientais que pudessem comprometer a interpretação dos resultados (HOLST, 2000; MALDAGUE, 2001).

Já a transmissividade representa a capacidade de um meio permitir a passagem da radiação infravermelha (HOLST, 2000). Considerando que as medições foram realizadas a curta distância da superfície do pavimento, entre aproximadamente 1,5 m e 2,0 m, e sob condições atmosféricas normais, os efeitos da transmissividade do ar foram considerados pouco significativos para a análise. Dessa forma, a maior parte da radiação detectada pela câmera foi proveniente diretamente da superfície do pavimento (MALDAGUE, 2001).

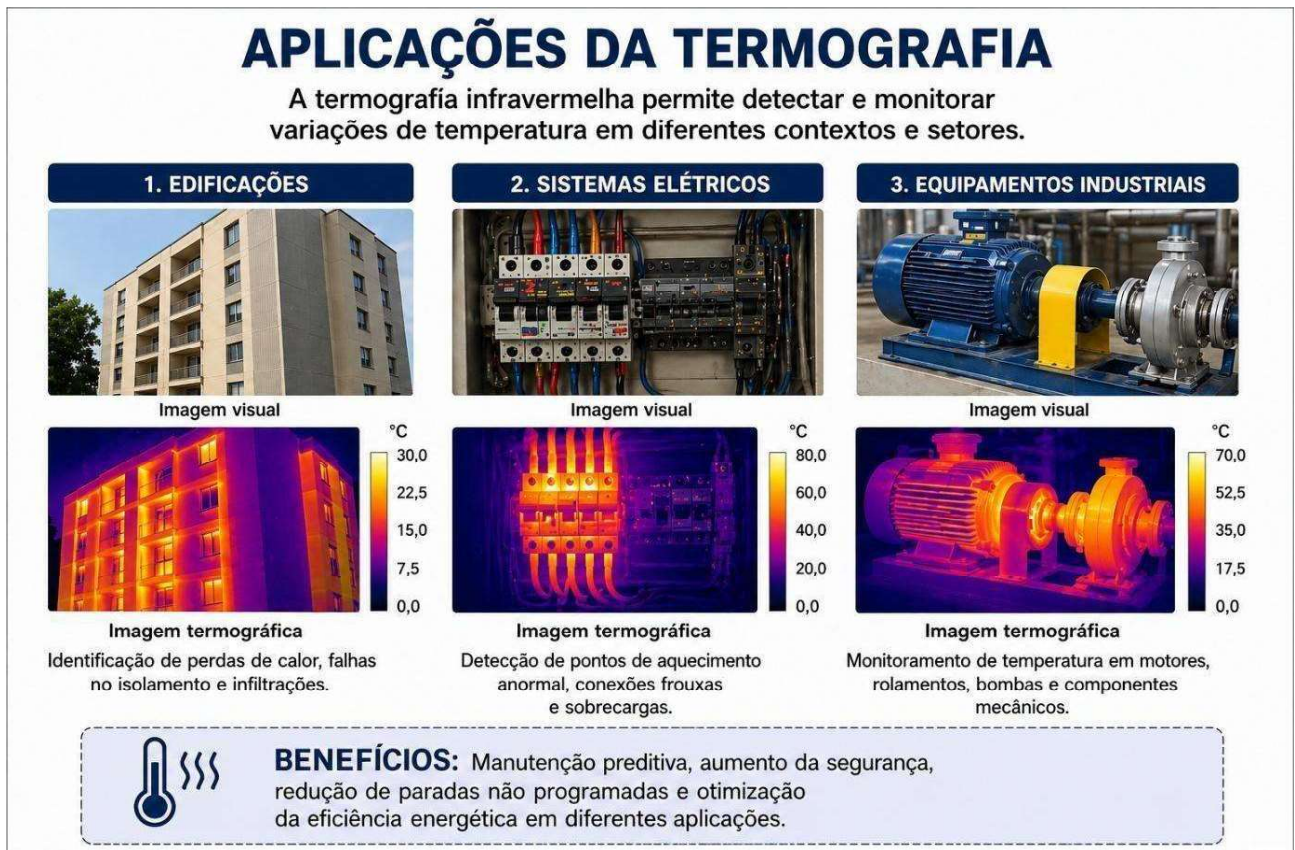
Para as medições realizadas neste estudo, foi adotado o valor de emissividade de 0,95, compatível com superfícies asfálticas e recomendado na literatura técnica para inspeções termográficas em pavimentos. A adoção desse parâmetro contribui para aumentar a confiabilidade das temperaturas registradas pela câmera FLIR TG165-X (FLIR SYSTEMS, 2024; MALDAGUE, 2001).

A consideração desses três parâmetros permitiu uma interpretação mais confiável dos termogramas obtidos, possibilitando associar as variações térmicas observadas à presença de umidade, fissuras, descontinuidades estruturais e diferentes condições de conservação dos pavimentos analisados. Nesse contexto, a análise termográfica mostrou-se adequada como ferramenta complementar para a identificação de áreas potencialmente comprometidas no pavimento urbano (MALDAGUE, 2001; BERNUCCI et al., 2010).

2.5.2 Aplicações da termografia

No que se refere à construção civil, a termografia destaca-se na inspeção de edificações para identificação de infiltrações, falhas de isolamento térmico, descolamento de revestimentos e defeitos em estruturas de concreto armado (Figura 13). No setor elétrico, é empregada na detecção de pontos de aquecimento em equipamentos e redes de distribuição, prevenindo falhas e interrupções no sistema. Na área mecânica e industrial, auxilia no monitoramento de máquinas e equipamentos, permitindo a identificação de desgaste e superaquecimento. Além disso, sua aplicação estende-se à área ambiental, à medicina e à segurança, evidenciando sua versatilidade (MALDAGUE, 2001; HOLST, 2000).

Figura 13 - Aplicações da termografia (edificações, sistemas elétricos e equipamentos)



Fonte: Adaptado de Maldague (2001).

Deste modo, pode-se dizer que um dos principais benefícios quando se trata de ensaios não destrutivos, a termografia destaca-se por permitir a avaliação das condições internas e superficiais dos materiais sem a necessidade de intervenções

físicas. Essa característica possibilita a identificação de descontinuidades, vazios, presença de umidade e falhas estruturais, que alteram o fluxo de calor e geram padrões térmicos diferenciados na superfície (MALDAGUE, 2001).

A figura 14 apresenta o funcionamento da termografia infravermelha em ensaios não destrutivos, em que o material é inicialmente submetido a um estímulo térmico externo (excitação), promovendo a propagação do calor em seu interior (resposta térmica); nesse processo, descontinuidades como trincas, delaminações ou inclusões alteram o fluxo térmico, sendo essas variações registradas por uma câmera termográfica (aquisição) como diferenças de temperatura na superfície; por fim, a análise dessas anomalias térmicas (interpretação) permite identificar defeitos internos e superficiais, evidenciando a eficiência da técnica como método não invasivo, rápido e aplicável a diversos materiais (MALDAGUE, 2001).

Figura 14 - Aplicação da termografia em ensaios não destrutivos



Fonte: Adaptado Maldague (2001).

Embora amplamente aplicada em estruturas de concreto, a técnica apresenta grande potencial para utilização em pavimentos flexíveis, uma vez que defeitos como

trincas, desagregações, vazios e infiltrações influenciam diretamente o comportamento térmico do revestimento asfáltico. Nessas condições, regiões deterioradas tendem a apresentar variações de temperatura em relação às áreas íntegras, permitindo sua identificação por meio da análise termográfica (Laura Motta Bernucci et al., 2010).

De acordo com Cortizo (2007), a termografia infravermelha permite identificar anomalias construtivas por meio da análise das diferenças de temperatura observadas na superfície dos materiais. O autor destaca que a amplitude térmica registrada nos termogramas pode estar relacionada à gravidade das manifestações patológicas presentes, uma vez que defeitos como umidade, vazios, delaminações e descontinuidades estruturais alteram os mecanismos de transferência de calor. Dessa forma, áreas com maiores contrastes térmicos tendem a indicar condições mais críticas de deterioração, tornando a termografia uma ferramenta útil para auxiliar na identificação e avaliação de anomalias em estruturas e pavimentos.

A qualificação e certificação de profissionais que realizam ensaios não destrutivos são regulamentadas pela ABNT NBR ISO 9712, que estabelece os requisitos mínimos de competência, treinamento, experiência e avaliação para a execução dessas atividades. A norma busca assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos por diferentes métodos de inspeção, incluindo a termografia infravermelha, contribuindo para a padronização dos procedimentos e para a qualidade das análises realizadas. A Figura 15 apresenta uma síntese dos principais aspectos abordados pela ABNT NBR ISO 9712, destacando seus objetivos, requisitos de qualificação e áreas de aplicação (ABNT, 2022).

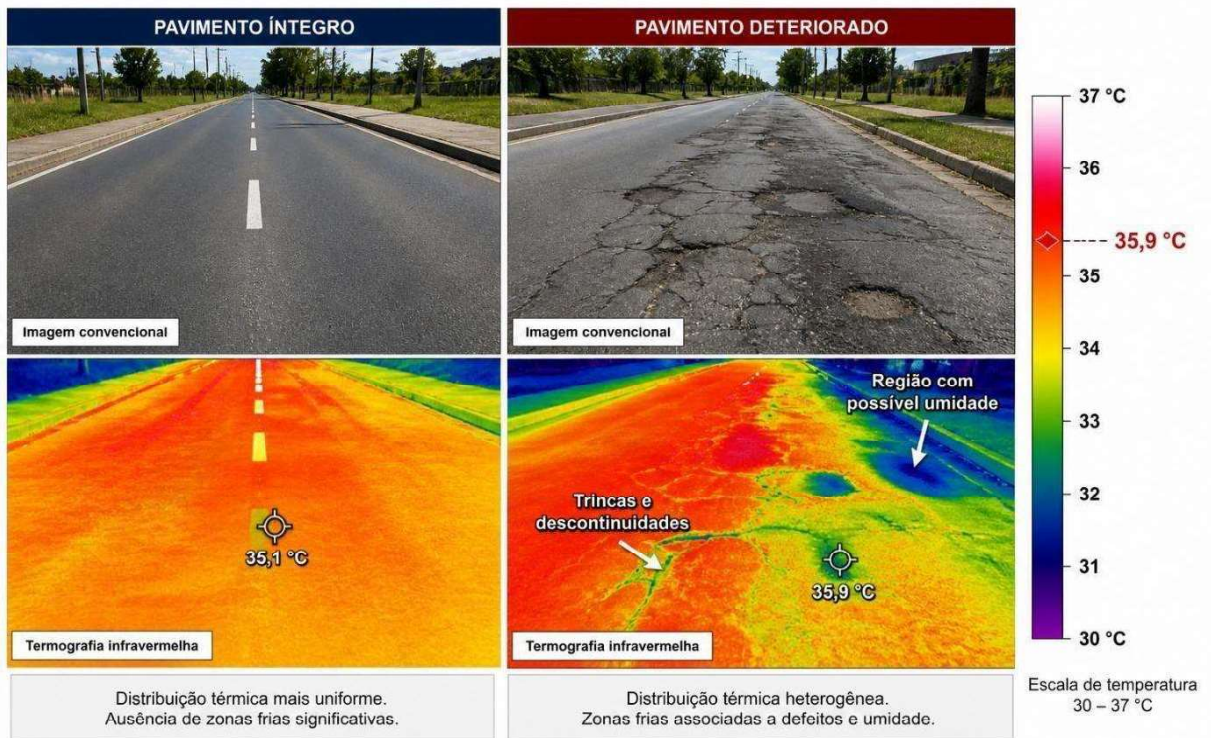
Figura 15 - Síntese dos principais requisitos da ABNT NBR ISO 9712

 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS	NBR ISO 9712:2022	
ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS — QUALIFICAÇÃO DE PESSOAL Especifica os requisitos para a qualificação e certificação de pessoal que realiza ensaios não destrutivos (END), garantindo competência técnica, confiabilidade dos resultados e segurança nas atividades.		
DADOS GERAIS  NORMA ABNT NBR ISO 9712  EDIÇÃO 1ª edição  DATA DE PUBLICAÇÃO 24/03/2022  STATUS Válida  IDIOMA Português  ICS 19.100 Ensaio não destrutivo	 OBJETIVO Estabelecer os requisitos para qualificação e certificação de pessoas que executam ensaios não destrutivos, assegurando que possuam conhecimento, habilidades e competências necessárias para realizar atividades de END de forma confiável e segura.	
 PRINCIPAIS CONTEÚDOS A norma define requisitos para a qualificação e certificação, incluindo: • Níveis de qualificação (1, 2 e 3) • Requisitos de educação, treinamento e experiência • Competências e responsabilidades de cada nível • Exames de qualificação (geral, específico e prático) • Desempenho em atividades e critérios de aprovação • Recertificação e manutenção da certificação • Código de ética e condições de certificação		EXEMPLOS DE APLICAÇÃO • Garante que os profissionais que realizam END (como termografia infravermelha, ultrassom, líquido penetrante, partículas magnéticas, entre outros) sejam tecnicamente competentes. • Aplicável em setores como construção civil, petróleo e gás, aeroespacial, indústria, manutenção e inspeção de equipamentos. • Contribui para a confiabilidade das inspeções, segurança operacional e conformidade com requisitos legais e contratuais. • Pode ser utilizada por organizações para certificar ou reconhecer pessoal de END.
 IMPORTÂNCIA Promove a competência e a padronização de profissionais de END, aumentando a qualidade dos ensaios, a segurança das estruturas e a confiança nos resultados.	 APLICAÇÃO Utilizada por organismos de certificação, empresas e contratantes para qualificação de pessoal que executa ensaios não destrutivos em diferentes métodos e setores.	 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9712:2022 – Ensaios não destrutivos – Qualificação de pessoal. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
 A NBR ISO 9712:2022 é a versão brasileira da ISO 9712 e estabelece requisitos reconhecidos internacionalmente para a qualificação de pessoal em ensaios não destrutivos.		

Fonte: Elaboração própria com base em Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022).

A Figura 16 destaca a heterogeneidade de cores e suas variações de acordo com a presença dos defeitos nos pavimentos, apresentando, através disso, a presença ou não de umidade no local captado pelo termograma.

Figura 16 - Comparação entre pavimento íntegro e pavimento deteriorado em termografia



Fonte: Adaptado Maldague (2001).

Assim, a termografia infravermelha configura-se como uma ferramenta eficiente para inspeções rápidas e em larga escala, contribuindo para a detecção precoce de defeitos e para o planejamento de intervenções de manutenção de forma mais assertiva, econômica e segura (MALDAGUE, 2001; BERNUCCI et al., 2010).

No contexto dos pavimentos flexíveis urbanos, a análise das amplitudes térmicas pode contribuir para a identificação de regiões com possíveis falhas estruturais, acúmulo de umidade ou degradação dos materiais constituintes. Assim, a interpretação dos termogramas deve considerar não apenas a distribuição espacial das temperaturas, mas também a magnitude das diferenças térmicas observadas entre áreas aparentemente íntegras e áreas com indícios de deterioração (CORTIZO, 2007).

2.6. Limitações da termografia infravermelha

Apesar de suas vantagens, a termografia infravermelha apresenta limitações que devem ser consideradas durante a interpretação dos resultados. Fatores ambientais como radiação solar, velocidade do vento, precipitação, umidade relativa do ar e sombreamento podem influenciar significativamente as temperaturas registradas. Além disso, as características superficiais dos materiais, especialmente a emissividade e a refletividade, podem interferir na precisão das medições. Dessa forma, a técnica não deve ser utilizada de forma isolada, sendo recomendada sua aplicação em conjunto com inspeções visuais e outros métodos de avaliação para aumentar a confiabilidade do diagnóstico (HOLST, 2000; CORTIZO, 2007; MALDAGUE, 2001).

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, de natureza aplicada e abordagem qualitativa, desenvolvido com o objetivo de avaliar a aplicabilidade da termografia infravermelha como ferramenta auxiliar na identificação de defeitos em pavimentos flexíveis urbanos. O estudo foi realizado em dois trechos de vias localizados no município de Macapá-AP, contemplando um pavimento recentemente recapeado e outro com manifestações patológicas visíveis.

A metodologia foi estruturada em etapas sequenciais, compreendendo desde o levantamento bibliográfico até a análise comparativa dos resultados obtidos por meio da inspeção visual e da termografia infravermelha.

3.1. Levantamento bibliográfico

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre pavimentos flexíveis, principais manifestações de defeitos, ensaios destrutivos e não destrutivos e fundamentos da termografia infravermelha. A pesquisa foi desenvolvida a partir de livros, artigos científicos, normas técnicas do DNIT e publicações especializadas na área de pavimentação e ensaios não destrutivos.

Essa etapa forneceu o embasamento teórico necessário para a compreensão dos mecanismos de deterioração dos pavimentos e para a interpretação dos resultados obtidos durante as inspeções de campo.

3.2. Definição da área de estudo

Após a revisão bibliográfica, foram selecionados dois trechos de vias urbanas localizados nas proximidades do Monumento Marco Zero do Equador, em Macapá-AP. A escolha dos locais teve como objetivo possibilitar a comparação entre pavimentos com diferentes condições de conservação. Um dos trechos apresentava revestimento recentemente recapeado, enquanto o outro possuía defeitos visíveis, como trincas, panelas e irregularidades superficiais.

3.3. Inspeção visual do pavimento

A inspeção visual consistiu na observação direta das condições superficiais dos pavimentos analisados. Nessa etapa foram identificadas e registradas as principais

manifestações de defeitos presentes nos trechos estudados. A identificação dos defeitos foi realizada com base nos critérios técnicos estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), permitindo a classificação das anomalias observadas.

3.4. Registro fotográfico convencional

Paralelamente à inspeção visual, foi realizado o registro fotográfico das áreas analisadas utilizando um aparelho celular iPhone 11 Pro Max. As imagens obtidas tiveram a finalidade de documentar as condições superficiais do pavimento e servir como base para posterior comparação com os termogramas gerados pela câmera infravermelha.

Para garantir a rastreabilidade dos dados coletados, utilizou-se o aplicativo Timestamp Camera Basic, que registra automaticamente informações como data, horário e localização geográfica.

3.5. Aquisição das imagens termográficas

As imagens termográficas foram obtidas utilizando uma câmera infravermelha modelo FLIR TG165-X.

A coleta ocorreu no dia 20 de fevereiro de 2026, às 10h00, sob condições climáticas típicas da região. Durante as medições, a câmera foi posicionada entre aproximadamente 1,5 m e 2,0 m da superfície do pavimento, buscando minimizar interferências externas e garantir maior uniformidade na aquisição dos dados. Os pontos analisados foram selecionados com base nas irregularidades previamente identificadas durante a inspeção visual.

3.6. Análise comparativa das imagens

Após a coleta dos dados, realizou-se a comparação entre os registros fotográficos convencionais e as imagens termográficas obtidas em campo.

A análise teve como objetivo verificar a existência de correlação entre as manifestações de defeitos visíveis e as variações térmicas observadas nos termogramas. Foram avaliadas diferenças de temperatura, padrões de distribuição térmica e heterogeneidade das cores registradas pela câmera infravermelha.

3.7. Interpretação dos resultados

A interpretação dos resultados foi conduzida de forma qualitativa, considerando os princípios da termografia infravermelha e os critérios técnicos descritos na literatura especializada. As variações térmicas identificadas foram associadas a possíveis fatores como presença de umidade, fissuras, vazios internos, perda de compactação e heterogeneidade dos materiais constituintes do pavimento. Dessa forma, buscou-se verificar o potencial da termografia infravermelha como ferramenta complementar para a identificação de áreas suscetíveis à deterioração.

3.8. Monitoramento da evolução dos defeitos

Com o objetivo de avaliar a evolução das manifestações patológicas identificadas inicialmente, foi realizada uma nova inspeção visual após um período de 84 dias. Essa etapa permitiu verificar possíveis alterações nas dimensões e condições dos defeitos observados durante a primeira pesquisa de campo, contribuindo para a análise do comportamento evolutivo do pavimento ao longo do tempo.

A metodologia foi estruturada em etapas sequenciais e interrelacionadas, contemplando desde a definição da área de estudo até análise dos resultados obtidos.

Para melhor compreensão do processo metodológico empregado, apresenta-se o fluxograma ilustrativo na Figura 17 e os parâmetros adotados na Tabela 1.

Figura 17 - Fluxograma da metodologia adotada na pesquisa



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Tabela 1 - Parâmetros adotados para a coleta e análise termográfica do pavimento

Parâmetro	Descrição
Equipamento	FLIR TG165
Data da Coleta	20/02/2026
Horário	10h00
Distância da Medição	1,5 m a 2,0 m
Tipo de Análise	Qualitativa
Técnica Complementar	Termografia infravermelha

Fonte: Autoral (2026)

3.9. Materiais e equipamentos

As medições termográficas foram realizadas com o equipamento FLIR TG165 (Figura 18), cujas especificações técnicas estão apresentadas na Tabela 2 (FLIR SYSTEMS, 2026).

Figura 18 - Câmera termográfica TG165-X

Fonte: Autoral (2026)

Tabela 2 - Especificações técnicas da câmera termográfica FLIR TG165-x

Parâmetro	Especificação
Modelo	FLIR TG165
Tipo de Equipamento	Câmera termográfica portátil
Faixa de medição	-25 °C a 380 °C
Precisão	±1,5 °C ou ±1,5%
Resolução térmica	80 × 60 pixels
Sensibilidade térmica	< 0,15 °C
Campo de visão (FOV)	50° × 38°
Emissividade ajustável	Sim (0,1 a 1,0)
Tipo de análise	Qualitativa
Armazenamento de imagens	Sim
Aplicações principais	Inspeções elétricas, mecânicas e prediais

Fonte: Adaptado de FLIR Systems (2026).

Para a realização das inspeções termográficas nos trechos de pavimento analisados, foram considerados parâmetros operacionais do equipamento capazes de influenciar diretamente na qualidade das medições obtidas. Dentre esses parâmetros, destaca-se o ajuste da emissividade, adotado de forma compatível com o comportamento térmico das superfícies asfálticas.

O revestimento asfáltico, por apresentar coloração escura e elevada capacidade de absorção de radiação solar, tende a emitir energia térmica de maneira relativamente uniforme quando comparado a outros materiais. No entanto, variações locais nas propriedades do pavimento como desgaste, presença de umidade ou alterações na composição do material, podem resultar em diferenças significativas na emissão térmica, as quais são captadas pelo equipamento termográfico.

As coletas foram realizadas em condições de proximidade em relação à superfície analisada, estratégia que contribui para a redução de interferências externas no processo de medição. Nesse contexto, a influência da atmosfera sobre a radiação infravermelha foi considerada pouco significativa, não sendo necessária a aplicação de correções específicas para transmitância.

Adicionalmente, o intervalo espectral de operação da câmera utilizada, situado na faixa do infravermelho térmico, favorece a detecção de variações de temperatura em superfícies sólidas expostas, como é o caso dos pavimentos urbanos. Dessa forma, foi possível identificar padrões térmicos associados a possíveis anomalias

estruturais, contribuindo para a análise qualitativa das condições do pavimento.

Além da câmera termográfica, foi utilizado um dispositivo móvel para o registro fotográfico das condições superficiais do pavimento nos pontos inspecionados. As imagens convencionais foram capturadas por meio de um aparelho celular iPhone 11 Pro Max, possibilitando a documentação visual das manifestações dos defeitos observadas em campo.

Para complementar o registro das informações, utilizou-se o aplicativo Timestamp Camera Basic, o qual permite a inserção automática de dados como data, horário e coordenadas geográficas diretamente nas imagens (Figura 19). Essa funcionalidade contribuiu para a organização e rastreabilidade dos pontos analisados, facilitando a correlação entre os registros fotográficos e as imagens termográficas obtidas.

O uso conjunto dessas ferramentas possibilitou uma análise comparativa entre a aparência superficial do pavimento e seu comportamento térmico, auxiliando na identificação de áreas com possíveis anomalias não perceptíveis apenas por inspeção visual.

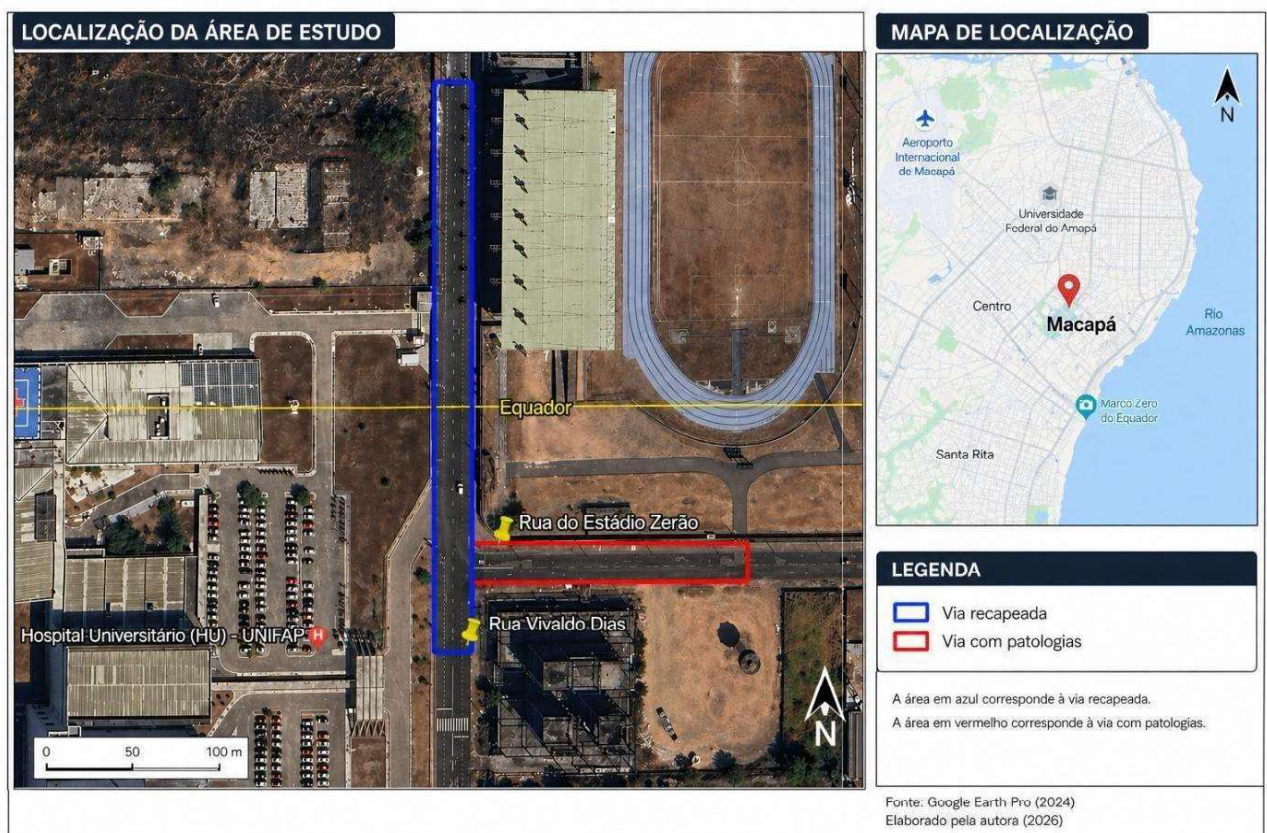
Figura 19 - Exemplo de registro fotográfico com identificação de data, hora e localização



3.10. Área de Estudo

A área de estudo compreende dois trechos de vias localizados em uma mesma região nas proximidades ao Monumento Marco Zero do Equador, sendo um com pavimento recentemente recapeado e outro com manifestações de irregularidades evidentes, posicionados de forma adjacente, permitindo análise comparativa direta das condições do pavimento. Conforme visto na Figura 20.

Figura 20 - Localização da área de estudo e identificação dos trechos de pavimento analisados, em Macapá – AP.

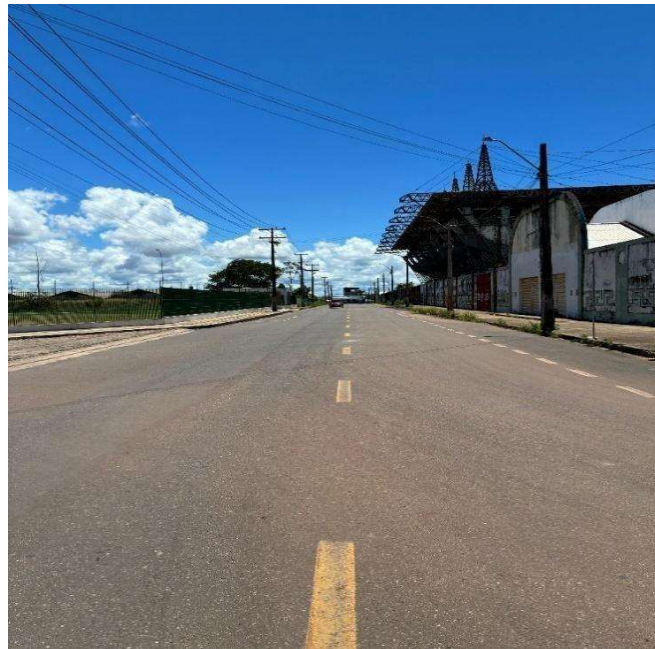


Fonte: Adaptado de Google Earth (2026).

Após a delimitação da área de estudo, procedeu-se ao registro fotográfico dos trechos analisados, com o objetivo de documentar as condições superficiais dos pavimentos. As imagens obtidas evidenciam, de forma comparativa, dois cenários distintos: um segmento com revestimento asfáltico recentemente recapeado, apresentando superfície mais uniforme e com melhores condições de trafegabilidade, e outro trecho com manifestações de defeitos visíveis, como trincas, remendos e irregularidades superficiais.

Esses registros visuais são fundamentais para a análise qualitativa das condições do pavimento, permitindo a correlação entre os aspectos observados em campo e os dados obtidos por meio da termografia infravermelha. Dessa forma, as Figuras 21 e 22 apresentam, respectivamente, o trecho em melhor estado de conservação e o trecho com indícios de degradação, servindo como base para a análise comparativa desenvolvida neste estudo.

Figura 21 - Trecho com pavimento recentemente recapeado



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 22 - Trecho com manifestações de defeitos no pavimento



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

A partir disso, o registro e análise das imagens termográficas concentram-se na identificação de variações de temperatura na superfície do pavimento, considerando que discrepâncias térmicas podem estar associadas a descontinuidades estruturais (MALDAGUE, 2001).

Logo, dados obtidos foram tratados e interpretados com base em uma abordagem qualitativa, fundamentados em critérios técnicos descritos na literatura especializada e em normas do DNIT, possibilitando a classificação de defeitos e a identificação de suas possíveis causas (DNIT, 2006).

3.11. Caracterização das áreas de estudo

A área de estudo desta pesquisa localiza-se na cidade de Macapá, capital do estado do Amapá. Os trechos analisados compreendem as vias Rua do Estádio Zerão e Rua Vivaldo Dias, ambas caracterizadas como vias urbanas com revestimento em pavimento flexível. Essas vias situam-se em uma região de significativa circulação de veículos e atividades urbanas, nas proximidades do Hospital Universitário da UNIFAP (HU-UNIFAP) e do Parque do Meio do Mundo, além de estarem próximas à Linha do Equador, elemento geográfico marcante da cidade.

No trecho da Rua do Estádio Zerão, verificou-se a presença de defeitos no pavimento, enquanto na Rua Vivaldo Dias observou-se um segmento recentemente recapeado, com melhores condições superficiais e maior uniformidade estrutural. A área apresenta relevância urbana devido à presença de equipamentos públicos, espaços de lazer e estabelecimentos comerciais, o que contribui para o fluxo constante de veículos leves e de serviço.

Para a análise comparativa, foram definidos dois trechos distintos. O primeiro corresponde a um segmento com defeitos visíveis, como trincamentos e desgaste superficial do revestimento asfáltico, comuns em vias urbanas submetidas à ação combinada do tráfego, das condições climáticas e do envelhecimento dos materiais.

O segundo trecho refere-se a uma área recentemente recapeada, com melhores condições superficiais e ausência aparente de defeitos. Esse segmento foi adotado como referência para comparação térmica, permitindo avaliar diferenças de comportamento entre pavimentos degradados e aqueles em bom estado estrutural.

A seleção desses trechos possibilitou estabelecer uma base comparativa adequada para a aplicação da termografia infravermelha, considerando que ambos se

encontram próximos e, portanto, sujeitos a condições climáticas semelhantes e níveis equivalentes de solicitação de tráfego.

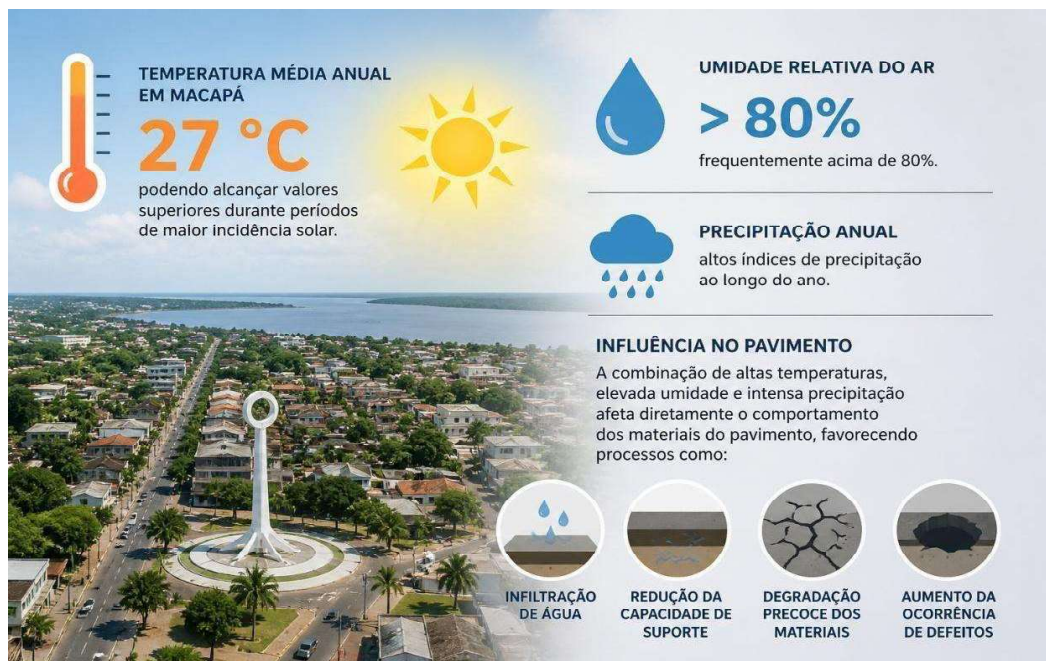
Assim, torna-se possível identificar variações de temperatura associadas à presença de defeitos ou à possível concentração de umidade nas camadas do pavimento.

3.12. Condições ambientais da área de estudo

É característico da região analisada possuir o clima equatorial úmido. Esse tipo climático apresenta temperaturas elevadas ao longo de todo o ano, com pequena variação térmica anual, além de altos índices de umidade relativa do ar e significativa precipitação pluviométrica (Instituto Nacional de Meteorologia, 2023).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (2023), a temperatura média anual na cidade de Macapá situa-se em torno de 27 °C (Figura 23), podendo alcançar valores superiores durante períodos de maior incidência solar. A elevada umidade relativa do ar, frequentemente acima de 80%, e os altos índices de precipitação anual são fatores que influenciam diretamente no comportamento dos materiais que compõem o pavimento.

Figura 23 - Condições climáticas médias e sua influência no pavimento



Fonte: Adaptado de Instituto Nacional de Metrologia (2023)

Essas condições ambientais podem contribuir para o surgimento e agravamento de defeitos em pavimentos asfálticos, uma vez que a presença de umidade nas camadas estruturais pode reduzir a capacidade de suporte dos materiais e favorecer processos de degradação do revestimento asfáltico (BERNUCCI et al., 2010).

Além disso, a incidência solar intensa típica de regiões próximas à Linha do Equador exerce influência direta na temperatura superficial do pavimento, tornando o ambiente propício para a aplicação da termografia infravermelha como técnica de inspeção não destrutiva. As variações de temperatura registradas nas imagens térmicas podem indicar diferenças nas propriedades físicas do pavimento, presença de umidade ou áreas com possíveis anomalias estruturais (MALDAGUE, 2001).

Dessa forma, a consideração das condições climáticas locais é fundamental para a correta interpretação das imagens termográficas obtidas durante a realização das inspeções de campo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados das inspeções realizadas em campo, juntamente com a interpretação das imagens térmicas obtidas nos trechos de pavimento analisados. O estudo tem como objetivo verificar a relação entre as variações de temperatura identificadas por meio da termografia infravermelha e a ocorrência de manifestações patológicas em pavimentos flexíveis.

Os dados foram organizados conforme os trechos avaliados, possibilitando a comparação entre áreas com defeitos visíveis e segmentos recentemente recapeados, a fim de analisar o potencial da termografia como ferramenta de diagnóstico complementar.

A avaliação das condições estruturais e funcionais dos pavimentos asfálticos é essencial para garantir a durabilidade da infraestrutura viária e a segurança dos usuários. A identificação precoce de defeitos permite a adoção de medidas de manutenção preventiva, reduzindo custos e prolongando a vida útil do pavimento (BERNUCCI et al., 2010).

Entre as principais manifestações de defeitos observados destacam-se trincamentos, afundamentos em trilha de roda, desagregação superficial e formação de placas. Tais ocorrências estão associadas à repetição de cargas do tráfego, falhas construtivas, envelhecimento do ligante asfáltico e à presença de umidade nas camadas estruturais (DNIT, 2003).

A umidade no interior do pavimento é um dos fatores mais relevantes para o surgimento e agravamento desses defeitos, uma vez que reduz a capacidade de suporte dos materiais e acelera os processos de degradação (BERNUCCI et al., 2010). Nesse contexto, técnicas de inspeção não destrutivas têm sido amplamente empregadas como suporte à avaliação das condições da via.

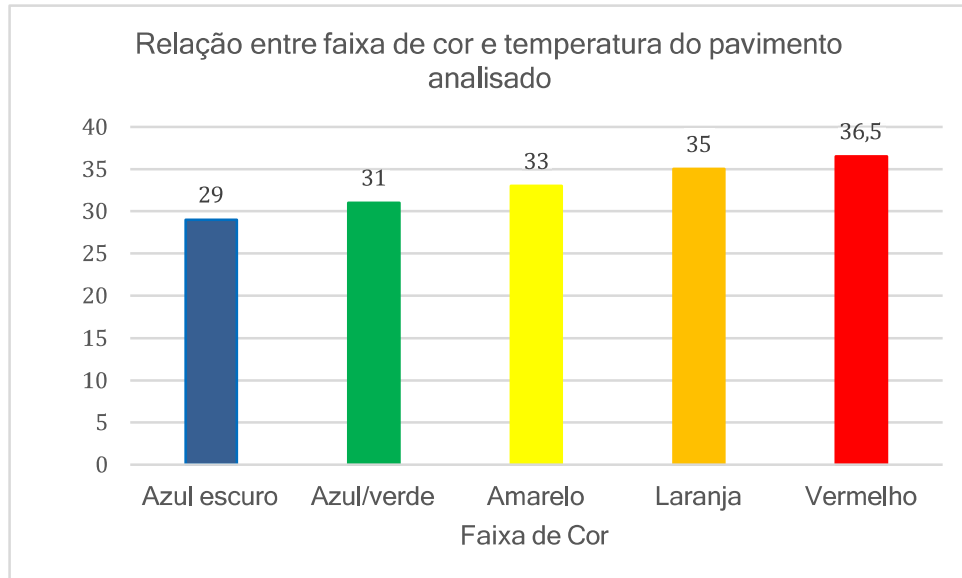
A termografia aplicada a pavimentos flexíveis apresenta potencial para a identificação de anomalias estruturais e regiões com possível presença de umidade, contribuindo para o reconhecimento de áreas suscetíveis à deterioração (MALDAGUE, 2001; BERNUCCI et al., 2010). Assim, as imagens térmicas fornecem subsídios importantes para o direcionamento de inspeções mais detalhadas e para o planejamento de intervenções na infraestrutura viária (WATANABE, 2015).

Com base nesses pressupostos, são apresentados os resultados obtidos em trechos de pavimentos flexíveis na cidade de Macapá – AP, por meio da comparação

entre registros fotográficos convencionais e imagens termográficas, buscando correlacionar as variações térmicas com a ocorrência de manifestações de defeitos.

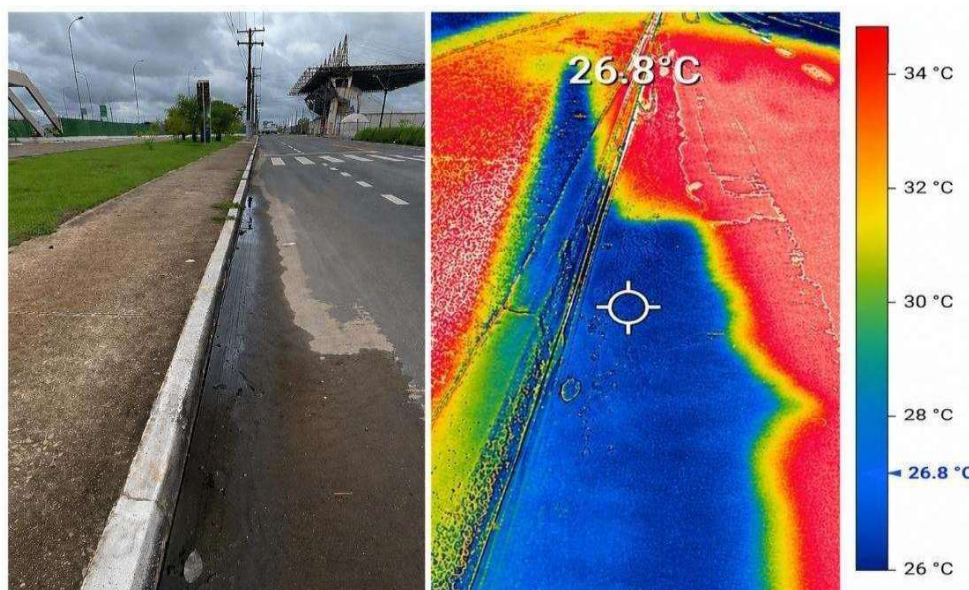
As imagens termográficas possibilitaram a identificação de diferentes faixas de temperatura, conforme apresentado no Gráfico 1 e atestado na Figura 24.

Gráfico 1 - Relação entre faixa de cor e temperatura do pavimento analisado



Fonte: autoral (2026)

Figura 24 - Imagem termográfica destacando a heterogeneidade térmica entre regiões íntegras e áreas com umidades

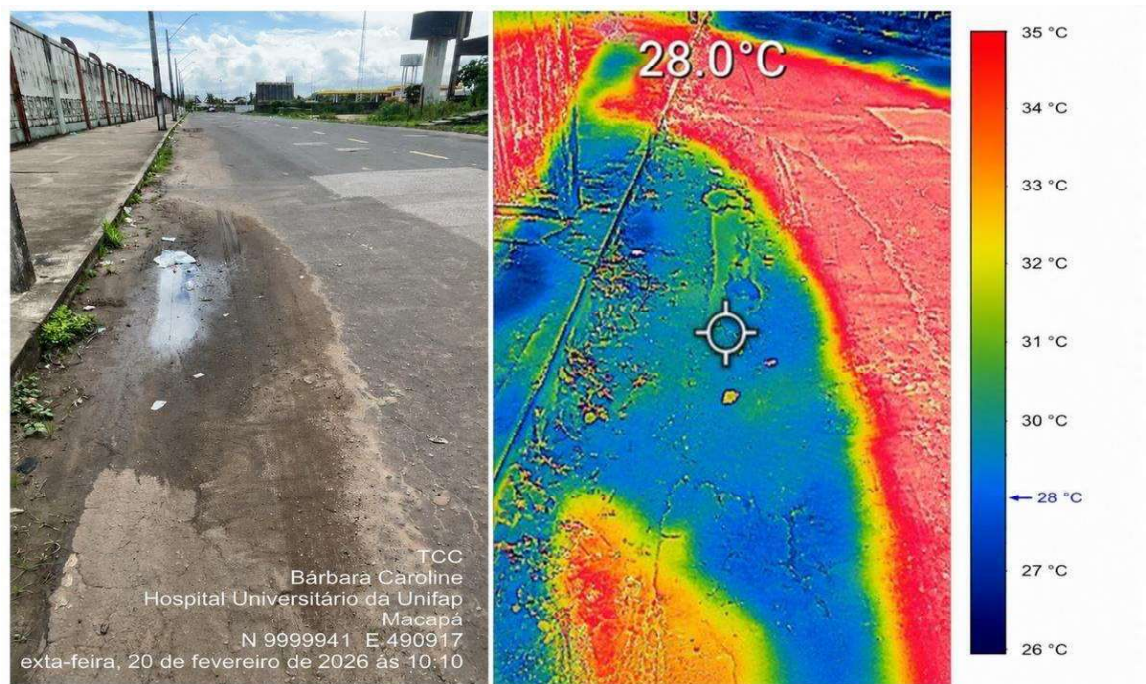


Fonte: Autora (2026)

Em concordância com o Gráfico 1, observa-se a relação entre as faixas de cores e as temperaturas registradas na imagem 24. É possível observar na imagem termográfica, a presença de diferentes zonas de cores distribuídas ao longo da superfície do pavimento, evidenciando comportamento térmico heterogêneo. Quanto maior a heterogeneidade das cores, maior é a variação térmica identificada, indicando possíveis faixas de concentração de umidade no interior do pavimento, isso também pode ser comprovado através da figura 25.

As tonalidades em azul e verde indicam maior retenção de umidade, fator que reduz a temperatura superficial devido à menor absorção e maior dissipação de calor. Esse comportamento térmico sugere deficiência no sistema de drenagem superficial, uma vez que a ausência ou ineficiência de dispositivos de escoamento favorece o empoçamento de água nas extremidades da via. Essas diferenças térmicas estão associadas à presença de descontinuidades estruturais, vazios, fissuras e infiltrações, fatores que contribuem para a perda de uniformidade do revestimento asfáltico. Em contrapartida, pavimentos que apresentam menor variação de cores tendem a possuir comportamento mais uniforme quanto à umidade e, conseqüentemente, melhores condições estruturais.

Figura 25 - Imagem termográfica do pavimento evidenciando acúmulo de água.



Fonte: Autoral 2026

Além disso, destaca-se que os problemas observados no pavimento decorrem principalmente da ação combinada do acúmulo de umidade nas camadas estruturais e da repetição dos ciclos de carga provenientes do tráfego. Nesse contexto, os ciclos de carga correspondem às sucessivas solicitações mecânicas causadas pela passagem contínua dos veículos sobre a estrutura do pavimento, promovendo tensões e deformações repetidas que, ao longo do tempo, favorecem o surgimento de fadiga, trincamentos e outras manifestações patológicas (YODER; WITCZAK, 1975; BERNUCCI et al., 2010). Associada à presença de umidade, essa repetição de cargas acelera o processo de deterioração do pavimento, reduzindo sua capacidade estrutural e sua vida útil.

4.1. Levantamento dos defeitos no pavimento

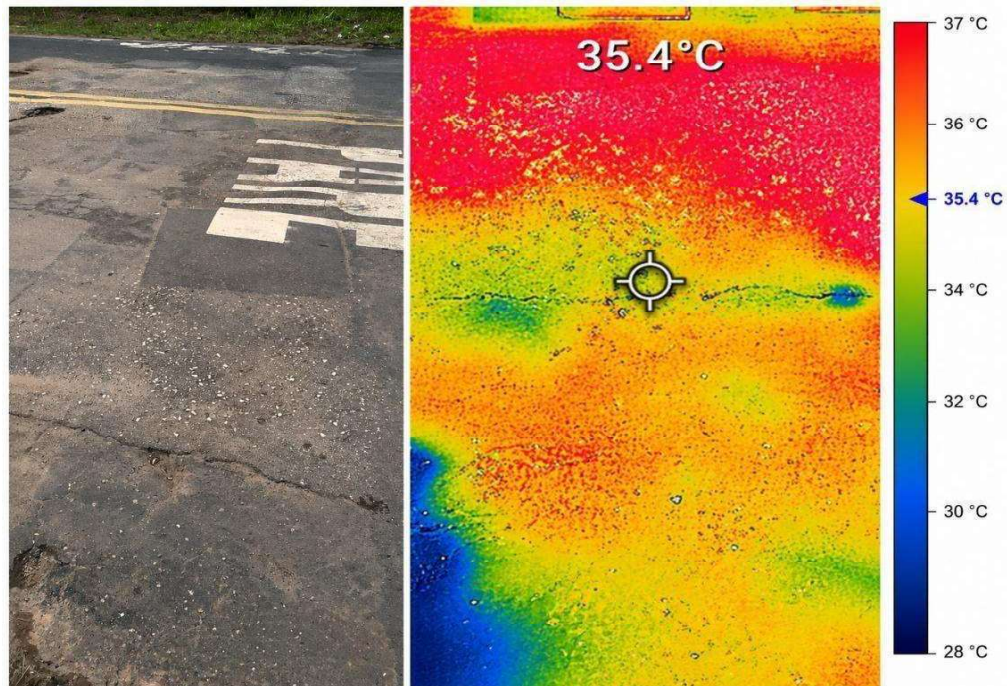
4.1.1. Trincas no pavimento

Durante a inspeção visual realizada nos trechos analisados foram identificadas manifestações de defeitos do tipo trincamento, apresentando ocorrência classificada como média na superfície do pavimento asfáltico, com distribuição moderada na faixa de rolamento. As trincas observadas apresentam-se predominantemente de forma longitudinal e irregular, distribuídas ao longo da superfície do revestimento, indicando possíveis processos de envelhecimento do ligante asfáltico, ação do tráfego e influência de variações térmicas.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT (2003) os trincamentos em pavimentos flexíveis são considerados um dos defeitos mais frequentes, podendo estar associados à fadiga do revestimento asfáltico, retração térmica ou perda de capacidade estrutural das camadas que compõem o pavimento.

A Figura 26 apresenta o registro fotográfico do trecho analisado, no qual é possível identificar a presença de fissuras superficiais ao longo da pista, bem como sinais de desgaste do revestimento asfáltico.

Figura 26 - Trincas observadas na superfície do pavimento flexível no trecho analisado.



Fonte: Autora (2026).

A análise termográfica do mesmo ponto evidencia variações de temperatura ao longo da superfície do pavimento. Observa-se que determinadas regiões associadas às fissuras apresentam colorações distintas em relação às áreas adjacentes, indicando diferenças térmicas que podem estar relacionadas à presença de umidade ou à alteração das propriedades físicas do material.

Além disso, a presença de faixas de cores bem definidas e heterogêneas, especialmente zonas em tonalidades azuladas, evidencia diferenças significativas no comportamento térmico do pavimento, indicando possíveis áreas com maior concentração de umidade. Essas regiões podem representar pontos suscetíveis ao desenvolvimento de futuras manifestações patológicas, permitindo uma previsibilidade quanto ao surgimento de novos defeitos estruturais no pavimento. Segundo Bernucci et al. (2010), a presença de umidade nas camadas do pavimento reduz a capacidade estrutural dos materiais e acelera os processos de degradação, principalmente quando associada à ação repetitiva das cargas de tráfego.

Na imagem termográfica, verificou-se que a temperatura registrada no ponto cursos da câmera atingiu aproximadamente 35,4 °C, correspondente a tonalidades entre amarelo e laranja. Observou-se que as regiões com presença de fissuras

manifestam temperaturas ligeiramente inferiores à média de 36,5 °C, registrada em áreas de pavimento mais homogêneo, as quais são representadas por tonalidades avermelhadas. Essas variações térmicas podem indicar possíveis concentrações de umidade ou maior capacidade de retenção térmica em áreas degradadas do pavimento.

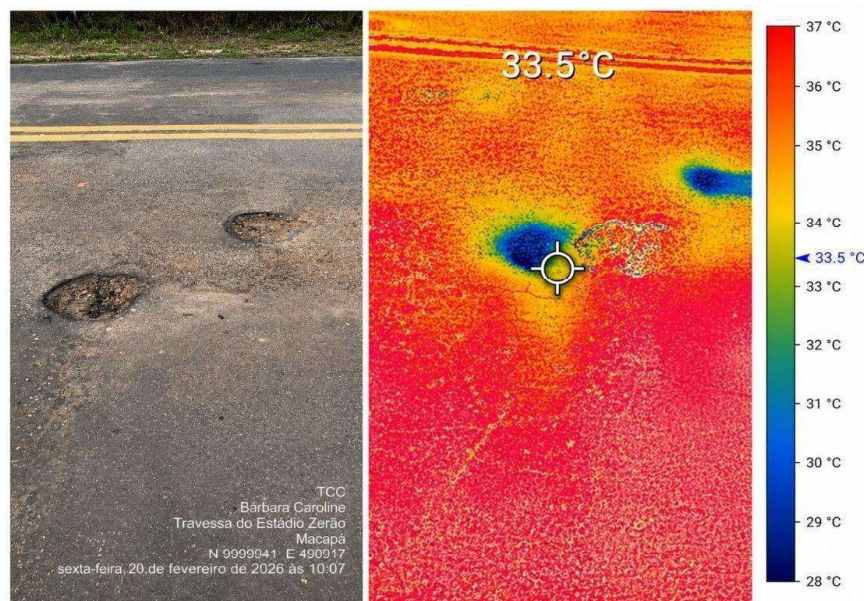
Dessa forma, a análise conjunta entre inspeção visual e termografia infravermelha demonstra o potencial dessa técnica como ferramenta auxiliar na identificação de áreas com possíveis anomalias estruturais em pavimentos asfálticos.

4.1.2. Painelas no pavimento

As painelas constituem defeitos caracterizados pela desagregação localizada do revestimento asfáltico, resultando na formação de cavidades que podem atingir camadas inferiores do pavimento. Esse tipo de defeito está associado à perda de coesão do ligante asfáltico, à ação repetida do tráfego e, principalmente, à infiltração de água nas camadas estruturais (DNIT, 2003; BERNUCCI et al., 2010).

As painelas foram identificadas ao longo do trecho antigo, apresentando ocorrência classificada como média a alta, com distribuição frequente na faixa de rolamento. Visualmente, caracterizam-se como cavidades com perda de material e exposição das camadas inferiores do pavimento, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Presença de painelas com exposição da camada inferior do pavimento



Fonte: Autoral (2026).

Observa-se, na imagem, a exposição da camada granular subjacente, indicando estágio avançado de deterioração do revestimento. Além disso, verifica-se desgaste ao redor das áreas afetadas, sugerindo a progressão do defeito para regiões adjacentes, conforme descrito por Bernucci et al. (2010). A localização das placas na faixa de rolamento evidencia a influência direta das cargas repetidas do tráfego, fator que contribui para o arrancamento progressivo do material asfáltico em áreas previamente fragilizadas (DNIT, 2006).

Complementarmente, a análise termográfica permitiu identificar variações térmicas significativas na região afetada. Observa-se a presença de zonas com temperaturas inferiores nas áreas das cavidades, o que pode indicar a retenção de umidade nas camadas inferiores ou maior porosidade do material. Essas condições favorecem a degradação acelerada do pavimento (SANTOS; BARROS, 2018). Além disso, as descontinuidades térmicas no entorno das placas sugerem comprometimento estrutural além da área superficial visível.

Dessa forma, os resultados indicam que o defeito observado não se limita ao revestimento, mas envolve também possíveis danos às camadas subjacentes, exigindo intervenções corretivas mais profundas, como recomposição estrutural do pavimento, em vez de soluções superficiais (BERNUCCI et al., 2010).

4.1.3. Evolução das placas no pavimento ao longo do monitoramento

A Figura 28 apresenta a evolução das placas identificadas no trecho analisado ao longo de um intervalo de aproximadamente 84 dias, entre os dias 20 de fevereiro e 15 de maio de 2026. Observa-se aumento significativo das áreas degradadas, com ampliação das cavidades previamente existentes, surgimento de novas regiões deterioradas e maior desagregação do revestimento asfáltico.

Figura 28 - Evolução das panelas no pavimento entre fevereiro e maio de 2026



Fonte: Autoral (2026).

Verifica-se que a ausência de intervenções corretivas associada à ação contínua do tráfego contribuiu para a progressão acelerada de defeitos. Nesse contexto, os ciclos de carga provenientes da passagem repetitiva dos veículos promovem tensões sucessivas sobre a estrutura do pavimento, favorecendo a propagação das falhas estruturais e o desprendimento progressivo do material asfáltico (YODER; WITCZAK, 1975).

Além disso, a presença de umidade nas camadas do pavimento atua como fator agravante do processo de deterioração, reduzindo a capacidade de suporte dos materiais e acelerando o surgimento de defeitos mais severos, como as panelas (BERNUCCI et al., 2010). A comparação entre os registros fotográficos evidencia a rápida evolução dos defeitos quando não são realizadas medidas adequadas de manutenção preventiva ou corretiva.

Nesse sentido, os resultados obtidos por meio da termografia infravermelha demonstraram potencial de previsibilidade quanto ao aumento e ao surgimento de novos defeitos no pavimento. As regiões que anteriormente apresentavam maior

heterogeneidade térmica e faixas de cores associadas à possível concentração de umidade coincidiram, após o período de monitoramento, com áreas que apresentaram ampliação das panelas e evolução das manifestações patológicas. Dessa forma, o monitoramento comparativo realizado comprova a eficiência da termografia como ferramenta auxiliar na identificação de áreas suscetíveis à deterioração progressiva do pavimento.

4.1.4. Trecho recapeado

Comparativamente, ao analisar o trecho recentemente recapeado, observa-se que este apresenta maior uniformidade térmica, com menor variação de cores na imagem infravermelha, indicando melhor integridade estrutural (Figura 29). Em contraste, o trecho com manifestações de defeitos apresenta maior variabilidade térmica, evidenciando a presença de descontinuidades e possível retenção de umidade.

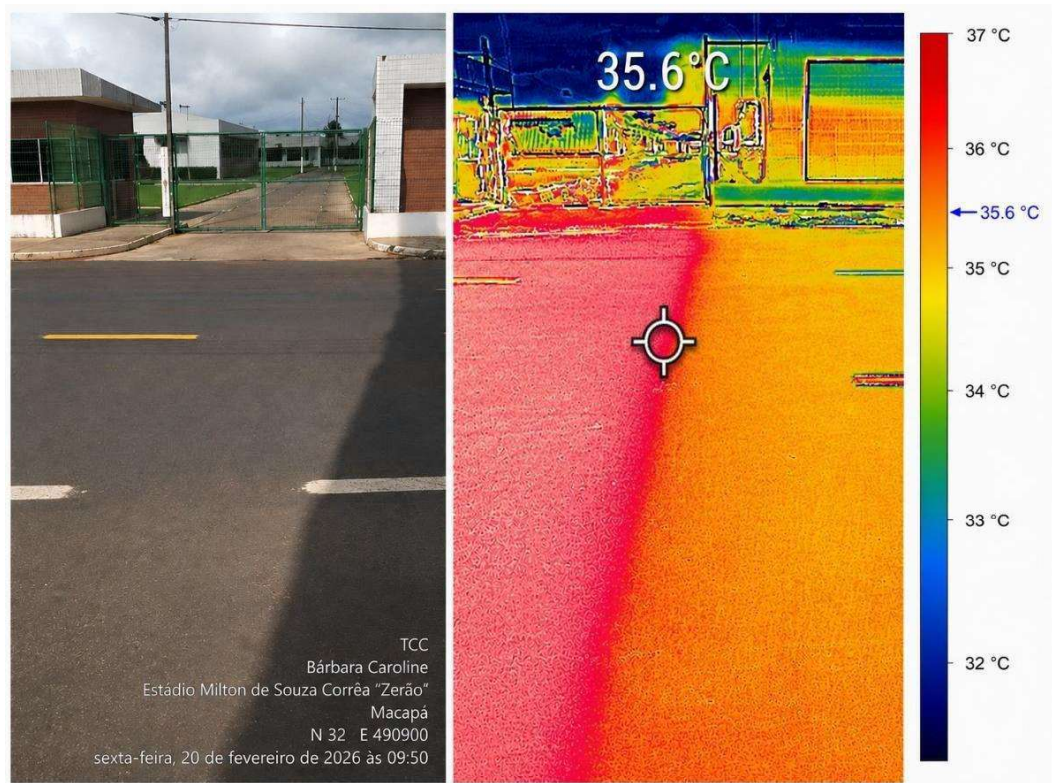
Figura 29 - Trecho recapeado



Fonte: autoral (2026)

Diante disso, verifica-se que a ocorrência de defeitos contribui para a perda de homogeneidade do pavimento, refletindo diretamente no seu comportamento o térmico e estrutural.

Figura 30 - Comparação térmica entre área sombreada e área exposta ao sol em pavimento recapeado



Fonte: Autoral 2026

A imagem termográfica apresentada (figura 30) evidencia um revestimento asfáltico recapeado, caracterizado por uma superfície mais uniforme e homogênea quando comparada a pavimentos deteriorados. Essa condição favorece a predominância de tonalidades mais quentes, representadas pelas cores vermelha e laranja, indicando maior absorção e retenção de calor ao longo da superfície.

Observa-se também a presença de duas faixas térmicas distintas, associadas à incidência diferenciada de radiação solar: uma área sombreada e outra diretamente exposta ao sol. A região sem sombra apresenta temperaturas mais elevadas, visualizadas em tons avermelhados, enquanto a área sombreada registra temperaturas relativamente menores, evidenciadas por tonalidades alaranjadas e amareladas. Esse comportamento térmico demonstra como a exposição solar influencia diretamente o aquecimento do pavimento, ressaltando a sensibilidade da

termografia infravermelha na identificação das variações térmicas superficiais.

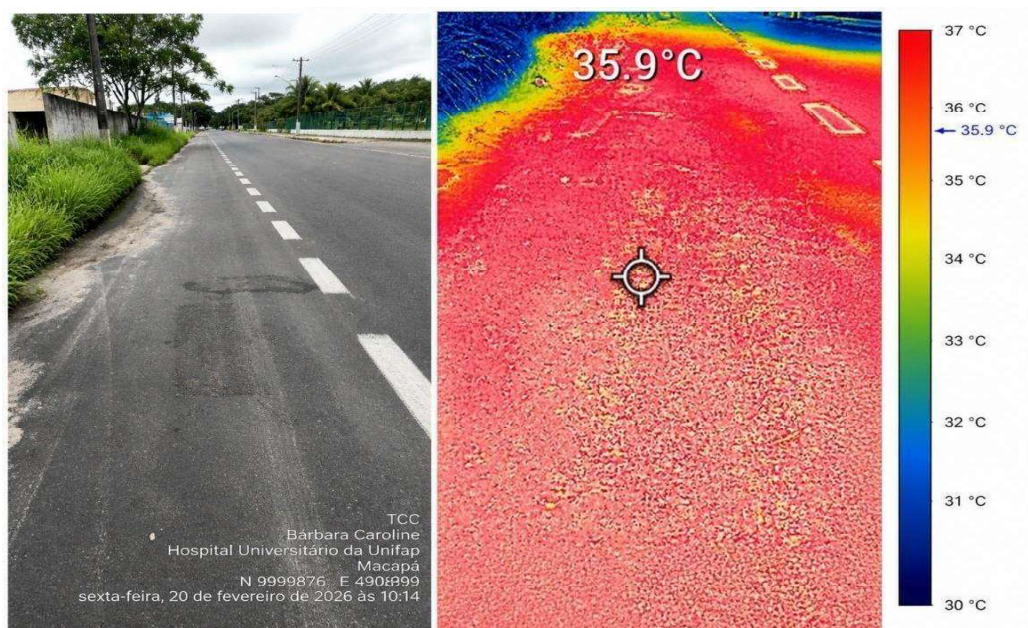
4.1.5. Desgaste superficial (desagregação do revestimento)

O desgaste superficial, ou desagregação, é uma manifestação de defeito no pavimento caracterizada como comprometimento progressivo de agregados do revestimento asfáltico, culminando em uma superfície áspera e com redução da coesão do material (BERNUCCI et al., 2010).

Esse defeito está relacionado ao envelhecimento do ligante asfáltico, à ação do tráfego e à deficiência na aderência entre o ligante e os agregados, podendo ser agravado pela infiltração de água e por falhas construtivas (DNIT, 2006).

Em consonância com os parâmetros de classificação de defeitos quanto à severidade e extensão definidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2010), o trecho recentemente recapeado, apresentou desgaste superficial de ocorrência classificada como **média**, com distribuição **moderada**. observa-se desgaste acentuado da superfície do pavimento, com perda significativa de agregados e exposição de material mais fino, conforme apresentado na Figura 31.

Figura 31 - Desgaste superficial do pavimento com perda de agregados



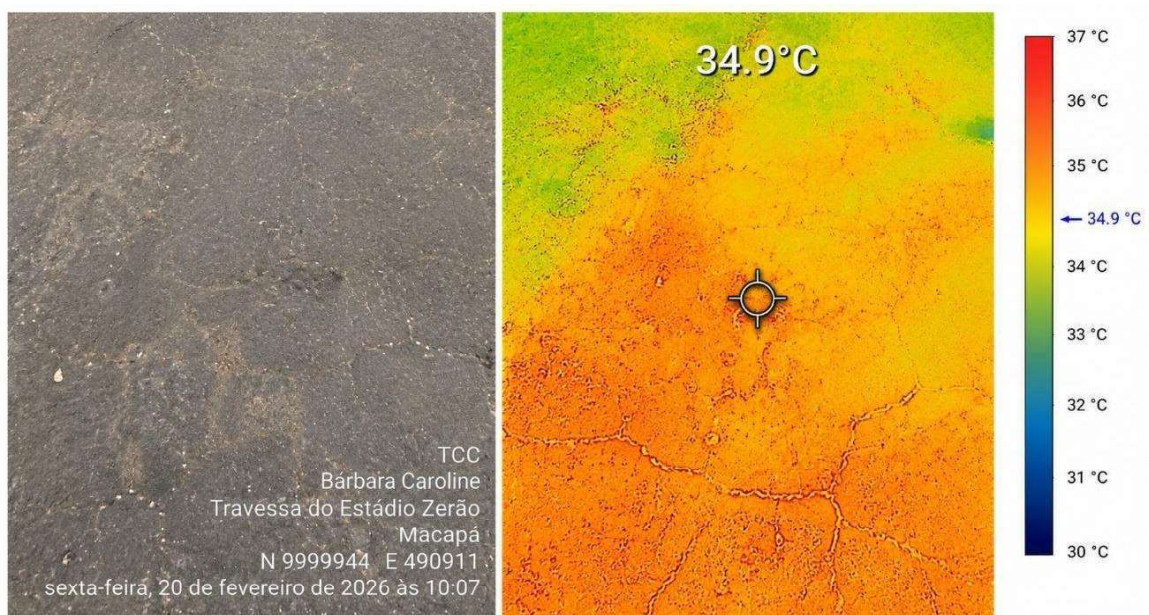
Fonte: Autoral (2026)

A superfície apresenta textura irregular e aspecto poroso, indicando redução da resistência mecânica do revestimento e isto já é um sinal para medidas preventivas de mitigação da evolução de outros defeitos.

Ao analisar a imagem termográfica, identificou-se que as áreas com maior desagregação apresentam comportamento térmico distinto, como pontos de coloração mais amareladas, o que pode estar relacionado à maior porosidade e à presença de umidade nos vazios do material. Essas condições favorecem a deterioração progressiva do pavimento (SANTOS; BARROS, 2018).

Diante disso, é importante salientar que o desgaste superficial atua como estágio inicial ou intermediário de degradação, podendo evoluir para defeitos mais severos, como as placas já observadas anteriormente, comprometendo o desempenho funcional e estrutural da via.

Figura 32 - Variações térmicas associadas à presença de fissuras e umidade no pavimento



Fonte: Autoral (2026)

A análise termográfica da figura 32 reforçou as diferenças de temperatura ao longo da superfície do pavimento, com registro aproximado de 34,9 °C no ponto central da imagem. Observa-se a presença de zonas de cores heterogêneas, variando entre tonalidades azuladas, esverdeadas, amarelas e alaranjadas, indicando comportamento térmico irregular do revestimento asfáltico. Quanto maior a heterogeneidade das cores, maior a variação térmica e, consequentemente, maior a

possibilidade de existência de faixas de umidade no interior do pavimento.

Nesse sentido, as zonas em tonalidades mais frias, especialmente em azul e verde, indicam possíveis áreas com maior concentração de umidade, fator que reduz a capacidade estrutural do pavimento e favorece o surgimento de manifestações patológicas (BERNUCCI et al., 2010). A presença dessas diferentes faixas térmicas permite prever áreas suscetíveis ao desenvolvimento de novos defeitos, uma vez que os problemas no pavimento estão diretamente relacionados à ação da umidade associada aos ciclos de carga provocados pela repetição do tráfego (YODER; WITCZAK, 1975).

4.1.6. Evolução de desgaste para trincas ao longo do monitoramento

A Figura 33 demonstra a evolução das fissuras observadas no trecho analisado durante o período de monitoramento compreendido entre 20 de fevereiro e 15 de maio de 2026, totalizando aproximadamente 84 dias. Nota-se que as fissuras inicialmente superficiais apresentaram aumento de abertura e continuidade ao longo da superfície do pavimento, indicando avanço do comprometimento estrutural do revestimento asfáltico.

Figura 33 - Evolução de fissuras no pavimento monitorado



A propagação dessas descontinuidades está relacionada à ação repetitiva das cargas de tráfego sobre o pavimento. De acordo com Yoder e Witczak (1975), os ciclos de carga provocados pela passagem contínua dos veículos geram esforços sucessivos de tração e compressão, favorecendo a ampliação progressiva das fissuras e o enfraquecimento da estrutura ao longo do tempo.

Associado a isso, a infiltração de água pelas aberturas existentes intensifica o processo de deterioração, uma vez que a umidade reduz a aderência entre os materiais constituintes do pavimento e contribui para a perda de capacidade estrutural das camadas inferiores (BERNUCCI et al., 2010). Dessa forma, a combinação entre tráfego e presença de umidade favorece a evolução acelerada das manifestações patológicas observadas no trecho estudado.

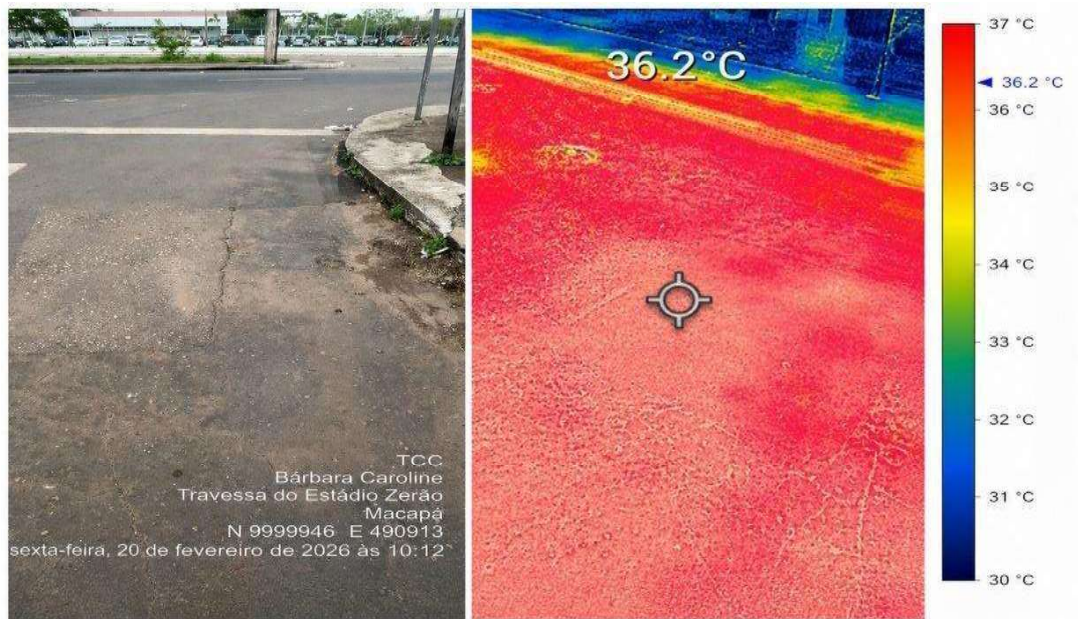
A análise comparativa também permitiu relacionar os resultados obtidos anteriormente por meio da termografia infravermelha com o comportamento apresentado posteriormente pelo pavimento. As regiões que apresentavam maior heterogeneidade térmica e diferenças de coloração evoluíram para áreas com fissuras mais abertas e pronunciadas, evidenciando que a termografia possui potencial para auxiliar na identificação prévia de pontos suscetíveis à progressão de defeitos estruturais no pavimento.

4.1.7. Remendos no pavimento

Os remendos são intervenções realizadas com o objetivo de reparar defeitos localizados no pavimento, como panelas e trincas, ou seja, trata-se de uma medida corretiva. No entanto, quando executados de forma inadequada ou submetidos a condições severas de tráfego e clima, podem se deteriorar, tornando-se novas áreas de defeitos (BERNUCCI et al., 2010).

No trecho analisado, os remendos foram identificados apresentando ocorrência classificada como média, com distribuição moderada de defeitos e severidade conforme os parâmetros do DNIT. Durante a inspeção foi identificado presença de remendos ao longo da faixa de rolamento, caracterizados por diferenças de textura e coloração em relação ao revestimento original, conforme apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Remendo no pavimento com sinais de desgaste superficial



Fonte: autoral (2026)

Em vista disso, verificou-se que o remendo apresenta sinais de desgaste superficial e perda de material, indicando possível falha na execução ou envelhecimento precoce da intervenção. Além disso, nota-se descontinuidade entre o material aplicado e o pavimento adjacente, o que pode comprometer a integridade da estrutura.

Complementarmente, a análise termográfica evidencia variações térmicas na região do remendo. Observa-se comportamento térmico heterogêneo, com diferenças de temperatura entre o remendo e o pavimento original. Essas variações indicam possíveis diferenças de densidade, compactação ou composição dos materiais utilizados. Além disso, regiões com menor temperatura podem estar associadas à maior retenção de umidade ou maior porosidade, fatores que contribuem para a degradação acelerada do pavimento.

Esse comportamento reforça a premissa de que o remendo não apresenta desempenho estrutural adequado, podendo atuar como ponto de concentração de tensões e favorecer o surgimento de novas patologias, como trincas e panelas (DNIT, 2006).

Consequentemente, verifica-se que, embora o remendo tenha sido executado com a finalidade de correção, sua condição atual indica necessidade de reavaliação

da técnica construtiva e da qualidade da manutenção aplicada.

4.2. Análise geral dos defeitos identificados no pavimento asfáltico

No que se refere às manifestações de defeitos ao longo do trecho estudado, foi possível identificar diferentes tipos de defeitos no pavimento asfáltico, com destaque para trincas, panelas, desgaste superficial e remendos deteriorados. Esses defeitos apresentam-se de forma associada, indicando um processo progressivo de degradação do pavimento.

Observou-se que o desgaste superficial atua como estágio inicial da deterioração, caracterizado pela perda de agregados e redução da coesão do ligante asfáltico. Esse processo favorece o surgimento de trincas, que, quando não tratadas adequadamente, evoluem para defeitos mais severos, como as panelas, evidenciando a perda de integridade estrutural do revestimento (BERNUCCI et al., 2010).

As panelas identificadas no trecho analisado representam um estágio avançado de degradação, com exposição das camadas inferiores do pavimento, comprometendo diretamente a segurança e dos usuários. A ocorrência desses defeitos está associada, principalmente, à infiltração de água, à repetição das cargas do tráfego e à ausência de intervenções corretivas em tempo adequado (DNIT, 2006). Além disso, a presença de remendos deteriorados indica que intervenções anteriores não foram eficazes na recuperação do pavimento, seja por falhas na execução, materiais inadequados ou ausência de técnicas apropriadas de reparo. Esses remendos passam a atuar como pontos de descontinuidade estrutural, favorecendo o reaparecimento de defeitos.

A análise termográfica mostrou-se uma ferramenta complementar relevante, permitindo identificar variações térmicas associadas a descontinuidades no pavimento, como diferenças de compactação, presença de umidade e heterogeneidade dos materiais. Dessa forma, a termografia contribuiu para uma avaliação mais detalhada das condições do pavimento, possibilitando a identificação de áreas potencialmente comprometidas, mesmo quando não evidentes na inspeção visual.

4.3. Comparação entre trechos analisados

A análise comparativa entre o pavimento recapeado e o pavimento com manifestações de defeitos evidenciou diferenças significativas no comportamento térmico. O pavimento com manifestações de defeitos apresenta maior variabilidade térmica em relação ao pavimento recapeado. Essa diferença está diretamente associada à presença de descontinuidades estruturais, vazios e infiltração de umidade.

O pavimento recentemente recapeado apresentou comportamento térmico mais uniforme, evidenciando melhor integridade estrutural e homogeneidade dos materiais.

Dessa forma, verifica-se que a termografia infravermelha se mostrou uma ferramenta eficiente na identificação de áreas comprometidas, permitindo diferenciar claramente superfícies íntegras de pavimentos degradados. Uma vez que, a termografia possibilita a identificação da presença de umidade quando apresenta as diferentes cores dentro de uma imagem, já que aponta cores frias (azul, azul esverdeado) para temperaturas mais baixas e cores quentes (vermelho, laranja) para temperaturas mais altas.

4.4. Síntese de defeitos no pavimento

A tabela 3 permite uma visualização integrada das condições do pavimento, evidenciando que os defeitos identificados não ocorrem de maneira isolada, mas estão interrelacionados, compondo um processo contínuo de degradação.

Tabela 3 - Síntese dos defeitos no pavimento

Patologia	Características Observadas	Possíveis Causas	Nível de Severidade	Consequências
Trincas	Fissuras longitudinais no revestimento	Fadiga do pavimento, variações térmicas, retração do ligante, falhas construtivas	Média	Evolução para infiltração de água e surgimento de panelas
Panelas	Cavidades com perda de material e exposição da camada inferior	Infiltração de água, tráfego repetitivo, evolução de trincas, falha estrutural	Alta	Risco à segurança, danos aos veículos, aceleração da degradação
Desgaste superficial	Perda de agregados, textura áspera, superfície irregular	Envelhecimento do ligante, ação do tráfego, baixa aderência agregado-ligante	Média	Redução da resistência do pavimento e início de outras patologias
Remendos	Áreas com coloração distinta, desgaste e falhas na interface com o pavimento original	Execução inadequada, má compactação, materiais de baixa qualidade, ausência de preparo adequado	Média a Alta	Reincidência de defeitos, descontinuidade estrutural, redução do desempenho do pavimento

Fonte: Elaborado pela autora, com base em DNIT (2003)

De modo geral, os resultados indicam que o pavimento com defeitos analisado apresenta comprometimento tanto funcional quanto estrutural, sendo necessária a adoção de medidas de manutenção corretiva mais abrangentes. Intervenções superficiais isoladas tendem a ser insuficientes, sendo recomendada a reavaliação das condições das camadas inferiores e a aplicação de técnicas adequadas de restauração.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciaram o potencial da termografia infravermelha como ferramenta complementar para a avaliação de pavimentos flexíveis urbanos. A análise comparativa entre os registros fotográficos convencionais e os termogramas permitiu identificar diferenças térmicas relacionadas à presença de manifestações patológicas e possíveis concentrações de umidade, contribuindo para uma interpretação mais abrangente das condições do pavimento analisado.

Em resposta ao problema de pesquisa proposto, conclui-se que a termografia infravermelha demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o análises complementar de defeitos em pavimentos flexíveis urbanos, principalmente na identificação de regiões com presença de umidade e descontinuidades estruturais. As imagens térmicas possibilitaram identificar diferenças significativas de temperatura entre áreas íntegras e áreas deterioradas, evidenciando padrões térmicos relacionados à presença de trincas, panelas, desgaste superficial, remendos deteriorados e deficiência de drenagem. Dessa forma, verificou-se que a técnica possui potencial para auxiliar no reconhecimento antecipado de áreas suscetíveis à degradação, contribuindo para o planejamento de ações preventivas de manutenção viária.

No que se refere ao primeiro objetivo específico, relacionado à revisão bibliográfica sobre pavimentos flexíveis e os principais defeitos associados, foi possível compreender que os pavimentos urbanos sofrem influência direta das cargas repetitivas do tráfego, das condições climáticas e, principalmente, da presença de umidade nas camadas estruturais. A literatura consultada demonstrou que manifestações patológicas como trincamentos, panelas, afundamentos e desagregação superficial representam processos progressivos de deterioração que comprometem tanto o desempenho funcional quanto estrutural das vias. Além disso, constatou-se que a deficiência de drenagem é um dos principais fatores responsáveis pela aceleração desses processos.

Quanto ao objetivo de apresentar os fundamentos da termografia infravermelha e suas aplicações na engenharia civil, verificou-se que a técnica se destaca como um método não destrutivo eficiente, capaz de identificar variações térmicas superficiais associadas a anomalias internas dos materiais. A revisão teórica permitiu compreender que a termografia já é amplamente utilizada em inspeções prediais,

sistemas elétricos, estruturas de concreto e equipamentos industriais, apresentando também grande potencial para aplicação em pavimentos flexíveis. No contexto da pavimentação, a técnica mostrou-se relevante por possibilitar a identificação de regiões com retenção de umidade, heterogeneidade dos materiais e possíveis falhas estruturais, sem a necessidade de intervenções destrutivas no pavimento.

Em relação ao objetivo de executar inspeção visual em trechos de pavimento com diferentes condições de conservação, a pesquisa possibilitou identificar distintos níveis de degradação ao longo das vias analisadas. O trecho deteriorado apresentou manifestações patológicas significativas, como trincas longitudinais, panelas, desgaste superficial e remendos deteriorados, evidenciando comprometimento estrutural do revestimento asfáltico. Por outro lado, o trecho recentemente recapeado apresentou melhores condições de conservação, maior uniformidade superficial e ausência aparente de defeitos relevantes. Essa comparação permitiu estabelecer parâmetros qualitativos importantes para correlacionar o estado físico do pavimento com seu comportamento térmico.

Durante a obtenção das imagens térmicas dos trechos selecionados, verificou-se que as condições climáticas da cidade de Macapá favoreceram significativamente a aplicação da termografia infravermelha. As elevadas temperaturas e a intensa incidência solar típicas da região equatorial contribuíram para a geração de contrastes térmicos mais evidentes entre áreas secas e regiões com possível presença de umidade. As imagens termográficas obtidas permitiram identificar diferentes faixas de temperatura ao longo da superfície do pavimento, evidenciando padrões térmicos distintos entre áreas homogêneas e regiões com manifestações patológicas.

Em relação ao objetivo de comparar os resultados da termografia infravermelha com os dados obtidos por inspeção visual, verificou-se forte compatibilidade entre as anomalias térmicas registradas e os defeitos observados em campo. As regiões com presença de trincas, panelas e desgaste superficial apresentaram maior heterogeneidade térmica, com predominância de tonalidades frias, como azul e verde, indicando possíveis concentrações de umidade e alterações nas propriedades físicas do material. Em contrapartida, o trecho recapeado apresentou comportamento térmico mais uniforme, com predominância de cores quentes, como vermelho e laranja, evidenciando maior integridade estrutural e melhor homogeneidade do revestimento asfáltico.

No decorrer das análises da relação entre variações de temperatura e a

ocorrência de defeitos no pavimento, constatou-se que as diferenças térmicas identificadas nas imagens infravermelhas estão diretamente relacionadas às condições estruturais do pavimento. Regiões com presença de umidade apresentaram temperaturas mais baixas devido à maior dissipação térmica e menor absorção de calor. Já áreas estruturalmente íntegras apresentaram temperaturas mais elevadas e comportamento térmico mais uniforme. Além disso, verificou-se que fatores ambientais, como a incidência solar e a presença de sombra, influenciam diretamente a distribuição térmica do pavimento, ressaltando a necessidade de considerar as condições climáticas durante a interpretação dos termogramas.

Destaca-se também que o acúmulo de água observado próximo às margens da via indicou possível deficiência nos dispositivos de drenagem superficial, fator que contribui significativamente para o surgimento e agravamento das manifestações patológicas identificadas. As áreas com retenção de umidade apresentaram comportamento térmico distinto em relação às demais regiões do pavimento, reforçando a relação entre infiltração de água, perda de capacidade estrutural e evolução dos defeitos. Dessa forma, a termografia demonstrou capacidade não apenas de identificar defeitos já existentes, mas também de indicar áreas potencialmente suscetíveis à deterioração futura.

Por fim, em relação ao objetivo de demonstrar o potencial da termografia infravermelha como ferramenta complementar de diagnóstico em pavimentos urbanos, conclui-se que a técnica apresentou resultados satisfatórios e compatíveis com os objetivos propostos na pesquisa. A termografia possibilitou uma análise rápida, eficiente e não destrutiva das condições do pavimento, permitindo identificar áreas comprometidas e prever a evolução de manifestações patológicas. Além disso, verificou-se que a utilização dessa técnica pode contribuir para a redução de custos operacionais, otimização das inspeções de campo e melhor direcionamento das intervenções de manutenção preventiva.

Dessa forma, conclui-se que o uso da termografia infravermelha apresenta grande potencial como ferramenta complementar para avaliação de pavimentos flexíveis urbanos, especialmente em regiões de clima quente e úmido, como a cidade de Macapá — AP. Sua aplicação pode auxiliar significativamente no monitoramento das condições das vias, proporcionando diagnósticos mais precisos e contribuindo para o planejamento de ações de conservação mais eficientes e duradouras. Recomenda-se, para estudos futuros, a ampliação das análises em

diferentes períodos climáticos, a utilização de monitoramento contínuo e a integração da termografia com outros métodos não destrutivos, visando aumentar a confiabilidade dos diagnósticos e aprofundar o entendimento sobre o comportamento térmico dos pavimentos urbanos.

.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 9712: **Ensaio não destrutivo — Qualificação e certificação de pessoal de END**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7207: **Pavimentação asfáltica — Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiro**. Rio de Janeiro: Petrobras/ABEDA, 2010.

CORTIZO, Eduardo Caetano. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas de concreto com manifestações patológicas**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de pavimentação**. Brasília: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de conservação rodoviária**. Brasília: DNIT, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **PRO 005/2003: avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos – procedimento**. Brasília: DNIT, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **PRO 008/2003: levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos**. Brasília: DNIT, 2003.

FLIR SYSTEMS. *FLIR TG165 – Spot Thermal Camera*. Disponível em: <https://www.flir.com/products/tg165/>. Acesso em: 27 abr. 2026.

FLIR SYSTEMS. **Introduction to Thermal Imaging and Infrared Cameras**. Wilsonville: FLIR Systems, 2024. Disponível em: <https://www.flir.com>. Acesso em: 04 jun. 2026.

HOLST, G. C. **Common sense approach to thermal imaging**. 2. ed. Bellingham: SPIE Press, 2000.

INDÚSTRIA 4.0. **Termografia: aplicações além da manutenção elétrica**. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/artigo/17360-termografia-aplicacoes-alem-da-manutencao-eletrica>. Acesso em: 26 abr. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados climatológicos do Brasil**. Brasília: INMET, 2023.

MALDAGUE, X. **Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing**. New York: John Wiley & Sons, 2001.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Pavimentação rodoviária**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

SANTOS, R. S.; BARROS, M. T. L. Aplicação da termografia infravermelha na avaliação de defeitos em pavimentos asfálticos. **Revista de Engenharia Civil**, v. 28, n. 3, p. 45–53, 2018.

WATANABE, F. S.; ROSSI, A. L. Aplicação da termografia infravermelha na avaliação de pavimentos. **Revista Transportes**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 2, p. 45–53, 2015.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1975.