

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GRACIELI DA SILVA VIEIRA

**APLICABILIDADE DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EM
REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS**

**Alegrete
2018**

GRACIELI DA SILVA VIEIRA

**APLICABILIDADE DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EM
REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

Orientador: Diego Arthur Hartmann

**Alegrete
2018**

GRACIELI DA SILVA VIEIRA

**APLICABILIDADE DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA EM
REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS**

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

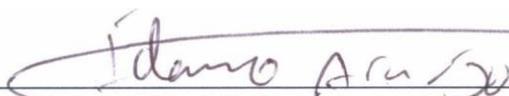
Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 27 de junho de 2018.

Banca examinadora:



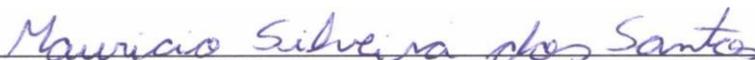
Prof. D.Sc. Diego Arthur Hartmann

Orientador
UNIPAMPA



Prof. D.Sc. Adamo de Sousa Araújo

UNIPAMPA



Prof. Me. Mauricio Silveira dos Santos

UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha mãe e à todas as pessoas que me ajudaram durante a graduação.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus que me manteve forte, equilibrada e com a esperança que todas as dificuldades seriam vencidas, também sou grata a Ele por ter colocado pessoas maravilhosas no meu caminho que me ajudaram a tornar esse sonho possível.

A minha mãe Noely que acreditou em mim e se esforçou para me ajudar no que era possível, aos meus irmãos que me incentivaram a nunca desistir. A Débora, Maria e Oraides por terem me acolhido em suas casas quando eu precisei.

Ao prof. Diego Arthur Hartmann, por não ter sido apenas orientador e sim um grande incentivador a explorar esse mundo fantástico da pesquisa e, por ter me acalmado nos momentos complicados se colocando à disposição para ajudar. E também aos professores da banca pelas considerações e correções que foram de grande serventia na evolução deste trabalho.

Ao Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) da UFSM por terem me doado as amostras asfálticas utilizadas e aos técnicos do laboratório de materiais de construção civil da Unipampa por me auxiliarem no preparo das amostras para análise.

Aos meus amigos tanto da URI quanto da Unipampa pela parceria, risos e ensinamentos e a todos que me apoiaram.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”

John F. Kennedy

RESUMO

No Brasil a deterioração precoce dos pavimentos asfálticos é uma constante preocupação, sendo os principais defeitos o trincamento e afundamento em trilhas de rodas. Existem diversas técnicas para a detecção destes defeitos, porém a maioria só é aplicável para defeitos em estágio avançado e com manifestações na superfície do pavimento, não havendo uma metodologia adequada para o monitoramento da instauração do defeito de modo que se proponha uma solução de restauração mais eficiente com custos inferiores. A termografia infravermelha é uma técnica de medição de temperatura sem contato, que vem sendo utilizada frequentemente na investigação de manifestações patológicas da construção civil, porém sua aplicação na pavimentação asfáltica ainda é pouco explorada. Buscou-se neste estudo analisar algumas aplicações desta técnica em pavimentos asfálticos. Primeiramente foram realizadas análises paramétricas com a câmera termográfica FLIR T400, equipamento utilizado neste trabalho, a fim de se entender a importância dos principais parâmetros na geração de imagens térmicas. Posteriormente, foram realizados testes em amostras asfálticas com trincas induzidas de diâmetros e localização conhecidos, antes de se realizar o estudo a campo. Tais testes tiveram por finalidade analisar como se dá a distribuição de calor ao longo da amostra, buscando encontrar diferenças de temperatura nas regiões de falhas, e então foram obtidas imagens térmicas do pavimento asfáltico a campo. Além disso, neste trabalho foi verificada a aplicabilidade de um modelo de previsão de temperatura máxima do pavimento asfáltico desenvolvido no estado do Rio Grande do Sul. Com a análise das imagens térmicas das amostras asfálticas, percebeu-se que há uma tendência de mudança de comportamento dos termogramas em regiões com falhas e defeitos. Quanto ao modelo, foi possível observar que uma boa concordância das temperaturas medidas e previstas, desde que se respeite o intervalo de temperatura que a torna válida.

Palavras-Chave: pavimentação asfáltica, termografia infravermelha, detecção de defeitos.

ABSTRACT

In Brazil the early deterioration of asphalt pavements is a constant concern, the being the main defects cracking and rutting. There are several techniques for the detection of these defects, but the majority is only applicable to defects in advanced stage and with surface manifestations, not having an adequate methodology for the monitoring of the installation of the defect so that a solution of restoration is proposed more with lower costs. Infrared thermography is a technique of non-contact temperature measurement, which is frequently used in the investigation of pathological manifestations of civil construction and its application to asphalt paving is still little explored. This study aimed to analyze some applications of this technique in asphalt pavements. First, parametric analysis were performed with the FLIR T400 thermal camera in order to understand the importance of the main parameters in thermal imaging. Before the field study, tests were performed on asphalt samples with induced cracks of known diameters and locations. The purpose of these tests was to analyze how the heat distribution occurs throughout the sample, in order to find temperature differences in the fault regions, and then thermal images of the asphalt pavement were obtained. In addition, in this work the applicability of a maximum temperature prediction model of asphalt pavement developed in the state of Rio Grande do Sul was verified. With the analysis of the thermal images of the asphaltic samples, it was noticed that there is a trend of behavior change thermograms in regions with faults and defects. As for the model, it was possible to observe that a good agreement of the measured and predicted temperatures, provided that the temperature range that makes it valid is respected.

Keywords: asphalt paving, infrared thermography, failure detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos comuns de trincas	21
Figura 2 – Tipos comuns de afundamentos	24
Figura 3 – Sistema de vídeo (a) e sistema de determinação de irregularidade transversal (b)	28
Figura 4 - Veículo equipado com câmera termográfica	28
Figura 5 - Espectro eletromagnético	32
Figura 6 - Propagação de calor	32
Figura 7 - Temperatura da mistura asfáltica durante o processo construtivo ...	36
Figura 8 - Juntas frias de compactação	37
Figura 9 - Roteiro para processamento de imagens e detecção de trincas	37
Figura 10 - Detecção de trinca com câmera termográfica.....	38
Figura 11 - Exemplo da formação de trincas no pavimento	39
Figura 12 - Câmera termográfica T400	40
Figura 13 - Identificação da área de estudo	42
Figura 14 - Amostra asfáltica utilizada	44
Figura 15- Processo de corte das amostras utilizadas	44
Figura 16 - Amostras cortadas longitudinalmente	45
Figura 17 - Amostras cortadas transversalmente.....	45
Figura 18- Fotografia termográfica de uma amostra	46
Figura 19 - Processo metodológico utilizado.....	47
Figura 20 - Imagens térmicas obtidas com (a) e sem (b) incidência solar	48
Figura 21 - Determinação da emissividade do revestimento asfáltico.....	50
Figura 22 - Análise da variação de temperatura em função da distância e da inclinação do objeto.....	52
Figura 23 - Medições com diferentes temperaturas informadas na câmera.....	53
Figura 24 - Medições com diferentes umidades informadas na câmera	54
Figura 25 - Medições com diferentes emissividades informadas na câmera ...	54
Figura 26 - Determinação da emissividade	55
Figura 27 - Refletividade da fita vinílica.....	56
Figura 28 - Termogramas para análise de distribuição de calor na amostra....	57
Figura 29 - Distribuição de calor na direção x	58
Figura 30 - Distribuição de calor na direção y	58

Figura 31 - Amostra de referência sem indução de trincas: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 15 min	59
Figura 32 – Distribuição de calor na amostra sem trincas.....	60
Figura 33 - Amostras com trincas induzidas de 4 mm: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 15 min	61
Figura 34 - Distribuição de calor na amostra com trinca de 4 mm	62
Figura 35 - Amostras com trincas induzidas de 6 mm: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 15 min	62
Figura 36 - Distribuição de calor na amostra com trinca de 6 mm	63
Figura 37 - Fotografia digital e termográfica do pavimento asfáltico	64
Figura 38 - Imagens termográficas no sentido longitudinal da pista de rolagem	65
Figura 39 – Imagens térmicas para cálculo de previsão de temperatura	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Linha histórica da evolução da termografia.....	31
Quadro 2 - Características técnicas da câmera	40
Quadro 3 - Variação paramétrica na obtenção de termogramas.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACL - Afundamento de Consolidação Local

ACT - Afundamento de Consolidação na Trilha

APL – Afundamento Plástico Local

APT – Afundamento Plástico da Trilha

ARAN – *Automatic Road Analyser*

ATR – Afundamento de Trilha de Roda

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CCD – *Charge Coupled Device*

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

END – Ensaio Não Destrutivo

FPA – *Focal Plane Array*

LVC – Levantamento Visual Contínuo

TTC – Trincas Longitudinais Curtas

TLL – Trincas Longitudinais Longas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos	16
1.1.1. Objetivo geral	16
1.1.2. Objetivos específicos.....	16
1.2. Justificativa.....	16
1.3. Estrutura e descrição dos capítulos.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Defeitos em pavimentos flexíveis	19
2.1.1. Trincamento.....	20
2.1.2. Afundamento	23
2.1.3. Métodos de avaliação dos defeitos de superfície	26
2.2. Modelos de previsão de temperatura no pavimento asfáltico	28
2.3. Termografia infravermelha	30
2.3.1. Breve histórico	30
2.3.2. Conceitos gerais.....	31
2.2.2. Fatores que influenciam na medição de radiação infravermelha	33
2.2.3 Técnicas de termografia digital.....	34
2.4. Termografia infravermelha aplicada à pavimentos asfálticos.....	36
3. METODOLOGIA	40
3.1. Materiais.....	40
3.1.1. Câmera termográfica infravermelha	40
3.1.2. Amostras laboratoriais	41
3.1.3. Área de estudo a campo	42
3.2. Métodos	43
3.2.1. Procedimentos de análise laboratorial.....	43
3.2.2. Procedimentos de análise em campo.....	47

3.2.2.2 Premissas para obtenção de imagens térmicas a campo	48
3.2.3 Tratamento e análise das imagens térmicas	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Influência das variações de distância, emissividade e ângulo de observação	52
4.2. Determinação da emissividade do revestimento asfáltico	55
4.3. Previsão de trincas	56
4.4 Previsão de defeitos no pavimento asfáltico <i>in situ</i>	63
4.5. Previsão de temperatura na superfície do pavimento	65
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	69
REFERÊNCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

A pavimentação tem como objetivo principal garantir a trafegabilidade em qualquer época e condição climática, possibilitando conforto e segurança ao usuário. Para tal, deve-se garantir o desempenho adequado do conjunto de camadas que compõem o pavimento, uma vez que do ponto de vista do usuário o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois esses defeitos são facilmente percebidos por afetarem seu conforto.

O grande desafio na área de gerência de pavimentos está relacionado a correta obtenção de dados, informações e parâmetros que permitam identificar um problema, visando determinar o desempenho atual do pavimento e dessa forma traçar as necessidades atuais e futuras de intervenções na via. Dificuldades nesta área acarretam em planejamentos de manutenção limitados, e pavimentos asfálticos com deterioração acentuada, comprometendo e reduzindo a vida útil estimada em projeto.

Em pavimentos asfálticos, a camada superficial apresenta papel fundamental no desempenho e trafegabilidade da via. Para garantir um material de alta qualidade, é essencial que a mistura asfáltica seja realizada seguindo processos altamente estritos e controlados. Dentre a diversa gama de parâmetros a serem considerados um dos mais importantes é a temperatura do material, seja na preparação da mistura, seja ao longo de sua vida útil no campo.

Diante disso, neste trabalho serão discutidos os mecanismos de formação dos defeitos de trincamento e afundamento, bem como as técnicas de diagnóstico dos mesmos. Vale ressaltar que tais defeitos são os mais comuns que afetam os pavimentos asfálticos e que, somente com um diagnóstico adequado pode-se traçar uma técnica mais eficaz de recuperação ou manutenção de pavimentos.

Em meio a diversas técnicas de diagnóstico de defeitos em pavimentos, optou-se por explorar a técnica de termografia infravermelha, ensaio não destrutivo e não invasivo. O uso da referida técnica requer cuidados que serão levantados na revisão bibliográfica, a fim de se evitar interpretações equivocadas quanto a análise dos termogramas gerados.

A utilização de imagens termográficas de pavimentos asfálticos vem se mostrando uma ferramenta útil na detecção de possíveis anomalias ainda não

observáveis a olho nu. Isto torna a técnica interessante como uma ferramenta de prognóstico de defeitos e identificação de seções problemáticas da estrada, possibilitando que um plano de reparo seja definido com base no prognóstico do defeito, ao invés de apenas quando já se é verificada a manifestação na superfície do pavimento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Análise da aplicabilidade da termografia infravermelha na pavimentação asfáltica.

1.1.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Compreender a importância dos parâmetros termográficos e geométricos nas imagens termográficas;
- ✓ Avaliar a técnica de termografia digital para investigação de defeitos em pavimentos asfálticos;
- ✓ Avaliar a capacidade de previsão de trincas através de amostras pré-trincadas;
- ✓ Determinar a emissividade do pavimento asfáltico analisado e calibração da câmera termográfica FLIR T400;
- ✓ Analisar a aplicabilidade de modelos de previsão de temperatura desenvolvidos no estado do Rio Grande do Sul.

1.2. Justificativa

A temperatura das misturas e pavimentos asfálticos é um dos mais importantes parâmetros a serem considerados no projeto deste tipo de pavimento. Isto se deve ao fato de que ligantes asfálticos serem materiais viscoelástoplásticos e termo sensíveis, ou seja, seu comportamento viscoelastoplástico é dependente da temperatura na qual o material se encontra.

Sendo assim, é fundamental conhecer a temperatura na qual o pavimento se encontrará no campo ao longo da sua vida, pois erros nesta determinação levarão a defeitos precoces que encurtarão a vida de projeto.

Os métodos que possibilitam o prognóstico e manutenção preventiva de possíveis defeitos na pavimentação asfáltica devem ser explorados a fim de se evitar despesas acentuadas com recuperação em casos de degradação avançada. O uso da termografia infravermelha no diagnóstico e prognóstico de defeitos no pavimento vem se mostrando como um Ensaio Não Destrutivo (END) promissor, sendo uma ferramenta rápida, barata e eficaz na detecção de anomalias que ainda não podem ser vistas a olho nu.

Neste sentido a motivação principal para a realização deste trabalho é explorar esta técnica, relativamente nova, estudando sua aplicabilidade na detecção dos principais defeitos que ocorrem frequentemente nos revestimentos asfálticos, antes que os mesmos sejam percebidos na superfície do revestimento asfáltico.

Tendo conhecimento das causas reais de cada problema, pode-se traçar uma medida de restauração ideal para cada situação, reduzindo custos e aumentando a vida útil do pavimento. Assim será levantada a importância de se conhecer o processo de formação de trincas e afundamentos, buscando explicar como se dá sua formação e quais são os principais motivos de sua ocorrência.

1.3. Estrutura e descrição dos capítulos

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, sendo eles Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Discussão e Considerações Finais.

No capítulo 2 está apresentado a Revisão Bibliográfica, abordando os temas de trincamento, afundamento em trilhas de roda, e resumidamente, os métodos de avaliação defeitos em pavimentos asfálticos bem como algumas equações desenvolvidas para previsão de temperatura no mesmo. Este capítulo também trata da termografia infravermelha descrevendo sucintamente sobre seu funcionamento, técnicas de medição, fatores que interferem na medição de temperatura e por último discute-se sua aplicação à pavimentos asfálticos.

O capítulo 3 descreve os materiais utilizados e os métodos empregados para realização deste trabalho. É primeiramente apresentada a definição da câmera termográfica utilizada, os materiais utilizados nos corpos de prova de concreto asfáltico e a delimitação da área de estudo. Posteriormente são indicados os parâmetros que serão considerados para obtenção das imagens termográficas, como se dará o tratamento das imagens térmicas e por fim o cronograma para realização da pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados de um experimento de medição da temperatura de um corpo referencial utilizando a câmera termográfica, além disso expõem-se as imagens térmicas das amostras com trincas induzidas, o processo de determinação da emissividade do revestimento asfáltico e as imagens termográficas do trecho de estudo. Por fim, analisa-se a aplicabilidade de modelos de previsão de temperatura desenvolvidos no estado do Rio Grande do Sul.

No capítulo 5 discorre-se sobre os resultados alcançados no trabalho e as perspectivas referentes a pesquisas futuras com o uso da termografia infravermelha na pavimentação asfáltica, aponta-se as dificuldades e descobertas referentes a esta técnica de investigação de anomalias ocultas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão discutidos os principais defeitos que ocorrem em revestimentos de pavimentos flexíveis, abordando desde de seus mecanismos de formação até os métodos de avaliação dos mesmos. Também serão discutidos modelos de previsão de temperatura do pavimento asfáltico desenvolvidos no Rio Grande do Sul. Além disso será apresentada a técnica de termografia infravermelha e discutidos os fatores que interferem na medição de radiação infravermelha.

2.1. Defeitos em pavimentos flexíveis

Os pavimentos são estruturas complexas, que envolvem um grande número de variáveis, tais como: cargas de tráfego, técnicas construtivas, solicitações ambientais, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais. Pode ser definido como uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, apoiadas sobre a superfície final do terrapleno. O pavimento tem por função essencial resistir aos esforços solicitantes do tráfego de veículos e das ações do meio ambiente, proporcionando aos usuários conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Tradicionalmente o pavimento rodoviário é subdividido em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. De acordo com Balbo (2008), cada camada possui uma ou mais finalidades específicas para garantir condições adequadas de suporte e rolamento para quaisquer condições ambientais. A camada de revestimento deve receber os esforços de cargas estáticas e dinâmicas, transmitindo-os às camadas de base sem sofrer deformações plásticas ou elásticas, além disso recebem diretamente a ação do clima. Devendo ser, portanto, uma camada resistente, impermeável e durável.

Ao longo da vida útil de um pavimento flexível manifestam-se diversas degradações, que contribuem para a redução da qualidade do pavimento, sendo as degradações mais relevantes o trincamento e o afundamento em trilha de roda (BRANCO, 2008). De acordo com Balbo (2007) as degradações requerem um custo de manutenção que crescem exponencialmente com seu grau de deterioração. Partindo deste pressuposto é vantajoso tanto técnico quanto

economicamente que as patologias sejam identificadas e corrigidas em seu estágio inicial de formação.

Segundo o Manual de Conservação Rodoviária (2005), a conservação preventiva periódica apresenta-se como sendo o conjunto de operações de conservação realizada com o objetivo de evitar o surgimento ou agravamento de defeitos. A detecção dos defeitos nos estágios iniciais é uma das tarefas mais importantes da manutenção preventiva, pois trincas e outras fraturas no pavimento, que inicialmente quase não são percebidas pelos usuários, podem evoluir rapidamente e causar sérios problemas quando não receberem o devido tratamento.

2.1.1. Trincamento

Conforme a Norma DNIT 005/2003 as trincas são classificadas como uma fenda existente no revestimento, facilmente visível a olho nu, com abertura superior à da fissura, podendo apresentar-se sob a forma de trinca isolada ou trinca interligada. Representam em geral um dos primeiros sinais aparentes da redução de qualidade do asfalto.

Destaca-se que as fissuras são fendas iniciais, ou seja, ainda não causam problemas funcionais ao pavimento, com isso não são consideradas defeitos graves no método de avaliação da superfície. Contudo não se pode ignorar o fato que a propagação de trincas se inicia pelo fissuramento, onde uma pequena parcela da vida útil de fadiga começa a ser consumida (MIRANDA, 2013).

Bernucci *et al.* (2008), classificam e apontam as possíveis causas de trincas isoladas e interligadas, exemplificadas na Figura 1, da seguinte maneira:

- Trincas Longitudinais Curtas (TLC) (a): ocorrem devido a erros nas etapas construtivas e pelo envelhecimento do ligante asfáltico;
- Trincas Longitudinais Longas (TLL) (b): surgem devido a falhas construtivas e recalques diferenciais. Seu surgimento também pode estar associado junto à trilha de roda ou como falha de juntas longitudinais de diferentes frentes de compactação. Envelhecimento do ligante asfáltico;
- Trincas tipo couro de jacaré com erosão (JE) (c) e trincas tipo couro de jacaré (J) (d): inúmeros motivos podem gerar o trincamento couro de jacaré, entre elas: ação da repetição de cargas do tráfego; ação climática;

envelhecimento do ligante; rigidez excessiva do revestimento em estrutura com elevada deflexão; reflexão de trincas de mesma natureza; recalques diferenciais; entre outros. Podem aparecer em trilhas de roda, localizadamente, junto às bordas ou de forma generalizada;

- Conjunto de trincas longitudinais longas (e): trincas resultantes da ação de umedecimento da base por infiltração de água pelos acostamentos não protegidos e ação conjunta do tráfego;
- Trinca de retração térmica (f): surgem em ambientes sujeitos a baixas temperaturas.

Figura 1 - Tipos comuns de trincas



(a) Trincas longitudinais curtas (TLC)



(b) Trincas longitudinais longas (TLL)



(c) Trincas tipo couro de jacaré com erosão (JE)



(d) Trincas tipo couro de jacaré de jacaré (J)



(e) Conjunto de trincas longitudinais longas



(f) Trincas de retração térmica

Fonte: Bernucci et al. (2008, p. 417 a 418)

Em resumo do apresentado anteriormente pode-se concluir que as trincas se formam, na maioria das vezes, devido a erros no processo construtivo, excesso de carga do tráfego e envelhecimento do ligante. Também são fatores importantes para a formação deste defeito a ação da umidade, recalque diferencial e condições ambientais extremas como elevadas variações de temperaturas.

O surgimento das trincas ocorre na fibra inferior da camada de concreto asfáltico e estas então propagam-se progressivamente para a superfície, (ALBANO, 2005). Vale ressaltar a importância de se compreender as causas que levam a origem de cada tipo de trinca e sua correlação com o surgimento de outros tipos de defeitos, a fim de se buscar o projeto adequado de restauração ou gerência de manutenção.

De acordo com Miranda (2013), a propagação de trincas no revestimento asfáltico, resultantes de variadas solicitações, tem sua formação, em geral, resultado de três etapas, com mecanismos diferentes:

- a) Início do fissuramento, onde apenas pequena parcela da vida de fadiga é consumida;
- b) Crescimento estável da trinca, que corresponde à maior parcela da vida de fadiga;
- c) Propagação instável da trinca, que culmina na ruptura.

De acordo com Gonçalves (2002), o tempo que a trinca leva para aparecer na superfície aumenta proporcionalmente a espessura da camada de revestimento. Outro fator importante para a propagação de uma trinca é a natureza dos materiais que compõem a camada de revestimento, visto que a trinca propaga-se mais rapidamente através de um material mais friável. O autor destaca também que as principais causas que contribuem para o início e propagação das trincas são as cargas do tráfego, a variação de temperatura e a variações de umidade do solo.

Embora o trincamento por si só não constitua um defeito que cause riscos ao conforto e segurança do usuário, desde que em pequena extensão, as trincas podem facilitar a formação de defeitos mais graves no pavimento, como as panelas. Devido ao fato de que através das trincas a água penetra nas camadas inferiores com maior facilidade, acaba propiciando também a formação de afundamentos localizados (BASTOS, 2010).

Ainda de acordo com Bastos (2010), o trincamento indica uma falha que compromete todo o sistema estrutural do pavimento, uma vez que sua ocorrência leva a deficiência do conjunto de camadas que constituem o pavimento. Portanto a avaliação da gravidade das trincas existentes no revestimento asfáltico representa um critério significativo para se determinar projetos de restauração e reforço de pavimento.

Tal fato representa o principal motivo para se buscar compreender o processo de formação do defeito de trincamento. Quando sabe-se tais informações pode-se adotar práticas que sejam realmente eficazes para evitá-lo ou ao menos atrasar o seu surgimento, prolongando a vida útil dos pavimentos.

2.1.2. Afundamento

O afundamento é um dos defeitos mais comumente verificados nos pavimentos asfálticos. Trata-se de um defeito extremamente indesejado por vários motivos, dentre eles: acúmulo de água na pista levando ao risco de derrapagem dos veículos e dificuldades de ultrapassagem ao longo da via (GUIMARÃES, 2009). De acordo com Silva (2008), afundamentos são deformações permanentes, caracterizadas por depressão longitudinal da superfície do pavimento, podendo ser plásticas ou de consolidação.

Os afundamentos plásticos são devidos à deformação plástica de uma ou mais camadas do pavimento e/ou do subleito e apresentam elevações ao longo dos lados do afundamento. Quando sua extensão for de até 6 m, denomina-se Afundamento Plástico Local (APL), quando apresentar extensão maior que 6 m, é denominado de Afundamento Plástico na Trilha (APT) (SILVA, 2008).

Os afundamentos de consolidação são devidos a consolidação diferencial que ocorre em camadas do pavimento e/ou do subleito. Quando sua extensão for de até 6 m, denomina-se Afundamento de Consolidação Local (ACL), quando apresentar extensão maior que 6 m, é denominado de Afundamento de Consolidação na Trilha (ACT) (SILVA, 2008).

De um modo geral, em um pavimento rodoviário, o tráfego dos veículos se concentra numa determinada região do pavimento. Tendo em vista a largura da faixa de rolamento em relação à largura dos veículos comerciais, esta região torna-se mais solicitada devido a concentração de tensões, formando o defeito conhecido como afundamento de trilha de roda (ATR) (MIRANDA, 2013).

A Figura 2 ilustra três exemplos de deformação permanente. A mesma está dividida em (a) Afundamento por Consolidação em Trilha de roda (ACT); (b) Afundamento por Consolidação Local (ACL); (c) Afundamento Plástico na Trilha (APT) (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Figura 2 – Tipos comuns de afundamentos



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008, p. 419)

Conforme Miranda (2013), afundamentos em fase inicial são praticamente imperceptíveis, sendo notados apenas em ocorrências de chuvas através do acúmulo de água. Miranda (2013) ressalta ainda que a presença significativa de

ATR pode levar ao comprometimento estrutural do pavimento e, também elevar o potencial para a ocorrência de aquaplanagem dos veículos.

A deformação permanente em trilha de roda é ao mesmo tempo uma deformação viscosa do ligante asfáltico e deformação plástica da estrutura mineral da mistura. Portanto, tanto o ligante como o agregado tem seu papel fundamental no comportamento mecânico da mistura, o ligante devido sua consistência e reologia e o agregado com as forças de atrito interna entre suas partículas (JOLIET; MALOT 2000, *apud* MOURA 2010).

As irregularidades superficiais causadas por deformação permanente em trilha de roda, podem ocorrer através de mecanismos que atuam isoladamente ou em conjunto. Moura (2010) descreve os principais mecanismos de deformação permanente da seguinte forma:

- A deformação permanente estrutural é resultado do subdimensionamento das camadas do pavimento diante à ação do tráfego. Também podem estar ligadas a erros no processo construtivos, bem como drenagem insuficiente e falta de suporte do subleito.
- A deformação permanente causada por fluência do ligante asfáltico, deve-se a problemas de dosagem da mistura asfáltica, estando associada a combinação inapropriada dos materiais constituintes da mistura.

Moura (2010) comenta que as análises de deformação permanente na mecânica de pavimentos, em geral, dão enfoque as deformações provenientes da repetição de carga no subleito, por ser a camada mais sensível a este problema, especialmente em regiões em que o solo não apresenta bom suporte de carga. De acordo com Gonçalves (2002), a previsão da evolução do afundamento em trilha de roda é um problema bastante complexo, pois o mesmo requer o conhecimento detalhado das características de estado dos materiais e da deformabilidade elástica, plástica e de viscosidade dos diferentes materiais que formam as camadas do pavimento.

Para Nascimento (2008), dependendo da magnitude das cargas do tráfego e da resistência relativa das camadas do pavimento, a deformação permanente pode ocorrer no subleito, nas camadas de base ou nas camadas asfálticas utilizadas como revestimento. O autor afirma que a vulnerabilidade de cada camada varia com a época do ano, exemplificando que a deformação permanente no revestimento asfáltico é mais comum durante os meses quentes

do verão do que no inverno, enquanto que as camadas granulares de base se tornam mais susceptíveis aos afundamentos em épocas chuvosas.

Ainda segundo Nascimento (2008), destaca-se que outro fator importante é o nível de tensão numa camada individual do pavimento. Sendo que este nível de tensão é em função das espessuras das camadas e dos materiais utilizados, e também das cargas aplicadas pelos veículos pesados.

2.1.3. Métodos de avaliação dos defeitos de superfície

O processo de avaliação de um pavimento consiste em um conjunto de atividades destinadas à obtenção de dados, informações e parâmetros que permitem identificar o problema e interpretar o desempenho apresentado pelo pavimento. De forma que se possa detectar as suas necessidades atuais e futuras de manutenção e ainda pressupor as consequências da implantação de determinada alternativa de manutenção (GONÇALVES, 2007).

Os diagnósticos das condições do pavimento iniciam a partir da avaliação dos defeitos de superfície, nesta avaliação deve-se considerar a extensão, a frequência e a severidade dos defeitos existentes. Rodrigues (2015) caracteriza os defeitos quanto aos seguintes itens:

- Tipo de defeito: trincas, exsudação, desgaste escorregamento, erosão de bordo, bombeamento de finos, remendo e painelas, afundamentos;
- Intensidade: grau com que um defeito afeta a estrutura do pavimento ou compromete seu desempenho. É usual avaliá-la como baixa, média ou elevada. Por exemplo, nas trincas, a avaliação se dá de acordo com sua extensão no pavimento e o valor da área de abrangência;
- Gravidade: medida do grau da evolução do defeito. No caso das trincas, a gravidade está relacionada com a sua abertura;
- Frequência: distribuição do defeito ao longo de um segmento ou trecho da rodovia, representada pela relação percentual entre o número de estacas onde ocorre o defeito e o número total de estacas existente dentro do segmento;
- Extensão: área ocupada pelo defeito em uma determinada estaca, por exemplo, porcentagem de área trincada.

2.1.3.1 Levantamento manual e levantamento automatizado

Para avaliar a superfície de um revestimento asfáltico, conta-se com os processos de levantamento manual e com levantamento automatizado. No primeiro processo, somente parte da superfície é avaliada, a amostra pode variar de 10 a 25% do tamanho do trecho avaliado. Já no processo automatizado, a avaliação é feita a partir de um veículo equipado com câmeras fotográficas e/ou de filmagens e outros equipamentos para medição de defeitos (HAAS *et al.*, 1994).

Quanto ao levantamento manual, pode ser realizado a pé ou no interior de um veículo trafegando numa velocidade baixa. O DNER (1998) estabelece que a velocidade esteja na faixa de 5 a 30 km/h. Para os métodos que utilizam veículos, é recomendado que a equipe de avaliadores desça do veículo em intervalo constante e/ou quando a condição do pavimento sofra alterações. Os defeitos obtidos podem ser registrados em planilhas padronizadas de papel ou eletrônica (CUNHA, 2008).

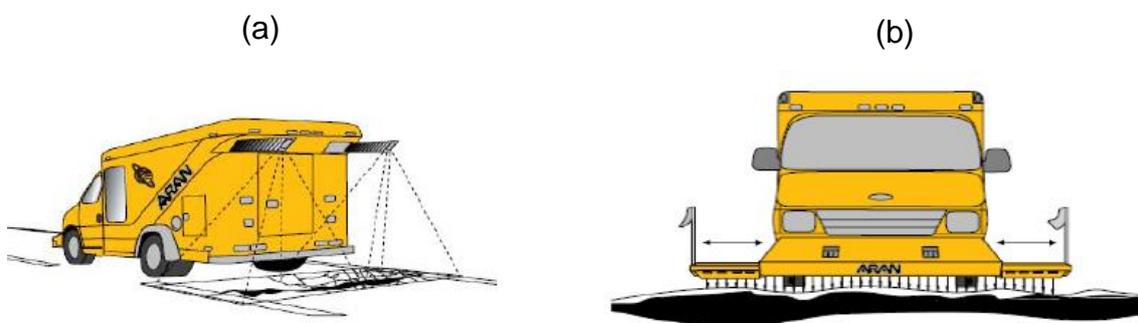
Nos levantamentos automatizados, os veículos são aparelhados com equipamentos especiais dotados de câmeras de vídeo-filmagem e também fotográficas. A velocidade do veículo varia entre 30 km/h e 110 km/h. O estado do pavimento é registrado por meio das câmeras, possibilitando uma posterior análise no escritório a partir do monitor do vídeo. Com este levantamento facilita-se a integração das imagens com os dados de construção dos pavimentos, o que promove uma melhor identificação do tipo e severidade do defeito (BENEVIDES, 2006).

A Norma DNIT 008/2003 estabelece que os equipamentos devam ser instalados na frente ou atrás dos veículos, assim realizando um Levantamento Visual Contínuo (LVC). Existem diversos equipamentos para levantamento automático, dentre os quais destacam-se o GERPHO *System* e o ARAN. O GERPHO *System* registra as condições de superfície através de fotografias em filmes de 35 mm, sendo instalado em uma camioneta (CUNHA, 2008).

Já o sistema ARAN (*Automatic Road Analyser*), ilustrado na Figura 3, é um equipamento que permite observação global dos pavimentos, sua função essencial é integrar bases de dados de sistemas de gestão da rede com o intuito de determinar índices de qualidade de pavimentos. O mesmo permite ser

equipado de acordo com o que se pretende observar nos pavimentos (ALVES, 2007).

Figura 3 – Sistema de vídeo (a) e sistema de determinação de irregularidade transversal (b)



Fonte: Alves (2007, p. 70)

As câmeras termográficas podem se enquadrar no tipo de levantamento automatizado ou manual, podendo ser acoplada a um veículo, conforme exemplo da Figura 4, ou ser operada manualmente gerando uma série de imagens e vídeos que são posteriormente analisados de acordo com os diferenciais de temperatura de cada área considerada.

Figura 4 - Veículo equipado com câmera termográfica



Fonte: Saarenketo, Matintupa e Varin (2012, p. 139)

2.2. Modelos de previsão de temperatura no pavimento asfáltico

A temperatura na qual o pavimento se encontrará em campo é fator determinante na escolha do tipo de ligante asfáltico a ser utilizado na mistura

asfáltica. A má escolha sobre o tipo de ligante a ser utilizado poderá ter sérias influências no desempenho e vida útil do pavimento asfáltico, visto que as misturas asfálticas podem apresentar um comportamento mais viscoso ou mais elástico em função da temperatura a qual está submetido.

Diversas pesquisas já foram realizadas com o intuito de se criar modelos de previsão de temperatura de pavimentos em função da temperatura do ar, das quais pode-se citar Motta (1991), que em sua tese de doutorado, desenvolveu diferentes equações para cada região do Brasil. Para a região sul, que é o caso do estudo, apresentou duas equações. A Equação 1 é utilizada para concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), cujas temperaturas foram medidas entre 3 e 4 cm de profundidade, em camadas de até 6 cm de espessura, para temperaturas do revestimento entre 14 °C e 60 °C e para temperaturas do ar entre 12 °C e 37 °C.

$$T_{rev} = - 6,51 + 1,61 T_{ar} \quad \dots (1)$$

Para as profundidades entre 5 e 7 cm, em revestimentos com espessura entre 8 e 11,5 cm, Motta (1991) apresentou a Equação 2, sendo que a temperatura do revestimento deve estar entre 13 °C e 63 °C e a temperatura do ar deve estar entre 8 °C e 39 °C.

$$T_{rev} = -1,18 + 1,45 T_{ar} \quad \dots (2)$$

Kilpp (2004), realizou estudo semelhante com o propósito de obter modelos de correlação da temperatura do pavimento com a temperatura do ar, para as cidades de Ijuí e Sobradinho. A pesquisa realizada foi do tipo quantitativa, sendo que os dados coletados, através de medições, foram submetidos à análise estatística. De acordo com Kilpp (2004), para a realização deste trabalho foram feitos oito furos em pavimentos flexíveis, executados com misturas asfálticas, dos quais quatro foram feitos na cidade de Ijuí e quatro na cidade de Sobradinho.

Adotou-se o procedimento de que a cada quatro furos, um par estivesse exposto ao sol, enquanto que o outro par à sombra, em ambas as cidades. Cada par de furos era composto por um furo de 2 cm de profundidade e outro de 5 cm

de profundidade. Também foram medidas as temperaturas da superfície do pavimento no sol e na sombra (KILPP, 2004). Com isso foram definidas as Equações 3 e 4, para determinar a temperatura máxima e mínima da superfície em clima subtropical, respectivamente:

$$T_{\text{sup}} = -0,72 + 1,34 T_{\text{ar}} \quad \dots (3)$$

$$T_{\text{sup}} = 0,78 + 1,11 T_{\text{ar}} \quad \dots (4)$$

Esse modelo, de acordo com a autora, atende com boa precisão as previsões de temperatura em regiões de clima subtropical. Entretanto, apesar de possuírem um erro significativo (R^2 baixo), há uma boa distribuição de dados entre 17 e 27 °C, o que valida o modelo apenas para este intervalo.

2.3. Termografia infravermelha

Neste tópico será apresentado a técnica de termografia infravermelha. Primeiramente será mencionado um breve histórico da termografia, logo após serão descritos os conceitos básicos de funcionamento da técnica e os cuidados que devem ser tomados para realização de imagens térmicas.

2.3.1. Breve histórico

O sistema de imageamento térmico surgiu a pouco mais de 200 anos, com a descoberta dos raios infravermelhos por Frederick William Herschel em 1800. Posteriormente Jonh Herschel, por volta de 1840, produziu a primeira imagem infravermelha por meio da técnica evaporográfica, que consiste na evaporação do álcool obtido de uma superfície pintada com carbono (HOLST, 2000).

De acordo Cortizo (2007), a técnica seguiu a trajetória histórica exibida no Quadro 1, mostrando que a partir da década de 90 o sistema de imageamento infravermelho esteve diretamente ligado aos avanços tecnológicos da eletrônica e da computação. Dessa forma, tornando-se possível o imageamento em tempo real e melhorias nos equipamentos de captura e tratamento de imagem.

Quadro 1- Linha histórica da evolução da termografia

Época	Evento
1950	Os primeiros radiômetros.
1960	Os primeiros sistemas de infravermelho imageadores (termovisores).
1970	Os visores térmicos, sem a determinação de temperatura, somente a detecção qualitativa.
1980	Aprimoramento na ótica e a utilização de circuito integrado, permitindo redução de peso e volume dos equipamentos. Em especial no ano de 1985, os detectores resfriados termoeletricamente, substituindo os equipamentos que utilizavam o nitrogênio líquido.
1990	Introdução do <i>Charge Coupled Device</i> (CCD) e logo após o <i>Focal-Plane Array</i> (FPAs), permitindo a realização de centenas de imagens por segundo com alta resolução e grande sensibilidade.

Fonte: Cortizo (2007, p 38)

2.3.2. Conceitos gerais

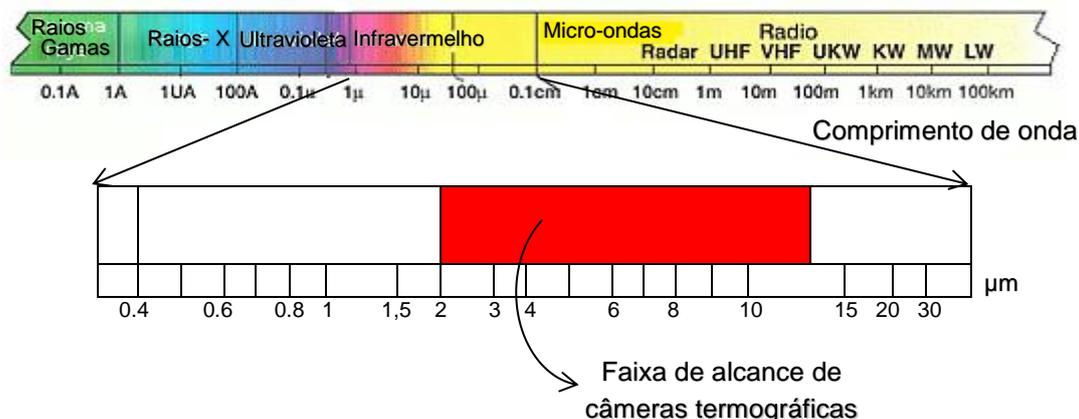
Para se ter o entendimento básico sobre a medição de temperatura por radiação infravermelha primeiramente é preciso conhecer os fundamentos essenciais sobre o espectro eletromagnético e os raios infravermelhos. Todos os corpos absorvem e emitem constantemente radiações eletromagnéticas devido a agitações internas da matéria, são através dessas perturbações vibratórias elétricas e magnéticas que a energia se propaga (BARREIRA, 2004).

A termografia consiste fundamentalmente na percepção da temperatura superficial de um corpo, visto que todo corpo com temperatura acima do zero absoluto (-273,15 °C ou 0 K) emite radiação térmica. A técnica pode ser definida como um método de ensaio não destrutivo sem contato, utilizada para medição de temperatura de qualquer tipo de material (CORTIZO, 2007).

Para Barreira (2004), o espectro eletromagnético abrange uma vasta gama de comprimento de onda, mas apenas uma pequena parcela é perceptível ao olho humano, a Figura 5 exemplifica essa divisão. Os raios infravermelhos abrangem uma gama de valores que variam entre 0,75 a 1000 µm, subdivididos

em infravermelhos próximos (0,75 a 1,5 μm), médios (1,5 a 20 μm) e extremos (20 a 1000 μm). As câmeras termográficas trabalham no intervalo de comprimento de onda médio, com alcance espectral de 2 a 13 μm .

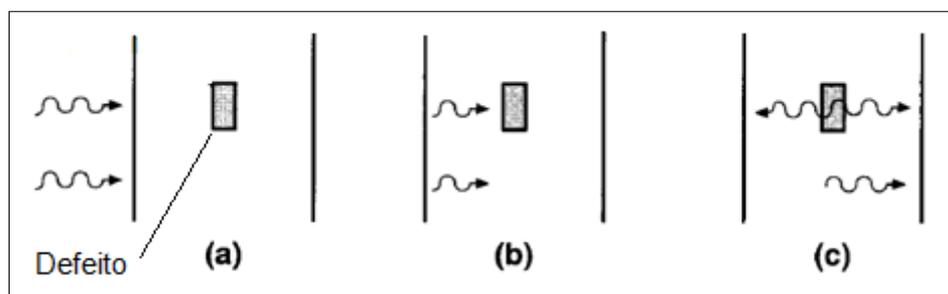
Figura 5 - Espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Barreira (2004) e Manual do Utilizador (2010)

Com essa medição de temperatura, objetiva-se correlacionar as informações obtidas com uma provável anomalia existente na parte interna do material. Holst (2000), afirma que deverá haver diferença de temperatura entre o alvo e o meio, e isso justifica-se pela forma diferente de propagação do calor num material quando esta encontra um defeito. Na Figura 6 tem-se uma representação esquemática de como esse fenômeno ocorre.

Figura 6 - Propagação de calor



Fonte: Adaptado de Holst (2000)

A Figura 6 demonstra a propagação idealizada de um único pulso de calor em um material: (a) A fonte de energia é aplicada à superfície; (b) A onda de calor percorre dentro do material e encontra um defeito; (c) O defeito reflete parcialmente e transmite parcialmente a energia recebida.

2.2.2. Fatores que influenciam na medição de radiação infravermelha

Mesmo com a simplicidade da termografia a análise dos resultados pode ser complicada e até mesmo conduzir a conclusões erradas se alguns parâmetros não forem devidamente considerados. Neste item será discutido a interferência dos principais fatores a serem considerados durante a realização de um ensaio termográfico.

2.2.2.1 Emissividade dos materiais

A emissividade pode ser definida como a capacidade que o material apresenta de radiar energia em comparação a de um “corpo negro” perfeito. Um corpo negro perfeito é um corpo que absorve toda a luz recebida e não reflete nenhuma, logo apresenta emissividade (ϵ) igual a 1. Constitui o principal parâmetro do objeto a ser definido corretamente. Geralmente os objetos possuem uma gama de emissividade que varia de 0,1 a 0,95 (FLIR SYSTEMS, 2010).

A maioria dos materiais de construção possuem valores de emissividade entre 0,85 a 0,95, o concreto asfáltico possui valores altos de emissividade, variando de 0,94 a 0,97. De acordo com Trichês *et al.* (2007), um valor comum para de emissividade de um revestimento asfáltico, em temperatura ambiente, é de 0,95.

2.2.2.2 Ângulo de observação

De acordo com Barreira (2004), a variação da emissividade de uma superfície em relação ao ângulo de observação faz com que superfícies inclinadas apresentem uma emissividade aparente que varia de ponto a ponto mesmo que não haja alteração no material.

Quanto ao ângulo de observação no momento da realização de imagens térmicas, o mais recomendado é que se mantenha uma ortogonalidade entre a superfície analisada e o campo de visão (CASTRO *et al.*, 2016). Outra consideração a ser feita é a variação de emissividade devido a irregularidades, sujeiras ou manchas na superfície, fato bem comum em medição de grandes

áreas e que não devem ser consideradas no momento da análise dos termogramas (MENDONÇA, 2005).

2.2.2.3. Condições atmosféricas

A temperatura ambiente é um parâmetro que gera controvérsias com relação a sua importância na medição de infravermelhos. Para Mendonça (2005), tal critério é pouco significativo na precisão do teste, isso por que o importante é a velocidade com que uma superfície sofre aquecimento ou arrefecimento. Portanto, o cuidado que se deve ter quanto a temperatura é de não se realizar medições em extensão de período que gere alto contraste de temperatura.

Castro *et al.* (2016), ao contrário de Mendonça (2005), salienta que análises de inspeções termográficas devem levar em conta a temperatura ambiente. O autor afirma que combinado com outras influências estáveis, um aumento da temperatura ambiente resultará em um aumento da temperatura da anomalia e dessa forma, falhas têm uma maior probabilidade de ocorrerem durante temperaturas ambientais mais altas.

Quanto as demais variáveis ambientais Mendonça (2005) e Castro *et al.* (2016) fazem as seguintes observações:

- Velocidade do vento: deve ser considerado por favorecer o rápido resfriamento de superfícies, em decorrência disso as medições termográficas só devem ser realizadas com velocidades de vento inferiores a 25 km/h;

- Umidade relativa do ar: sua consideração se deve ao fato que umidade alta além de causar redução da transmitância atmosférica também tende a dispersar o calor na superfície e a “esconder” os diferenciais térmicos. As medições não devem ser efetuadas quando a umidade estiver acima do limite de saturação, sob chuva ou ainda após a ocorrência imediata de chuva.

2.2.3 Técnicas de termografia digital

Segundo Maldague (2001, *apud* CORTIZO 2007), existem duas técnicas de termografia digital: ativa e passiva. A técnica de termografia passiva é caracterizada pela não utilização de um estímulo de energia “artificial”. O

estímulo só ocorre por meio da carga solar ambiental atuante sobre o corpo. Neste caso, deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio ambiente onde ele está inserido.

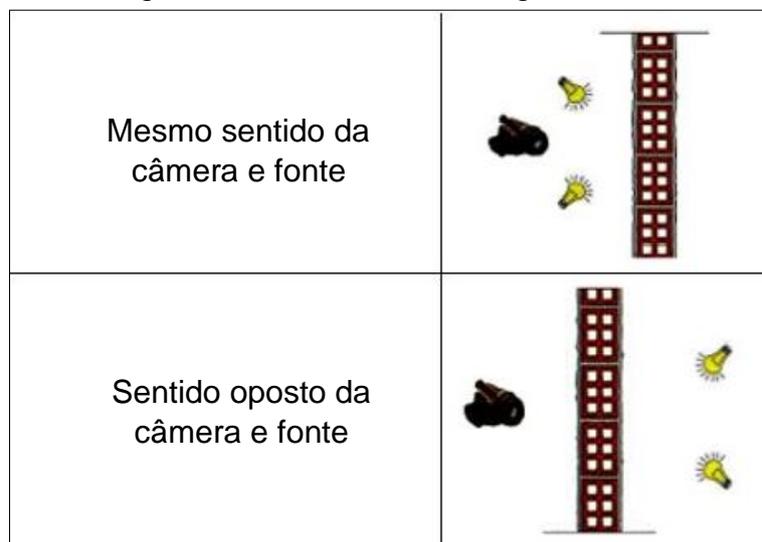
Na termografia ativa a principal característica é a aplicação de um estímulo de energia sobre o corpo. A energia aplicada sobre uma superfície pode ser realizada através de uma fonte de calor ou de uma fonte de frio. Em qualquer dos casos o objetivo será a produção de um diferencial térmico no corpo. Nas Figuras 7 e 8 tem-se um desenho ilustrativo de ambas as técnicas.

Figura 7 - Técnica de termografia passiva



Fonte: Adaptado de Cortizo (2007)

Figura 8 – Técnica de termografia ativa



Fonte: Adaptado de Cortizo (2007)

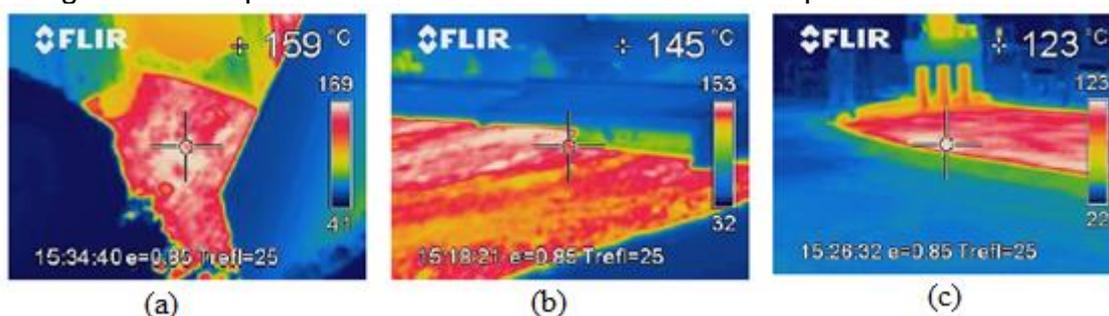
A termografia passiva apresenta carácter qualitativo, uma vez que expõem indicativos de anomalias, enquanto que o processo de estímulo térmico tende a ter um carácter quantitativo, pela possibilidade de medir e controlar os parâmetros (fonte, tempo, intensidade e distância) (MENDONÇA, 2005).

2.4. Termografia infravermelha aplicada à pavimentos asfálticos

A termografia infravermelha ainda é pouco utilizada para detecção de defeitos em pavimentos asfálticos. No Brasil destaca-se o trabalho de Trichês *et al.* (2007), os quais utilizaram uma câmera infravermelha para efetuar medições da temperatura da mistura asfáltica em diferentes momentos do processo construtivo, tendo como objetivo a partir dos resultados obtidos, avaliar a sua adequabilidade quando comparada aos métodos tradicionalmente utilizados.

A Figura 9 representa um termograma realizado em cada etapa construtiva: (a) verificação de temperatura na entrada da vibro acabadora; (b) verificação da temperatura na saída da vibro acabadora; (c) verificação de temperatura na rolagem.

Figura 7 - Temperatura da mistura asfáltica durante o processo construtivo



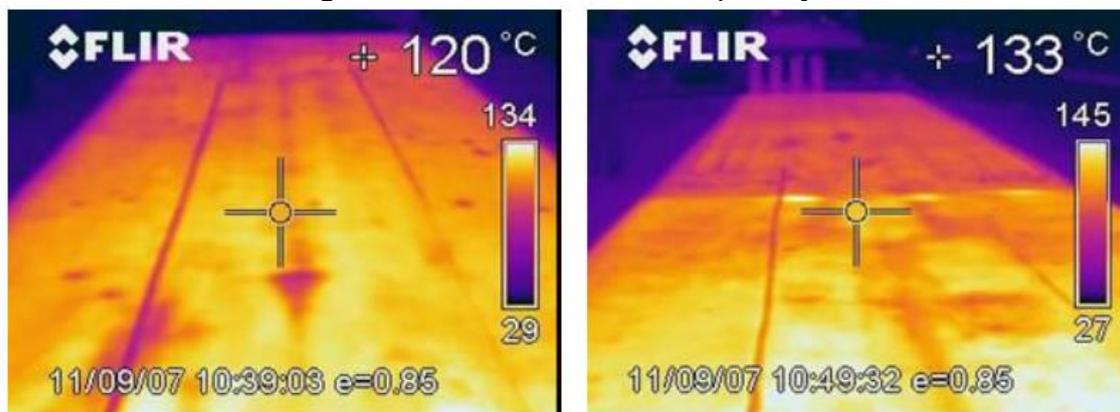
Fonte: Trichês et al. (2007, p. 9)

Para esta pesquisa os autores compararam os valores de temperatura fornecidos pela câmera infravermelha, pelo termômetro infravermelho e pelo termômetro de mercúrio. Com isso concluíram que houve grande proximidade dos dados de temperatura obtidos com o termômetro de mercúrio em relação aos obtidos com a câmera termográfica, indicando que a câmera infravermelha pode ser utilizada para controle de temperatura da mistura asfáltica durante o processo construtivo (TRICHÊS *et al.*, 2007).

Outro fato interessante levantado pela pesquisa realizada por Trichês *et al.* (2007), foi a identificação da formação de juntas frias, demonstrado na Figura 10. Conforme já discutido nos tópicos anteriores sobre a formação dos defeitos de trincamento e afundamento essas juntas são apontadas como uma das possíveis causas para a formação de trincas longitudinais longas e até mesmo afundamento em trilha de roda, dessa forma poder identificar os pontos de

ocorrência dessas juntas em processo construtivo é mais uma vantagem do uso de câmeras termográficas.

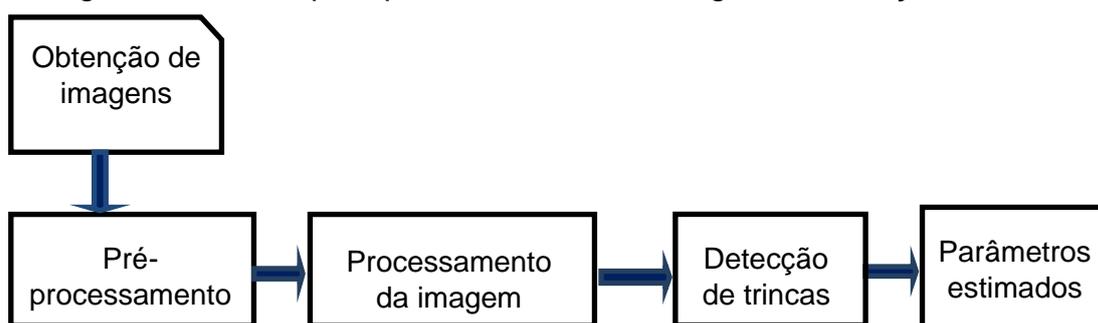
Figura 8 - Juntas frias de compactação



Fonte: Trichês *et al.* (2007, p. 16)

Mohan e Poobal (2017), realizaram uma análise crítica sobre a detecção de trincas utilizando o sistema de imagens térmicas, para tal tomou-se como base 50 trabalhos de pesquisa relacionados à detecção de trincamento e, essas pesquisas foram revistas. Com base nesta revisão, pode-se compreender melhor as técnicas de processamento de imagens, objetivos, nível de precisão e nível de erro em um conjunto de dados de imagens térmicas, elaborando-se um roteiro para realização do processamento de imagem, conforme a Figura 9.

Figura 9 - Roteiro para processamento de imagens e detecção de trincas



Fonte: Mohan e Poobal (2017, p. 2)

Em suas análises os autores discutiram sobre diversas técnicas de processamento de imagens térmicas até então utilizadas. Rodrigues *et al* (2016), propuseram um método de termografia infravermelha com base na retificação de imagem térmica com a extração de isotermas. De maneira que detecção de

fissuras, bem como a caracterização geométrica e orientação da trinca para auxiliar a previsão da direção da propagação do trinca através do material.

Assim como o exemplo mencionado acima, diversos autores citados na pesquisa de Moham e Poobal (2017), também utilizaram do método de processamento de imagens com o uso de algum algoritmo que promove a retificação das imagens com o entalhe das irregularidades facilitando caractrezação geométrica dos defeitos e sua classificação de acordo com seu padrão.

Com o levantamento da pesquisa os autores comentam sobre as limitações da técnica de termografia infravermelha, uma delas é que a medição na direção transversal não apresenta suficiente precisão em comparação com as medidas longitudinais da profundidade da fenda. Normalmente, para analisar a propagação da trinca, a direção longitudinal é mais representativo que direção transversal. Outro problema é a impossibilidade de prever a profundidade das fissuras, devendo então se usar um algoritmo adequado para destacar contornos da imagem melhorando a precisão e a eficiencia da técnica.

Voltando-se a termografia infravermelha utilizada no mapeamento de defeitos em pavimentos asfálticos, Saarenketo, Matintupa e Varin (2012), realizaram testes de alta precisão com câmeras termográficas e chegaram a resultados precisos e acurados referentes ao mapeamento de degradação do pavimento. A fissura, por exemplo, parece formar-se um pouco abaixo da superfície do pavimento e essas fissuras podem ser vistas com câmeras térmicas antes de se tornarem visíveis a olho nu, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Detecção de trinca com câmera termográfica



Fonte: Saarenketo, Matintupa e Varin (2012, p. 141)

A análise da câmera térmica também mostra o efeito do bombeamento de água através do pavimento devido ao carregamento pesado de veículos, tal efeito pode ser visto na Figura 11. Usando a câmera térmica a temperatura da superfície da estrada pode ser mapeada. A presunção é que a temperatura da superfície das áreas danificadas é diferente da temperatura da superfície das áreas sem danos. Isso é causado por uma anomalia do teor de água ou ar no material (SAARENKETO; MATINTUPA; VARIN, 2012).

Figura 11 - Exemplo da formação de trincas no pavimento



Fonte: Saarenketo, Matintupa e Varin (2012, p. 142)

O problema com câmeras térmicas digitais de alta precisão é que elas não são suficientemente rápidas para serem consideradas um método de coleta de dados de pavimentos em alta velocidade. Outro problema é que a coleta de dados não pode ser realizada durante o dia porque a luz solar direta afeta muito os resultados e, assim, as pesquisas de câmeras térmicas são sempre realizadas após o pôr-do-sol.

As palavras-chave no gerenciamento de condições rodoviárias modernas, econômicas e sustentáveis são: foco e manutenção preventiva. Dessa forma, ao se concentrar em seções problemáticas da estrada, encontra-se as razões para o problema e seleciona-se melhores medidas de reparos com base no diagnóstico, em vez de apenas consertar os sintomas, podendo assim gerar economia e aumentar a vida útil de um pavimento (SAARENKETO; MATINTUPA; VARIN, 2012).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo estão descritos os materiais e métodos utilizados para realização deste trabalho. Está apresentado o tipo de câmera térmica utilizada, a localização da área de estudo em campo, o método de determinação de emissividade do pavimento asfáltico analisado e demais parâmetros que serão considerados para obtenção das imagens térmicas.

3.1. Materiais

3.1.1. Câmera termográfica infravermelha

A análise será realizada com o uso da câmera termográfica FLIR T400, exibida na Figura 12. Este equipamento é capaz de detectar a radiação emitida pelos diferentes objetos e transformá-la em uma imagem visível ao olho humano (FLIR Systems, 2017).

Figura 12 - Câmera termográfica T400



Fonte: Acervo do autor (2018)

As principais características técnicas da câmera em questão estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Características técnicas da câmera

Resolução da imagem:	320 x 240 pixels
Total de pixels:	76.800
Amplitude de temperatura:	-20 a 1.200 °C
Sensibilidade térmica:	2 < 0,05 °C
Precisão:	+/- 2% ou 2 °C

Fonte: Adaptado de FLIR Systems (2017)

3.1.2. Amostras laboratoriais

Buscou-se empregar amostras com uma distribuição granulométrica bem graduada, com adequada proporção de agregados a fim de se obter uma mistura asfáltica densa e com reduzido índice de vazios. Na Tabela 1 tem-se a distribuição granulométrica das misturas das amostras utilizadas na análise realizada no laboratório. Já na Tabela 2 estão apresentadas as informações da dosagem das misturas destas amostras, realizada através da metodologia de dosagem SUPERPAVE no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

Tabela 1- Granulometria

Peneira	mm	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó de Pedra	Cal
1 1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	100	100	100	100
3/4"	19,1	95	100	100	100
1/2"	12,7	42,7	100	100	100
3/8"	9,5	14	97,7	100	100
n 4	4,8	1,3	22	99	100
n 10	2	0,8	4	66,5	100
n 40	0,42	0,7	3	31,5	100
n 80	0,18	0,5	2,1	19	96,7
n 200	0,075	0,4	1,5	9	84,2

Fonte: Barboza Junior (2018)

Tabela 2- Dosagem SUPERPAVE

Propriedades da Mistura		
<u>Propriedade</u>	<u>AASHTO M 323/2013</u>	<u>Valor de Projeto</u>
<i>Teor de Ligante (%)</i>	--	3,75
<i>Volume de Vazios (%)</i>	4,0	4,00
<i>Relação Betume Vazios (%)</i>	65 a 75	67,32
<i>Vazios do Agregado Mineral (%)</i>	>13	13,02
<i>G_{mm} Rice (g/cm³)</i>	--	2,46
<i>Massa Específica Aparente (g/cm³)</i>	97%	2,35

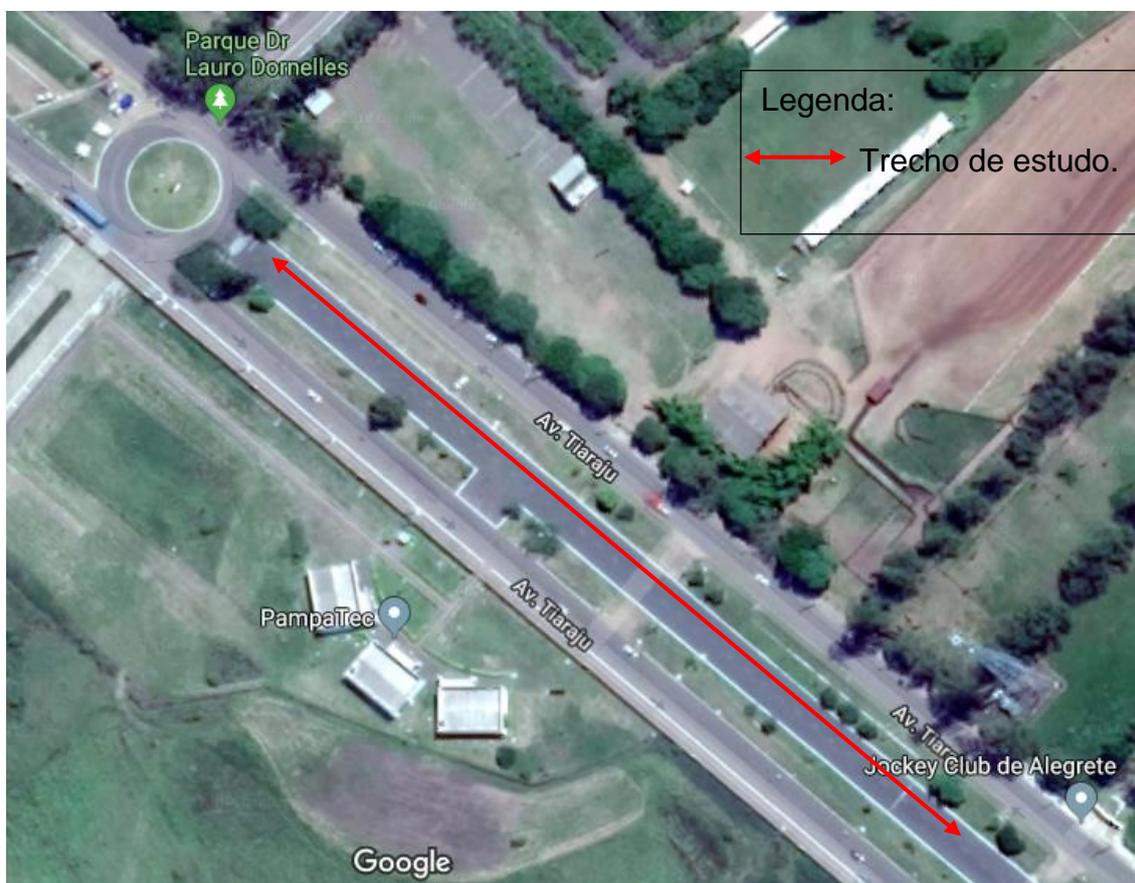
Fonte: Barboza Junior (2018)

As amostras utilizadas na análise da previsão de trincas foram fornecidas pelo laboratório de materiais de construção civil da UFSM. Estas amostras são provenientes de moldagens com fim de realização de ensaios de módulo dinâmico e que já serviram o seu propósito, tipo de ensaio não destrutivo, portanto as amostras utilizadas não apresentavam nenhum dano ou fissura.

3.1.3. Área de estudo a campo

Neste estudo optou-se por selecionar um trecho em bom estado de conservação da camada de revestimento asfáltico, a fim de se investigar a instauração de defeitos em seu estágio inicial. O trecho de estudo constitui um segmento de 400 metros na pista multiuso, localizada entre a Avenida Tiaraju, em Alegrete/RS, exibido na Figura 13. Conforme dados obtidos através do projeto de pavimentação asfáltica deste trecho, o revestimento asfáltico constituiu-se de uma camada de concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), com espessura de 6 centímetros.

Figura 13 - Identificação da área de estudo



Fonte: Adaptado de Google Maps (2018)

3.2. Métodos

Serão discutidos dois grupos de tipos de procedimentos adotados nesta pesquisa, os procedimentos laboratoriais e os procedimentos de campo.

3.2.1. Procedimentos de análise laboratorial

3.2.1.1 Determinação da influência da variação de temperatura, emissividade e distância na obtenção de imagens térmicas

Buscando melhor compreender o funcionamento da câmera termográfica, optou-se pela realização de uma análise paramétrica dos parâmetros termográficos e geométricos envolvidos na obtenção de imagens térmicas.

Os procedimentos de análise adotados foram os seguintes: quatro variações regulares de distância entre a câmera e o objeto de análise, de 50 cm, 100 cm, 150 cm e 200 cm, para os ângulos de 90, 70 e 45 graus em relação a horizontal. Para cada distância capturava-se uma imagem termográfica com o padrão pré-estabelecido da câmera que são: temperatura ambiente refletida de 25°C, distância de 200 cm e umidade relativa atmosférica de 50% e outra com os dados reais das condições ambiente, como temperatura, umidade relativa do ar e distância da câmera ao objeto. Por último, fixou-se a distância do objeto observado em 200 cm, distância estabelecida como padrão, variando-se na câmera termográfica os dados de temperatura, umidade relativa e emissividade.

Para esta determinação o objeto de referência escolhido foi uma fita vinílica preta, com emissividade conhecida de 0,95. Limitou-se a uma distância máxima de 200 cm devido as limitações de espaço do local onde ocorreu a captura das imagens, salientando que o mesmo foi escolhido devido a possibilidade de monitoramento da temperatura e umidade do ar.

3.2.1.2 Previsão de trincas em laboratório

De modo a verificar a capacidade da câmera de prever a existência de trincas subsuperficiais, foi decidido realizar a simulação de trincas em corpos de prova moldados em laboratório. Foi decidido que amostras cilíndricas seriam

utilizadas, e nestas seriam realizados furos a diferentes profundidades da superfície e diferentes diâmetros.

As seguintes condições foram selecionadas: três diferentes diâmetros de pré trinca (4, 6 e 7,5 mm) e três profundidades medidas a partir da superfície da amostra (1, 2 e 4 cm). Para satisfazer todas as condições necessita-se um total de 9 amostras. Após o processo descrito acima, algumas amostras foram expostas ao sol (termografia passiva), e outras em estufa (termografia ativa).

Foram utilizadas amostras cilíndricas com diâmetro de 10 cm e altura de 15 cm, conforme Figura 14. As mesmas passaram por um processo de corte no sentido longitudinal e transversal, com a utilização da serra policorte com uso de água para não ocorrer aquecimento do ligante das amostras, conforme ilustrada na Figura 15.

Figura 14 - Amostra asfáltica utilizada



Fonte: Acervo do autor (2018)

Figura 15- Processo de corte das amostras utilizadas



Fonte: Acervo do autor (2018)

Utilizando-se de uma furadeira de bancada, as amostras foram perfuradas lentamente, com o uso abundante de água para conter o aquecimento do ligante. Primeiramente com os diâmetros de 4 e 6 mm e a 1 cm da superfície a ser analisada, com amostras cortadas tanto longitudinalmente quando transversalmente. Após a perfuração, cobriu-se a trinca induzida na amostra com o uso de uma massa epóxi bicomponente, conforme pode ser visto nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Amostras cortadas longitudinalmente



Fonte: Acervo do autor (2018)

Figura 17 - Amostras cortadas transversalmente



Fonte: Acervo do autor (2018)

Primeiramente optou-se por aquecer as amostras, de ambas configurações apresentadas acima, com o uso de uma estufa deixando-as permanecer no equipamento por 30 minutos a 55 °C. Vale ressaltar que este processo se deu apenas em caráter de estudos preliminares, a fim de definir o

formato mais adequado para distribuição de calor no interior da amostra sem que isso interfira na análise dos termogramas.

Após definição da configuração de amostra a ser utilizada nas análises, as mesmas foram expostas perpendicularmente ao sol, de maneira a receber maior incidência solar na superfície de obtenção dos termogramas. Após uma incidência solar constante de pelo menos 8 horas, as amostras foram levadas ao laboratório para serem fotografadas. Muito cuidado foi necessário para não tocar na superfície da amostra, pois o contato com a superfície gera alterações no termograma, mascarando o resultado.

No laboratório, as amostras foram posicionadas de maneira que não poderiam se movimentar durante a sessão de captura de fotos, mantendo constante a distância e ângulo da câmera entre todas as amostras. Ainda, as amostras fotografadas foram todas orientadas da mesma maneira, ou seja, o furo sempre se encontrava a direita da foto. Estas estratégias foram adotadas para facilitar o processo de análise. Na Figura 18 está ilustrado este processo.

Figura 18- Fotografia termográfica de uma amostra



Fonte: Acervo do autor (2018)

Então, assim que cada amostra estava preparada para ser fotografada, uma sequência de termogramas foi obtida, um para cada intervalo de tempo. O objetivo da obtenção de termogramas em tempos diferentes baseia-se no fato

de que se espera que a temperatura da amostra variará de modo diferente no local onde existe uma trinca subsuperficial.

No Quadro 3 está apresentado o resumo da metodologia empregada, na qual foi capturada uma fotografia termográfica para cada intervalo de tempo diferente, de três amostras sendo uma de referência sem a indução de trincas e as outras duas com a indução de trincas de 4 e 6 mm, respectivamente.

Quadro 3 - Variação paramétrica na obtenção de termogramas

Amostra	Tempo (min)			
Referência	0	5	10	15
4 mm				
6 mm				

Fonte: Elaboração própria

Após analisar os resultados gerados pelas imagens termográficas obtidas com a situação apresentada acima, percebeu-se que não seriam necessárias realizar as demais condições selecionadas. Com isso, reduziu-se a quantidade de amostras utilizadas para um total de três amostras

3.2.2. Procedimentos de análise em campo

Os procedimentos adotados no campo seguem regras específicas, pois são dependentes de influências externas como o horário de obtenção das imagens, temperatura do ar, incidência solar, entre outros. As etapas metodológicas para obtenção e tratamento das imagens térmicas estão apresentadas resumidamente na Figura 19.

Figura 19 - Processo metodológico utilizado



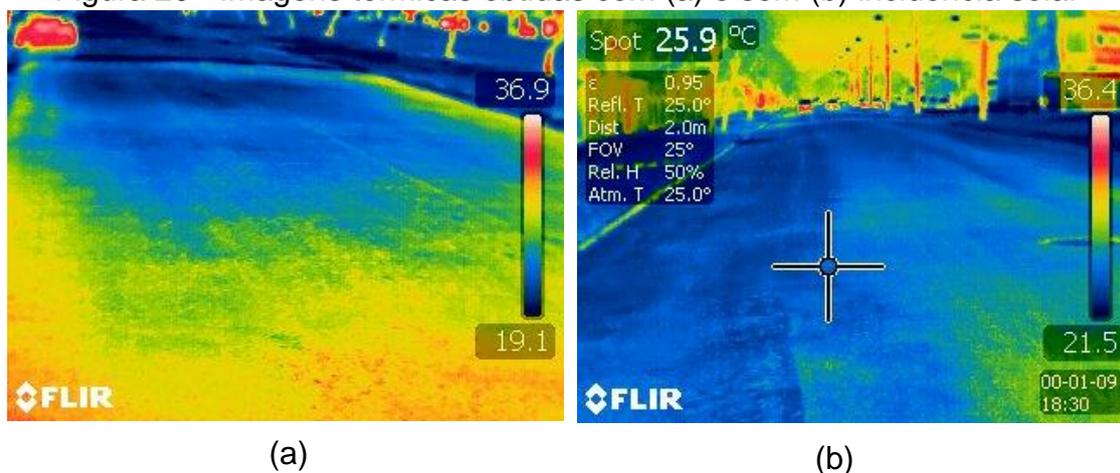
Fonte: Adaptado de Mohan e Poobal (2017)

3.2.2.1 Definição do horário para a obtenção das imagens térmicas

Conforme mencionado na Revisão Bibliográfica, existem duas técnicas de termografia infravermelha, ativa e passiva. Na etapa de obtenção de imagem em campo, a técnica de termografia passiva é adotada, onde a única fonte de calor a aquecer o material é a radiação solar. Sabe-se que a radiação solar direta interfere na captação de uma imagem térmica, podendo fazer com que o termograma se torne confuso e de difícil interpretação.

Dessa forma a captura de imagens foi realizada em horários variados, algumas com incidência solar direta (Figura 20 a) e outras após o pôr do sol (Figura 20 b). Nos exemplos é possível verificar que imagens realizadas após o pôr do sol apresentam-se de forma mais homogênea, sendo então tal horário definido para obtenção das imagens térmicas, fato já recomendado pelos autores Saarenketo, Matintupa e Varin (2012).

Figura 20 - Imagens térmicas obtidas com (a) e sem (b) incidência solar



Fonte: Acervo do autor (2017)

3.2.2.2 Premissas para obtenção de imagens térmicas a campo

Para que a análise e comparação das imagens térmicas torne-se viável, deve-se seguir um certo padrão entre as condições nas quais as mesmas são obtidas, portanto será seguido o horário de medição definido anteriormente, buscando-se realizar a captura das imagens sempre em dias de tempo estável com incidência direta dos raios solares sobre o pavimento. Pois conforme já

discutido na Revisão Bibliográfica, fatores como excesso de umidade ou mudanças bruscas de temperatura interferem nos resultados obtidos.

Quanto ao ângulo de observação, neste trabalho as fotografias foram obtidas com a câmera posicionada no sentido paralelo ao pavimento asfáltico, evitando-se mudanças de inclinações na obtenção das imagens afim de alcançar resultados homogêneos. Quanto a distância de obtenção das imagens, buscou-se manter distâncias curtas e regulares evitando-se abrangências de grandes áreas, pois isso leva a câmera a captar a temperatura de objetos que não são alvos do estudo e, além disso, sabe-se que a sua precisão diminui gradativamente com o aumento da distância em relação ao objeto fotografado.

3.2.2.3 Determinação da emissividade do pavimento asfáltico

Buscando maior representatividade dos resultados, a emissividade do revestimento asfáltico da área em estudo deve ser determinada. Para isso o método da fita isolante pode ser utilizado. O mesmo consiste em cobrir parte da superfície que se pretende descobrir a emissividade com fita isolante preta de emissividade conhecida de 0,95. Realiza-se então uma imagem térmica e descobre-se a temperatura naquele local. Após isso realiza-se outra imagem térmica da área ao lado da recoberta com fita e ajusta-se a emissividade até encontrar a mesma temperatura encontrada na superfície com fita. O processo é repetido até que os dados encontrados sejam homogêneos e estáveis, encontrando-se então a emissividade do material desejado.

Na Figura 21 exemplifica-se o processo descrito acima, onde primeiramente obteve-se uma imagem térmica somente da região recoberta pelo material vinílico de referência e posteriormente da superfície ao lado.

Figura 21 - Determinação da emissividade do revestimento asfáltico



Fonte: Acervo do autor (2018)

3.2.2.4 Validação de modelos de previsão de temperatura

O processo para validação da aplicabilidade, para o município de Alegrete-RS, das equações desenvolvidas por Kilpp (2004), ocorreu da seguinte forma: registrou-se a temperatura do ar em horários variados ao longo do dia, calculando-se então a temperatura na superfície do pavimento asfáltico de acordo com as Equações 3 e 4 apresentadas na revisão bibliográfica utilizando-se das temperaturas máximas, mínimas e médias registradas. Com isso, comparou-se os resultados com a temperatura apresentada nos termogramas do pavimento gerados em mesmo horário.

Buscou-se obter as imagens térmicas, para fins de comparação com a temperatura encontrada através das equações, em períodos variados ao longo do ano. Sempre tomando o cuidado para atender o limite de validade das equações propostas, ou seja, a temperatura do ar deveria estar entre 17 e 27° C. Optou-se por registrar as temperaturas apenas em horários de exposição solar direta no pavimento, sendo assim verificou-se a aplicação da equação que prevê a máxima temperatura do pavimento asfáltico.

3.2.3 Tratamento e análise das imagens térmicas

Para o tratamento das imagens, optou-se primeiramente pela utilização do programa FLIR Tools, da própria empresa fabricante da câmera, onde podem ser selecionadas as imagens de melhor qualidade e converter a escala de cores

da imagem de colorida para escala de cinza, procedimento necessário para posterior análise. No processamento de imagem utilizou-se o programa ImageJ, onde através da função Plot Profile, traçou-se histogramas a partir de linhas posicionadas sobre regiões de interesse na amostra.

A fim de se definir a escolha de geometria da amostra a ser utilizada no estudo, foram traçadas duas linhas em cada amostra em direções perpendiculares entre si, x e y, já para o caso de análise da distribuição de calor em amostras com trincas induzidas foi traçado apenas uma linha em direção perpendicular a abertura da trinca. Com isso, foram gerados histogramas que mostram no eixo das abcissas a distância em pixel e no eixo das ordenadas a variação da escala de cinza.

Finalmente, para analisar a distribuição de calor na amostra, se fez necessário converter o valor do eixo das ordenadas de escala de cinza, que varia de 0 a 255 bits, para temperatura em graus célsius, em função das temperaturas máximas e mínimas de cada amostra. Este procedimento foi utilizado tanto na escolha da forma da amostra a ser estudada, quanto no entendimento do comportamento da variação de temperatura ao longo do tempo e com diferentes configurações de pré-trincas.

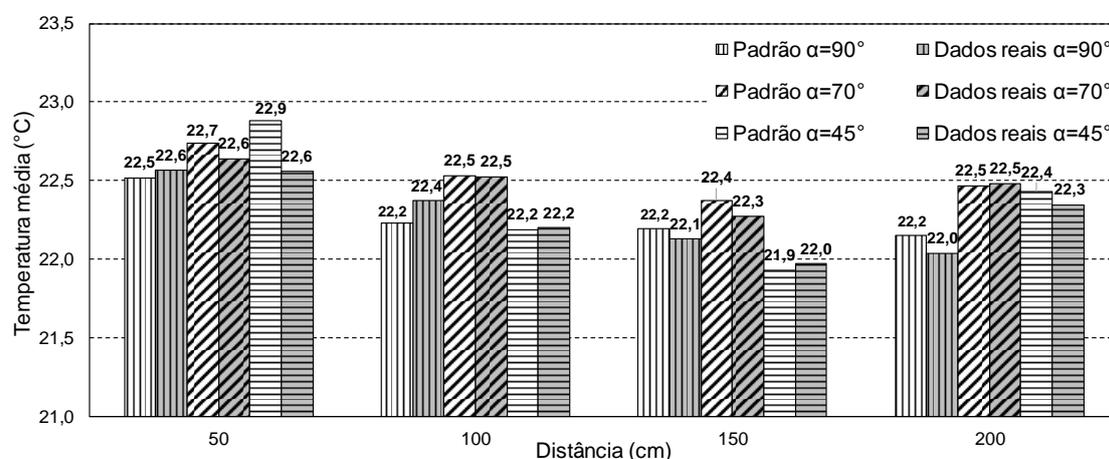
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo do trabalho, serão apresentados os resultados encontrados para cada etapa do estudo, bem como a análise e interpretação dos dados e informações obtidos através das imagens termográficas.

4.1. Influência das variações de distância, emissividade e ângulo de observação

A partir das fotografias obtidas foram determinadas as temperaturas de um objeto referencial com emissividade conhecida de 0,95. Na Figura 22 está apresentada a comparação entre a influência da distância entre a câmera e o objeto, da inclinação do objeto em relação ao plano horizontal e da configuração padrão da câmera em comparação aos dados reais das condições ambientais.

Figura 22 - Análise da variação de temperatura em função da distância e da inclinação do objeto



Fonte: Elaboração própria (2017)

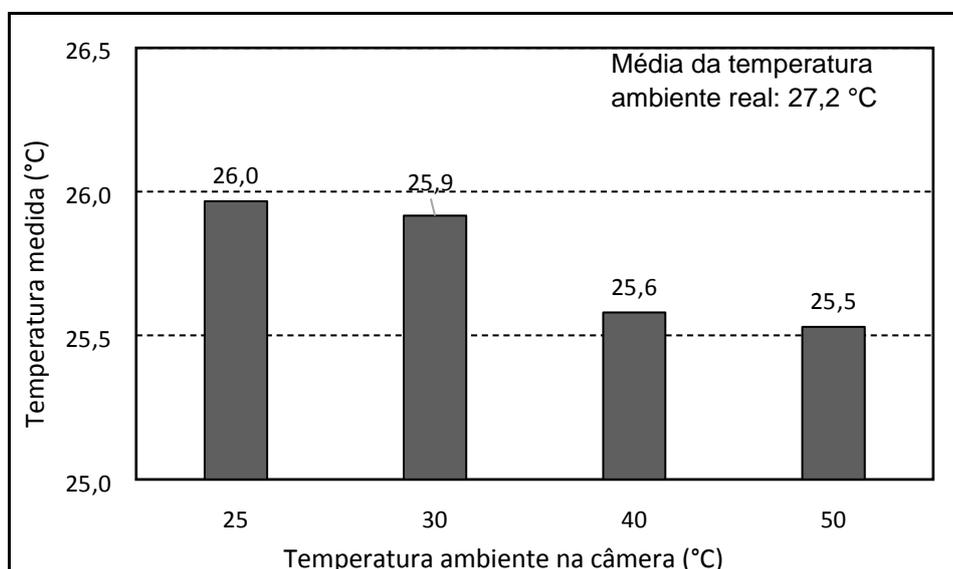
Quanto a influência da distância entre a câmera e o objeto, notou-se que em geral houve uma queda no valor da temperatura medida conforme a distância ao objeto aumentava até 200 cm, onde verificou-se um suave acréscimo nos valores medidos. Esta distância é a mesma que a câmera impõe como padrão para obtenção dos termogramas, portanto já se esperava variação praticamente nula entre as temperaturas medidas, o que neste caso ocorreu para $\alpha=70^\circ$.

A diminuição da inclinação do objeto em relação ao plano horizontal de 90° para 70° levou a um aumento no valor da temperatura do corpo referencial medida, seguido de uma queda de temperatura quando a inclinação foi variada 45°. O mesmo não ocorreu para a distância de 50 cm, onde para toda diminuição de inclinação foi verificado um aumento de temperatura medida.

Para a variação entre os dados reais das condições ambiente e as configurações pré-estabelecidas na câmera notou-se em geral um acréscimo de 0,1 grau para os termogramas obtidos com os dados reais. De maneira geral, a variação de temperatura não ocorreu de maneira significativa, mesmo com as diferentes distâncias e inclinações, em relação a horizontal, pois a própria precisão da câmera varia de + 2% ou - 2°C, de acordo com o catálogo técnico do produto.

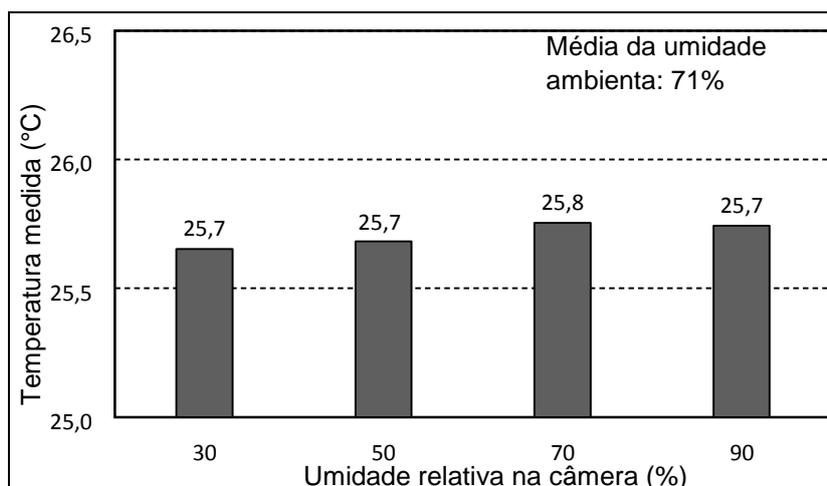
Além do discutido anteriormente, o comportamento dos termogramas quando se alteram os parâmetros de temperatura, umidade relativa do ar e emissividade, mantendo-se uma distância fixa, foram observados e estão apresentados nas Figuras 23, 24 e 25, respectivamente.

Figura 23 - Medições com diferentes temperaturas informadas na câmera



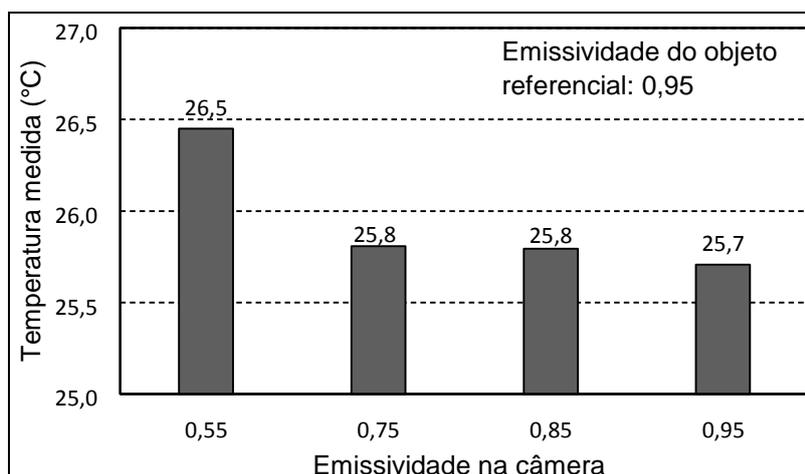
Fonte: Elaboração própria (2017)

Figura 24 - Medições com diferentes umidades informadas na câmera



Fonte: Elaboração própria (2017)

Figura 25 - Medições com diferentes emissividades informadas na câmera



Fonte: Elaboração própria (2017)

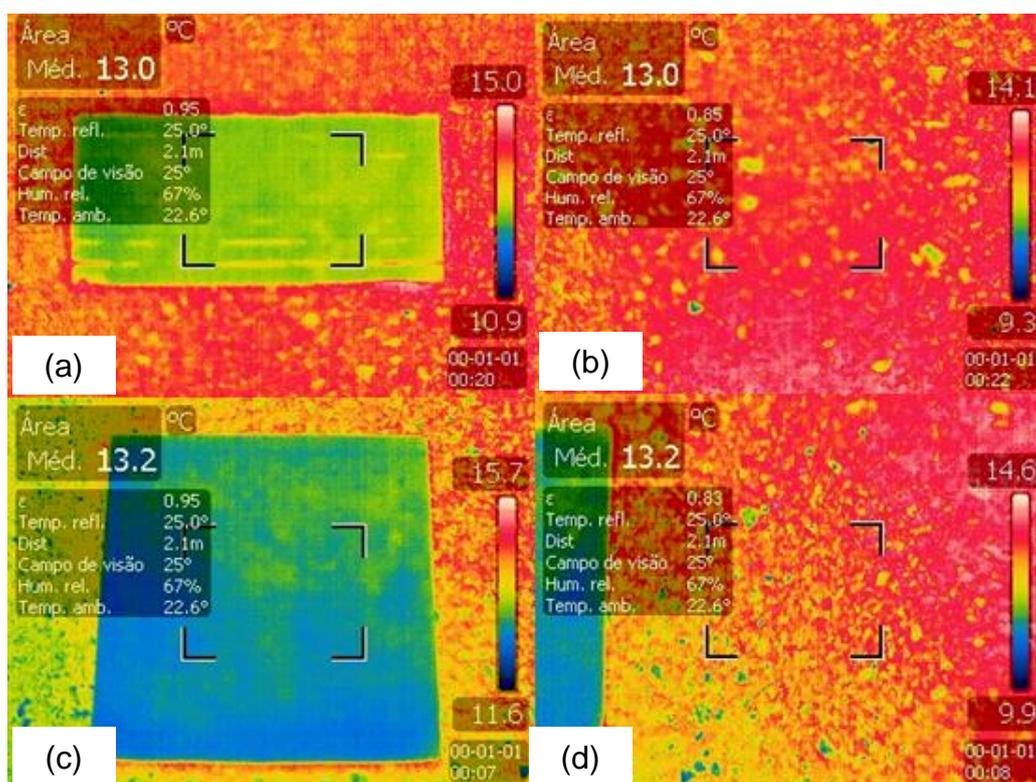
Com as Figuras 23, 24 e 25 nota-se que a modificação dos dados na câmera termográfica pode influenciar nos resultados obtidos. Na Figura 23 quando se aumentou o parâmetro da temperatura ambiente na câmera uma diminuição da temperatura medida foi observada. A Figura 24 mostra que a variação de umidade relativa do ar da câmera termográfica praticamente não interfere nos resultados. Já na Figura 25, quando se altera a emissividade do material é possível notar que a temperatura tende a ser maior para valores de emissividades menores, estabilizando-se à medida que se aproxima da emissividade real do objeto observado.

Com isso, pode-se perceber que é importante manter informado na câmera termográfica a emissividade correta do material de estudo. Também é relevante manter o mesmo ângulo de inclinação para a captura das imagens, pois dessa forma diminui-se o efeito da emissividade aparente. Por último pode-se destacar que a distância entre o objeto em estudo e a câmera termográfica deve ser pequena, sendo que quanto maior esta distância menor é a parcela de energia do material refletida na câmera.

4.2. Determinação da emissividade do revestimento asfáltico

A partir da metodologia descrita no item 3.2.2.3 foi então determinada a emissividade do revestimento asfáltico. Na Figura 26 (b) e (d) estão indicadas as emissividades obtidas para o pavimento asfáltico analisado, sendo estas respectivamente 0,83 e 0,85. Valores de emissividade na ordem de 0,85 à 0,95 eram esperados, devido à alta densidade e coloração escura do material. A emissividade do pavimento asfáltico tende a se alterar com mudança de tonalidade verificada com o envelhecimento do material, e também com o teor de ligante e o quanto o mesmo encontra-se envolto nos agregados.

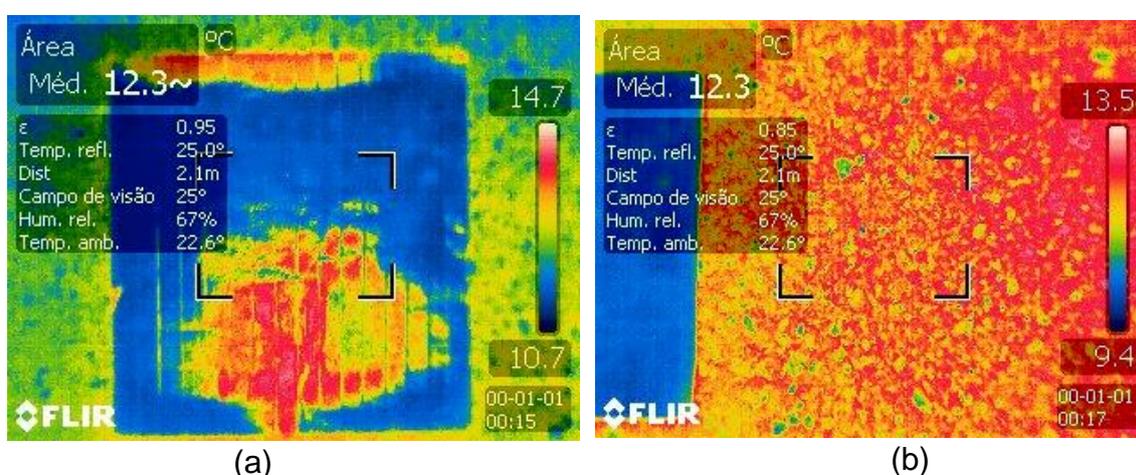
Figura 26 - Determinação da emissividade



Fonte: Acervo do autor (2018)

Na Figura 27 é possível notar um inconveniente da utilização de fita vinílica preta na determinação da emissividade pelo método utilizado. A refletividade apresentada pela fita faz com que seja observada uma interferência no termograma gerado, a qual é advinda da radiação emitida pelo operador da câmera nas fotos normais a superfície analisada. Para evitar este problema, uma opção é redobrar o cuidado no posicionamento da câmera termográfica em relação ao objeto no momento da captura das imagens ou utilizar um objeto de superfície mais opaca, semelhante à do pavimento.

Figura 27 - Refletividade da fita vinílica

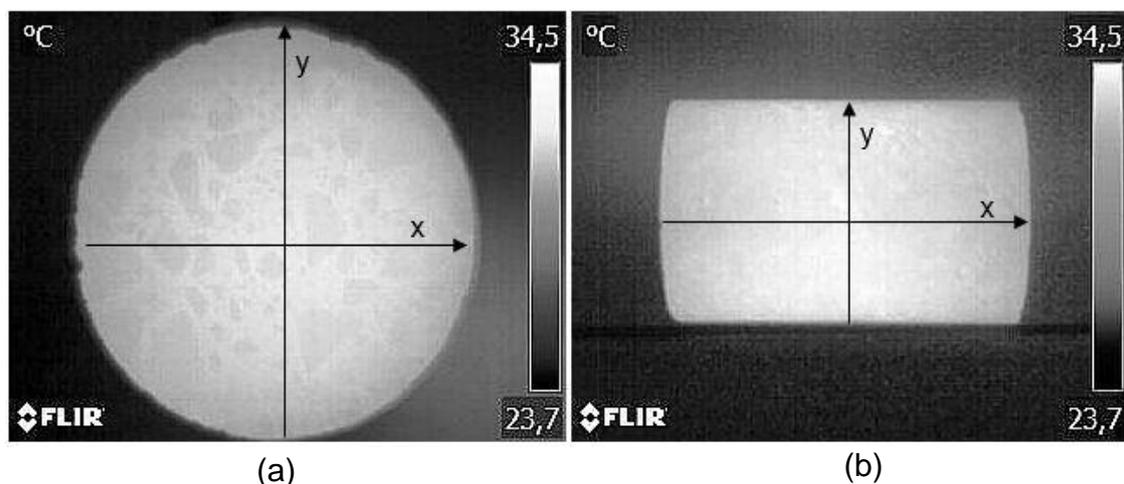


Fonte: Acervo do autor (2018)

4.3. Previsão de trincas

Para a tentativa de previsão de trincas, primeiramente foi analisada a distribuição de calor ao longo de duas geometrias de amostras: a primeira obtida a partir do corte transversal de uma amostra cilíndrica, e a segunda também a partir do corte de uma amostra cilíndrica, porem no sentido longitudinal. As faces reveladas a partir do corte foram fotografadas e a variação da temperatura nos eixos horizontal e vertical foram analisados, conforme apresentado na Figura 28. Em ambos os casos, a pré-trinca encontrava-se orientada na horizontal.

Figura 28 - Termogramas para análise de distribuição de calor na amostra

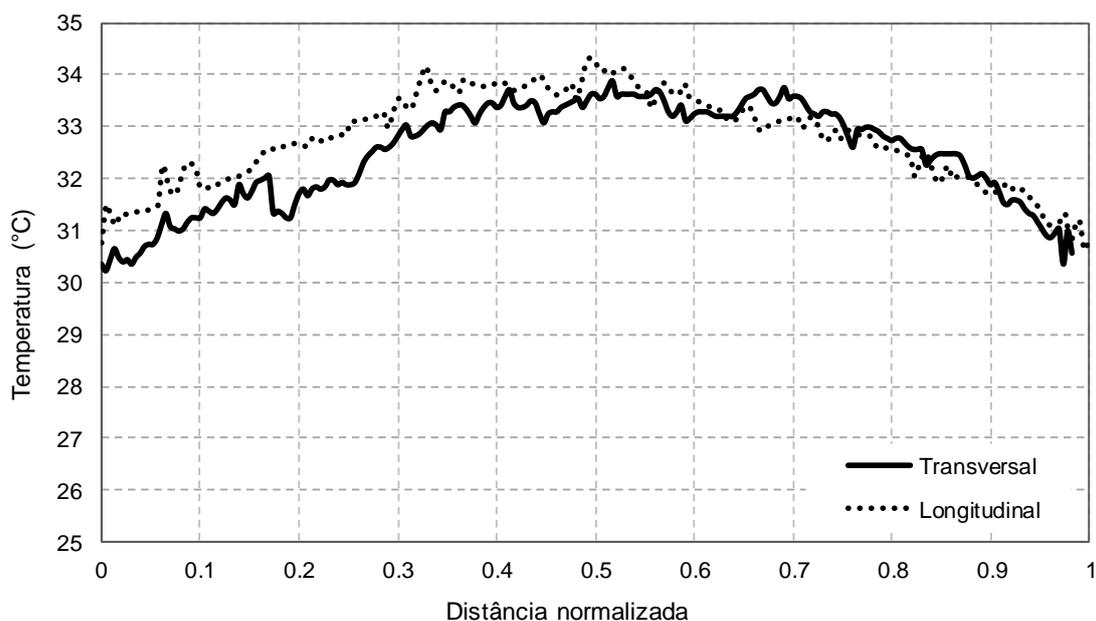


Acervo do autor (2018)

Nas Figuras 29 e 30, estão apresentados os histogramas gerados a partir das imagens térmicas da Figura 28 (a) e (b). Tais histogramas mostram a variação da temperatura em ambos sentidos analisados, tendo por finalidade melhor compreender a influência que a dimensão da amostra apresenta na distribuição de calor.

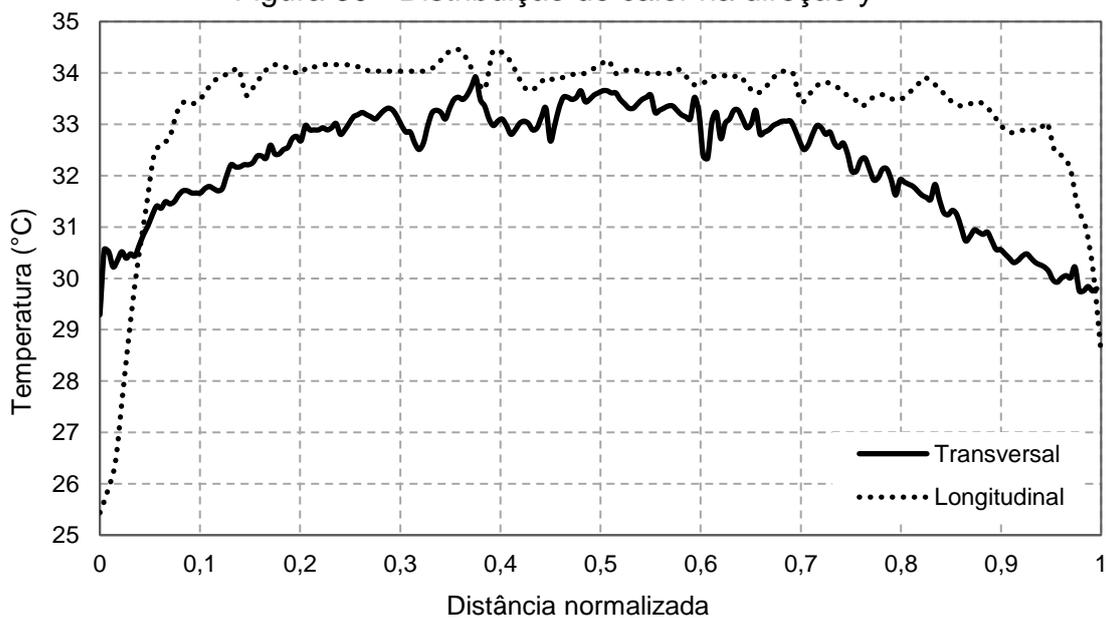
O eixo das abcissas é a distância normalizada, ou seja, a distância de um ponto em questão com a origem, dividido pela largura da amostra analisada. Percebe-se através da Figura 29 que esta distribuição ocorre de forma semelhante para as duas amostras na direção x, com altos níveis de oscilações em ambos os casos. Já na Figura 30 é nítida a diferença de comportamento das amostras na direção y, onde pode-se notar uma melhor distribuição de calor ao longo de toda a amostra transversal.

Figura 29 - Distribuição de calor na direção x



Fonte: Elaboração própria (2018)

Figura 30 - Distribuição de calor na direção y



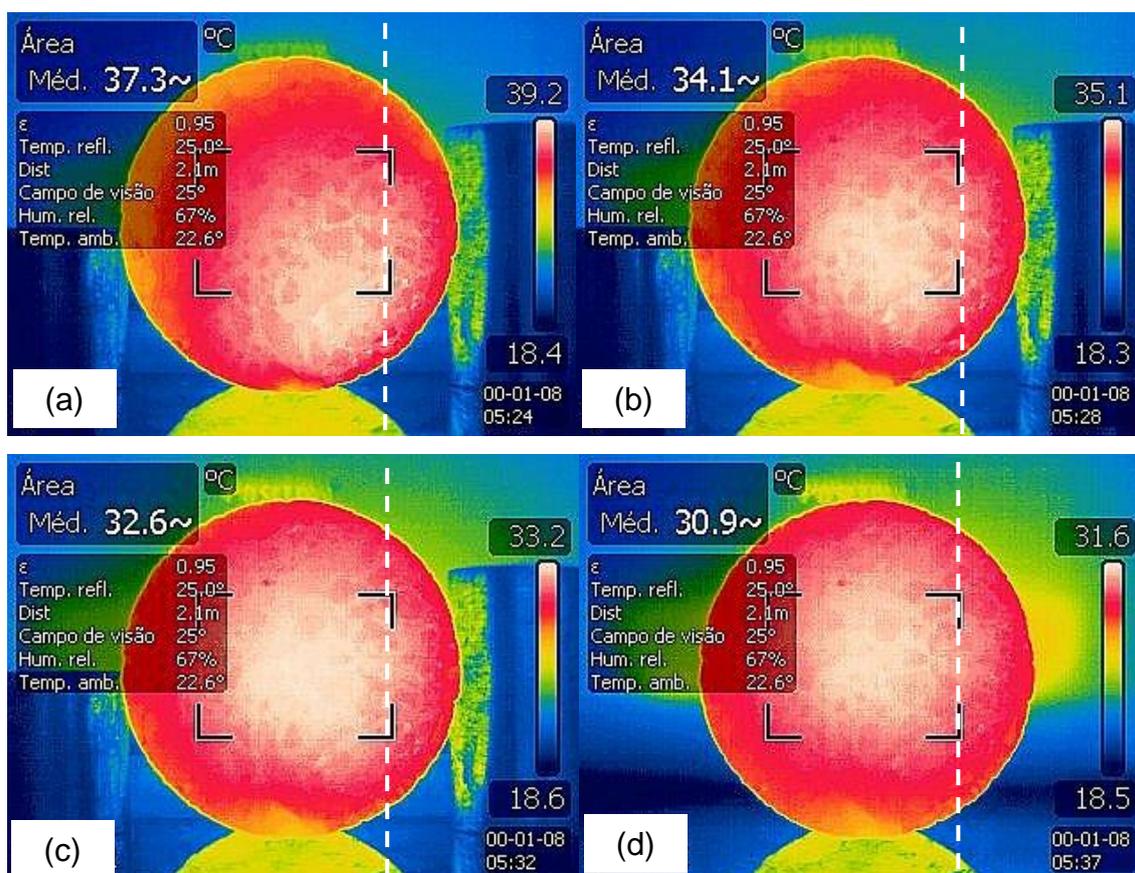
Fonte: Elaboração própria (2018)

Este procedimento é essencial para a escolha da região de interesse analisada, tal escolha baseia-se na amostra que apresentou menor oscilação na distribuição de calor ao longo da direção analisada. Como para ambas as amostras a diferença de temperatura não foi superior a 2 °C, optou-se por utilizar amostras de seção transversal pela sua facilidade de corte.

Durante a realização do procedimento de captura de imagens das amostras de geometrias diferentes, foi observada a taxa de resfriamento da amostra e a influência que trazia aos resultados das imagens termográficas, conforme já era de se esperar. Foi então realizada uma análise da variação da temperatura com o tempo, para três amostras distintas. Optou-se, por praticidade e consistência de resultados, utilizar amostras cilíndricas de corte transversal. A intenção foi de averiguar se a temperatura variaria de modo distinto na superfície imediatamente acima da pré-trinca em relação as demais áreas da amostra.

Na amostra da Figura 31 não foi executada nenhuma pré-trinca, para fins de referência. Estão marcadas nas amostras as linhas de referência para a criação dos histogramas utilizados na análise da variação da temperatura ao longo da amostra.

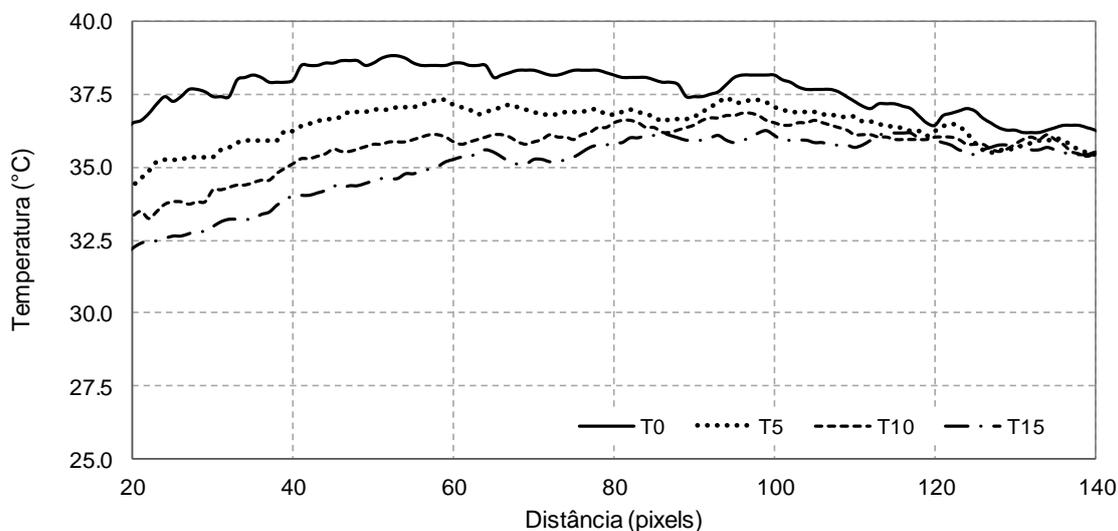
Figura 31 - Amostra de referência sem indução de trincas: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 15 min



Fonte: Acervo do autor (2018)

O histograma exibido na Figura 32 foi gerado a partir das imagens termográficas apresentadas na Figura 31. É possível notar a consistência da queda de temperatura ao longo do tempo e ao longo do comprimento da amostra. Também é possível notar que a medida que a amostra resfria, a curva torna-se mais suave, ou seja, a variação de temperatura ao longo da amostra é cada vez menor. Este fato pode estar ligado a diferente condutividade térmica do agregado e do ligante.

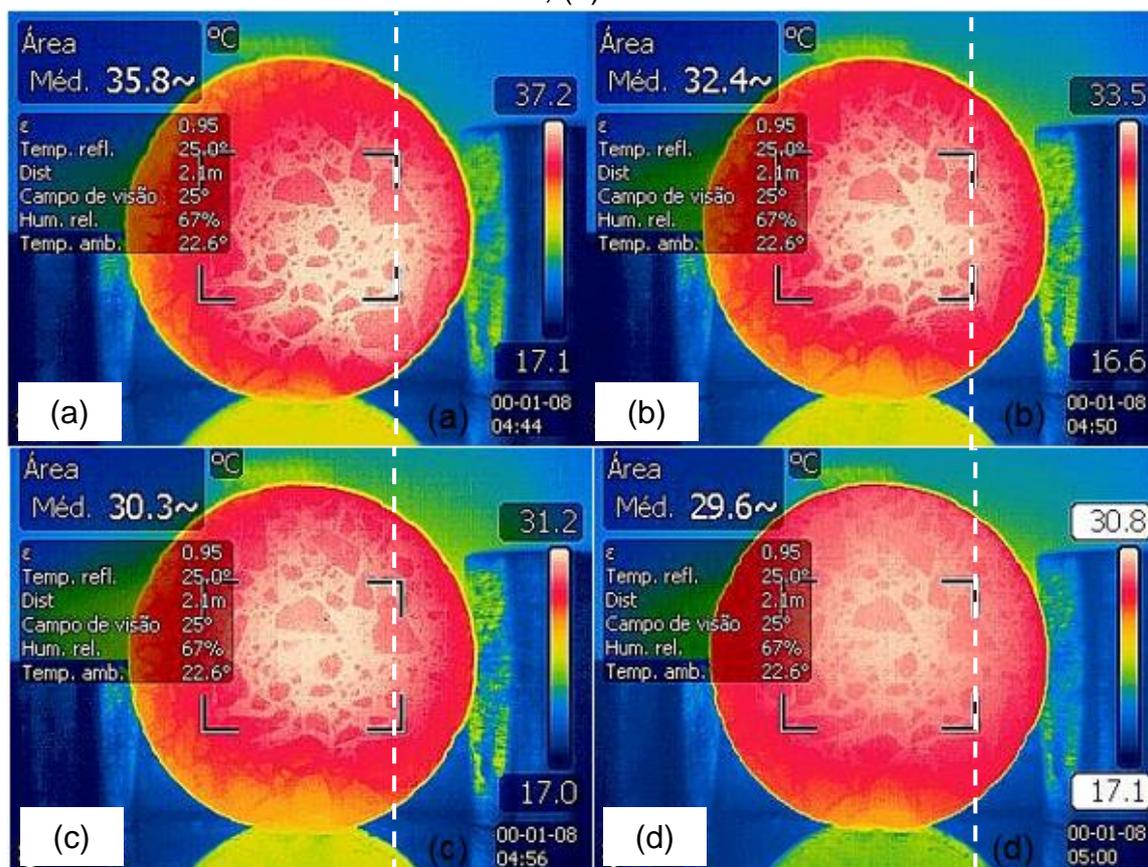
Figura 32 – Distribuição de calor na amostra sem trincas



Fonte: Elaboração própria (2018)

Nas amostras apresentadas das Figuras 33 e 35 foram executadas pré-trincas de 4 e 6 mm, respectivamente. As pré-trincas foram orientadas seguindo a mesma lógica anterior, ou seja, na horizontal e perfuradas à direita da amostra.

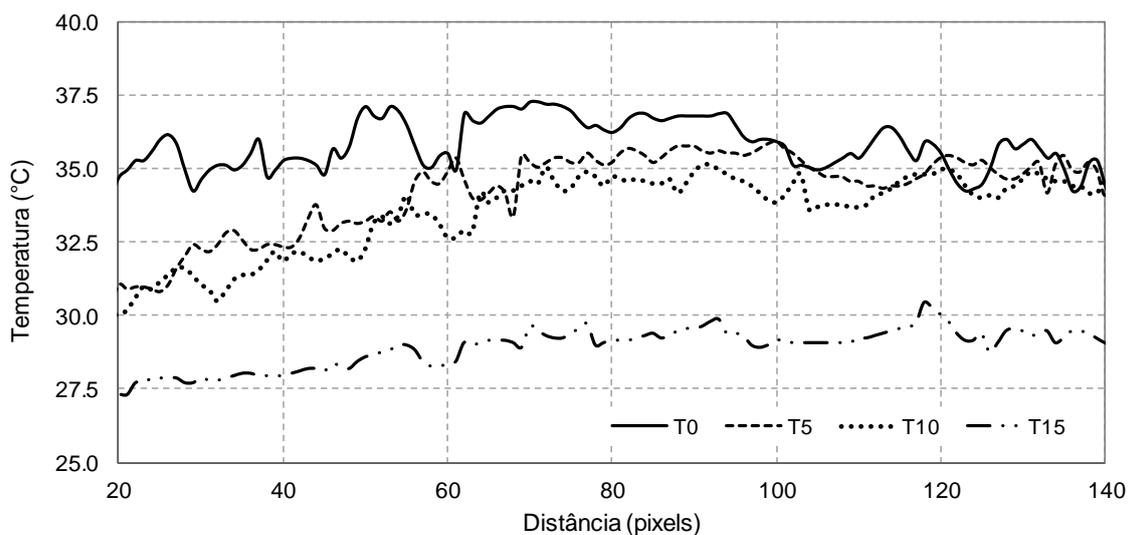
Figura 33 - Amostras com trincas induzidas de 4 mm: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 15 min



Fonte: Acervo do autor (2018)

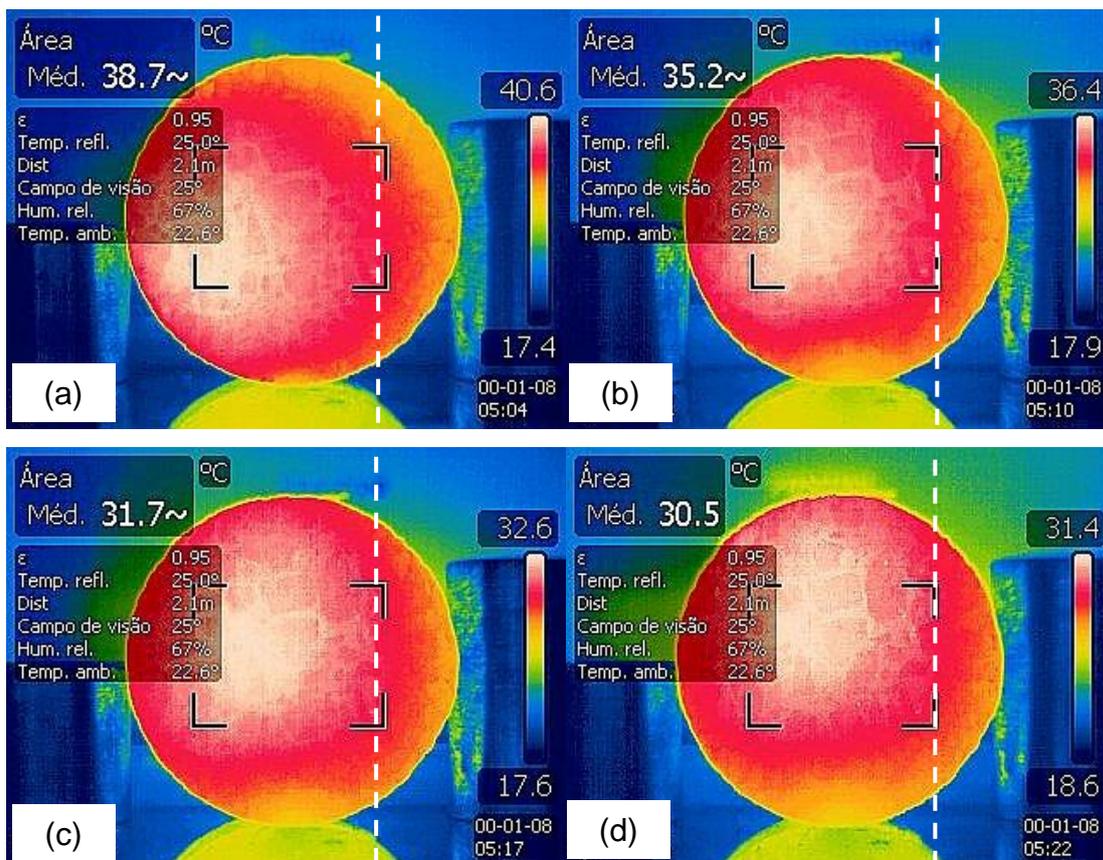
O histograma exibido na Figura 34 foi gerado a partir das imagens termográficas apresentadas na Figura 33. Percebe-se que o nível de oscilação de temperatura nesta amostra foi superior ao da amostra sem indução de trinca, apresentando picos e vales mais marcante. Ainda, novamente pôde-se verificar que conforme a temperatura caía, a curva de variação de temperatura se suavizava.

Figura 34 - Distribuição de calor na amostra com trinca de 4 mm



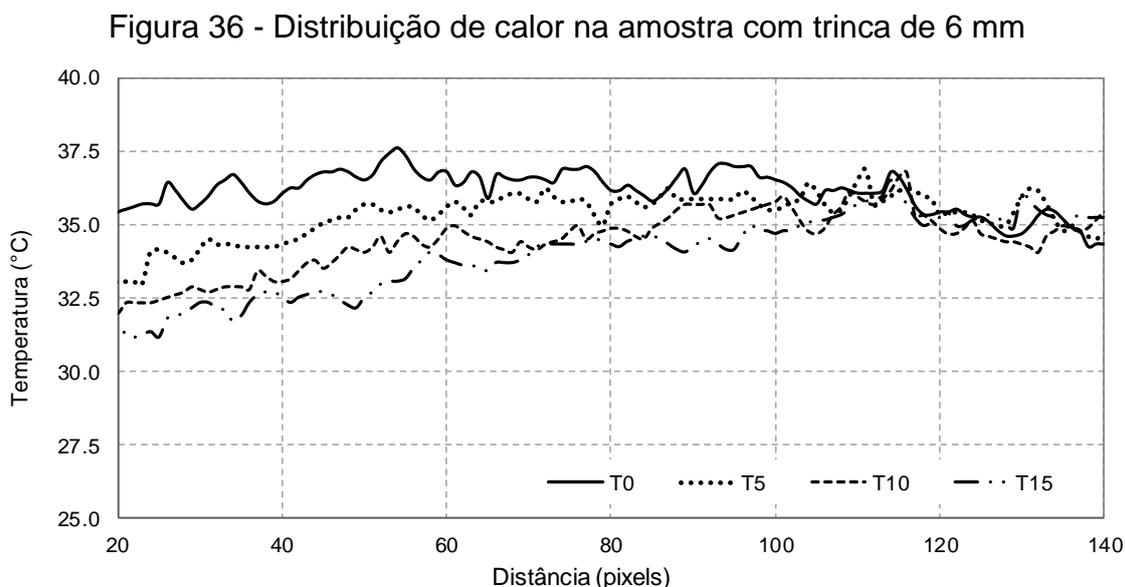
Fonte: Elaboração própria (2018)

Figura 35 - Amostras com trincas induzidas de 6 mm: (a) 0 min, (b) 5 min, (c) 10 min, (d) 15 min



Fonte: Acervo do autor (2018)

A partir das imagens térmicas exibidas na Figura 35, tem-se o histograma apresentado na Figura 36. O mesmo apresenta comportamento semelhante ao já notado no histograma da Figura 34, porém com picos e vales menos acentuados. A suavização da curva de temperatura com o tempo foi novamente observada.



Fonte: Elaboração própria (2018)

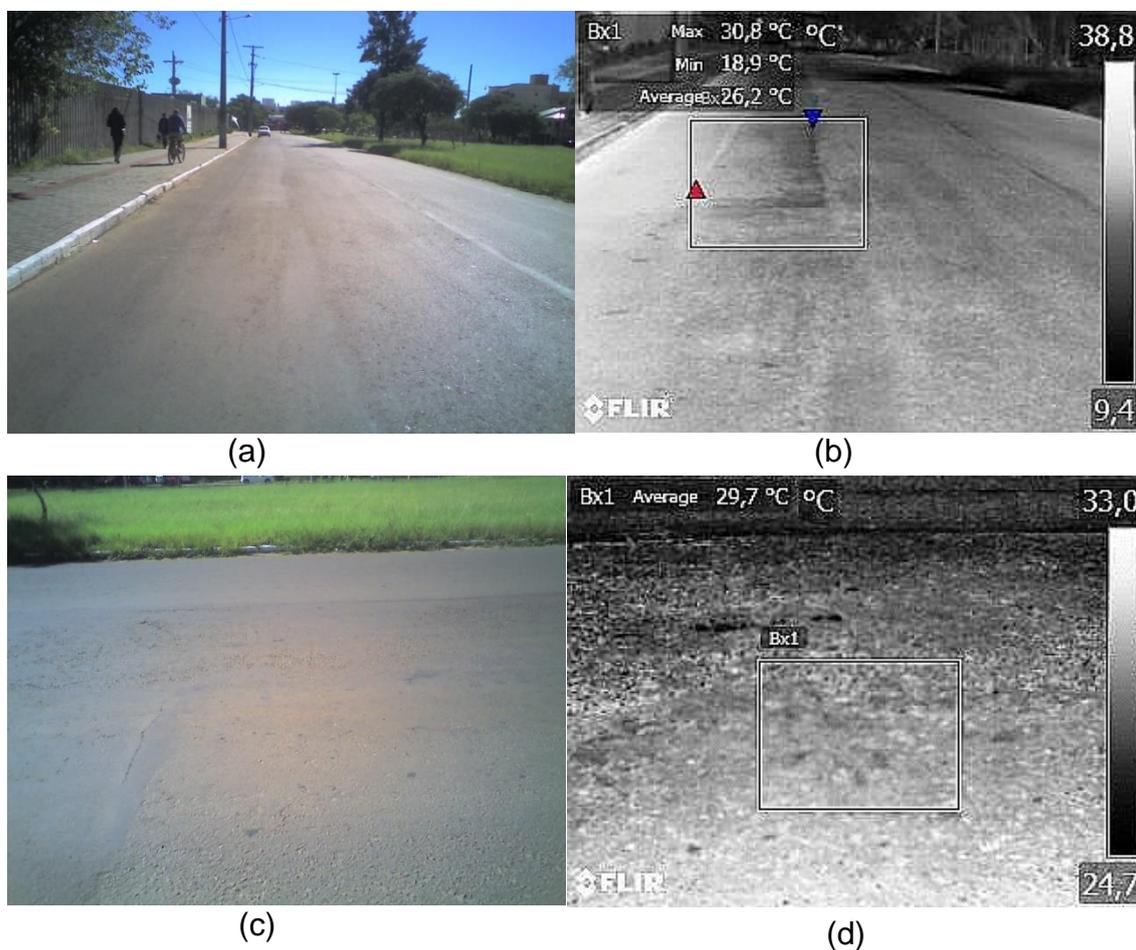
4.4 Previsão de defeitos no pavimento asfáltico *in situ*

Assim como pode-se perceber na análise das imagens térmicas obtidas com as amostras asfálticas em laboratório, há uma tendência de mudança de comportamento dos termogramas em regiões com falhas e defeitos, neste mesmo contexto nota-se nas Figuras 37 e 38 a ocorrência de variações na escala de cor dos termogramas. Porém devido a infinidade de fatores que podem interferir nos resultados apresentados, juntamente com a baixa precisão da câmera termográfica com o aumento de distâncias, os termogramas acabam não apresentando de forma suficientemente clara os resultados esperados.

Na Figura 37 tem-se uma imagem digital (a) e (c) e uma imagem termográfica (b) e (d), onde pode-se observar em (b) uma faixa com maior temperatura, que coincide sobre uma junta construtiva. Ainda na Figura 37 (d), notam-se pontos de tonalidades mais escuras com temperaturas mais baixas, decorrentes de manchas de óleo no pavimento. Porém, não se pode confundir

essa ocorrência com a possível previsão de um ponto com defeito oculto, mesmo que a presença de óleos no pavimento possa ser considerada um fator que venha a causar um futuro defeito.

Figura 37 - Fotografia digital e termográfica do pavimento asfáltico



Fonte: Acervo do autor (2018)

Através da Figura 38 (a) e (b), obtidas no sentido longitudinal da pista de rolagem, tentou-se apontar possíveis pontos de futuras formações de afundamento em trilhas de roda. Percebe-se novamente a formação de um traçado de temperatura, diferente da superfície ao redor, nos pontos de junção das duas faixas de rolagens ou juntas construtivas, neste caso com temperatura inferior as demais regiões do pavimento, sendo o acúmulo de água sobre a pista um dos possíveis agentes responsáveis pelo resfriamento neste ponto.

Figura 38 - Imagens termográficas no sentido longitudinal da pista de rolagem



Fonte: Acervo do autor (2018)

4.5. Previsão de temperatura na superfície do pavimento

Aplicando-se a Equação 3 desenvolvida por Kilpp (2004), obteve-se os resultados apresentados na Tabela 3. Nota-se uma significativa proximidade dos dados calculados com os obtidos nas imagens termográficas do mesmo dia, com diferenças de menos de 1 °C.

Tabela 3 - Cálculo de previsão de temperatura em pavimentos asfálticos

08/08/2017			
Tar (°C)	T máxima	T mínima	T média
	21.90	20.70	21.30
Temp. máxima modelo global (°C)	28.6	27.0	27.8
Temp. máxima na câmera (°C)	27,7		
09/08/2017			
Tar (°C)	T máxima	T mínima	T média
	12.62	11.40	12.01
Temp. máxima modelo global (°C)	16.2	14.6	15.4
Temp. máxima na câmera (°C)	17.3		
15/08/2017			
Tar (°C)	T máxima	T mínima	T média
	20.30	19.90	20.10
Temp. máxima modelo global (°C)	26.5	25.9	26.2
Temp. máxima na câmera (°C)	25.8		

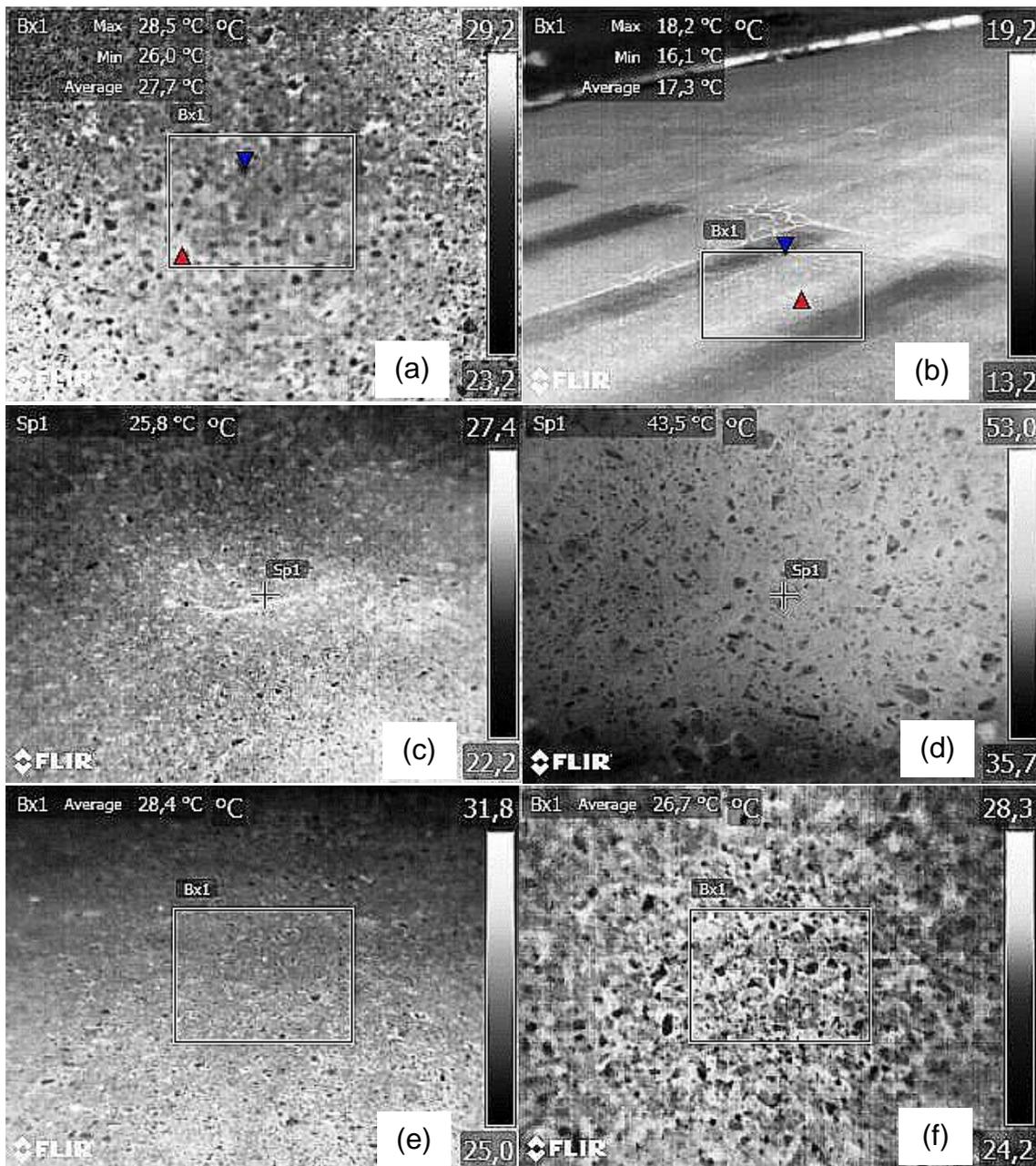
18/04/2018			
Tar (°C)	T máxima	T mínima	T média
	31.20	29.90	30.55
Temp. máxima modelo global (°C)	41.1	39.3	40.2
Temp. máxima na câmera (°C)	43.5		
25/05/2018			
Tar (°C)	T máxima	T mínima	T média
	20.30	19.70	20.00
Temp. máxima modelo global (°C)	26.5	25.7	26.1
Temp. máxima na câmera (°C)	28.4		
29/05/2018			
Tar (°C)	T máxima	T mínima	T média
	21.91	20.55	21.23
Temp. máxima modelo global (°C)	28.6	26.8	27.7
Temp. máxima na câmera (°C)	26.7		

Fonte: Elaboração própria (2018)

No entanto, destaca-se que a previsão de temperatura calculada tende a afastar-se da temperatura obtida com a câmera termográfica à medida que a temperatura do ar se distancia do intervalo de validade da equação, fato percebido no cálculo da temperatura dos dias 09/08/2017 e 25/05/2018.

Para cada cálculo de previsão de temperatura através da Equação de Kilpp (2004), apresenta-se uma imagem termográfica do pavimento para fins de comparação conforme visto na Figura 39 (a) a (f), organizadas de forma que (a) refere-se a data 08/08/2017 e (f) a 29/05/2018.

Figura 39 – Imagens térmicas para cálculo de previsão de temperatura



Fonte: Acervo do autor (2018)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A termografia infravermelha ainda é pouco utilizada como auxílio na identificação de manifestações patológicas, principalmente em revestimentos asfálticos. Diante disso, foi buscado primeiramente entender como as variáveis distância, emissividade e ângulo de observação podem interferir nas imagens térmicas geradas, onde foi notado que devem-se manter informados na câmera a real emissividade do objeto analisado, cuidar o posicionamento da câmera em relação a superfície para não haver reflexão de emissividade aparente e manter distâncias curtas do objeto capturado, visto que a resolução diminuiu com o aumento das distâncias.

As análises realizadas com o auxílio desta ferramenta, tiveram por objetivo principal encontrar anomalias ocultas na superfície do pavimento, detectar os pontos com diferencial de temperatura e analisar como eles ocorrem. Para isso, foi desenvolvido primeiramente uma metodologia de análise de amostras asfálticas em laboratório, na qual se pode perceber que há uma tendência de mudança do comportamento dos termogramas em regiões com falhas e defeitos, porém não de forma suficientemente clara para se identificar o ponto de ocorrência do defeito.

No estudo de campo foi encontrado um valor de emissividade alto, na ordem de 0,85, como já era de se esperar pela densidade e coloração do revestimento asfáltico. Um ponto positivo da termografia, que pode ser notado nas imagens térmicas do pavimento, é que se pode distinguir onde há locais com fissura, pois é onde geralmente encontram-se as maiores temperaturas. É provável que as maiores temperaturas ocorram nesses pontos pelo fato de que a fissura acumula maior radiação solar que o restante da superfície analisada. Entretanto, assim como o observado em laboratório, não foi possível chegar um apontamento conclusivo a respeito da utilização da câmera termográfica para a previsão de defeitos em campo, devido a infinidades de fatores que interferem na medição de temperatura, como o nível de radiação solar, velocidade do vento, posicionamento do operador para captura das imagens, aliados a baixa precisão da câmera termográfica utilizada.

É possível observar que há uma boa aplicabilidade da equação apresentada para previsão de temperatura máxima, no pavimento asfáltico

analisado. Pois foram encontrados resultados satisfatórios no cálculo de temperatura para a maioria dos casos, excetuando-se apenas os casos onde a temperatura do ar não se encontrava dentro do limite de validade da equação.

Apesar de ser uma ferramenta bastante útil, a termografia digital ainda tem algumas desvantagens, principalmente pelos diversos fatores que interferem na medição de temperatura. E como foi encontrada pouca referência acadêmica de estudos com a termografia infravermelha para pavimentação asfáltica, as análises podem ter sido prejudicadas.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se para pesquisas futuras ampliar o estudo a campo, obtendo imagens térmicas em períodos variados do ano e em diferentes tipos de revestimentos asfálticos.

REFERÊNCIAS

ALBANO, J. F. **Efeitos dos Excessos de Carga sobre a Durabilidade de Pavimentos**. 2005. 232 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2005.

ALVES, T. S. F. **Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários: Aplicação prática do radar de prospecção e do deflectômetro de impacto**. 2007. 136 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2007.

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

BARREIRA, E. S. B. M. **Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios**. 2007. 183 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto - Portugal, 2004.

BASTOS, G. A. **Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Reforçadas com Geogrelhas para Pavimentos Flexíveis**. 2010, 247 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2010.

BARBOSA JÚNIOR, V. S. **Efeito Deletério da Água em Misturas Asfálticas com Adição de Ligante Modificado com Polímero e de Cal**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2018.

BENEVIDES, S. A. S. **Modelos de Desempenho de Pavimentos Asfálticos para um Sistema de Gestão de Rodovias Estaduais do Ceará**. 2006. 357 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BRANCO, F.; PEREIRA, P.; SANTOS, L. P. **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra – Portugal: Almedina, 2008.

CASTRO, J. L. S., FINKLER, A., MILKE, T. F. **Uso da termografia em manutenção preditiva de redes de distribuição**. In: SALÃO DO CONHECIMENTO – UNIJUI, Ijuí, 2016. Anais.

CORTIZO, E. C. **“Avaliação da Técnica de Termografia Infravermelha para Identificação de Estruturas Ocultas e Diagnóstico de Anomalias em**

Edificações. 2007. 178 f. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2007.

CUNHA, C. R. **Determinação de Modelo de Deterioração do Pavimentos para a Malha Rodoviária Estadual do Ceará.** 2008. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 008/2003 – PRO.** Levantamento visual contínuo para a avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos, Rio de Janeiro. 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Conservação Rodoviária.** 2ª ed. Rio de Janeiro, 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **009/2003 – PRO.** Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos. Rio de Janeiro, 2003.

FLIR. Manual do utilizador. Novembro de 2010. Disponível em: <https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_6419.pdf>. Acesso em 10 de agosto de 2017.

GONÇALVES, F. J. P. **Estudo Experimental do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaio Acelerados.** 2002. 467 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul. 2002.

GONÇALVES, F. J. P. **Diagnóstico e Manutenção de Pavimentos: Ferramentas Auxiliares.** Passo Fundo - RS - Brasil: Ed. Universidade, 2007.

Guimarães, A. C. R. **Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos.** 2009. 352 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Haas, R., Hudson, W.R., Zaniewski, J.P. **Modern Pavement Management.** Malabar, Florida, USA: Krieger Publishing Company, 1994.

HOLST, G. C. **Common Sense Approach to Thermal Imaging.** Washington, DC, USA: SPIE Optical Engineering Press, 2000.

KILPP, R. **Desenvolvimento de modelos para previsão de temperatura em pavimentos flexíveis**. 2004, 87 f. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, UNIJUI. Ijuí, 2004.

LIEDI, B. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro - RJ - Brasil: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

MENDONÇA, L. V. Termografia por Infravermelhos: Inspeção de Betão. **Revista Engenharia & Vida**, Lisboa, v. 1, n. 16, p. 53-57, 2005.

MOHAN, A.; POOBAL, S. *Crack detection using image processing: A critical review and analysis*. **Alexandria Engineering Journal**, 12 p., 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016817300236>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

MOTTA, L. M. G. D. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de carga repetidas**. 1991. 366 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil)–Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOURA, Edson de. **Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório**. 2010. 299 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MIRANDA, L. P. **Análise do comportamento mecânico de pavimento reforçado com geossintético sob carregamento cíclico em modelo físico de verdadeira grandeza**. 2013, 199 f. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2013.

RODRIGUES, R. M. **Engenharia de pavimentos. Parte II. Gerência de Pavimentos**. São José dos Campos - SP - Brasil: Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, 2015.

SAARENKETO, T.; MATINTUPA, A.; VARIN, P. *The use of ground penetrating radar, thermal camera and laser scanner technology in asphalt crack detection and diagnostics*. In: **7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements**. Springer, Dordrecht, 2012. p. 137-145.

SILVA, P. F. A. **Manual de Patologia e Manutenção de Pavimentos**. São Paulo - SP - Brasil: PINI, 2008.

TRICHÊS, G. *et al.* Avaliação do Uso de Câmeras Infravermelhas para Controle da Temperatura de Misturas Asfálticas Durante o Processo Construtivo. **In: XIV congresso Ibero-Latino americano del Asfalto, 2007, Havana**. XIV CILA. Havana, 2007. v. 1. p. 1-10.