



ALEX DA LUZ PAZ

**TERMOGRAFIA RADIOMÉTRICA  
PARA DIAGNÓSTICO  
DE PATOLOGIAS NAS EDIFICAÇÕES**

UNIVERSIDADE FERNANDO PESSOA  
PORTO  
Novembro/2020





ALEX DA LUZ PAZ

**TERMOGRAFIA RADIOMÉTRICA  
PARA DIAGNÓSTICO  
DE PATOLOGIAS NAS EDIFICAÇÕES**

UNIVERSIDADE FERNANDO PESSOA  
PORTO  
Novembro/2020

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Paz, Alex da Luz

P348s

A Termografia Radiométrica como Recurso ao Diagnóstico de Patologias das Edificações. / Alex da Luz Paz. -- Porto - Portugal, 2020.

152f. : *il. Color.*

Orientador: Prof DSc Elói J. F. Figueiredo. Dissertação (mestrado) – Universidade Fernando Pessoa – UFP. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Engenharia. 2. Patologias da Construção Civil. 3. Termografia. 4. Radiometria. I. Universidade Fernando Pessoa – UFP. II. t. III. Figueiredo, Elói J. F..

CDD 624

---

Alex da Luz Paz  
Termografia Radiométrica para Diagnóstico de Patologias nas Edificações.

Atesto a originalidade do trabalho.

ALEX DA LUZ PAZ

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aprovado em: 30/06/2021

Banca Examinadora

PROF DOUTOR ELÓI J. F. FIGUEIREDO  
Orientador

PROF DOUTOR VITOR EMANUEL MARTA DA SILVA  
Coordenador

PROF<sup>a</sup> DOUTORA EVA SOFIA BOTELHO MACHADO BARREIRA  
Arguente

Dissertação escriturada com pesquisa realizada por meio de acordo de cooperação com a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, apresentada à Universidade Fernando Pessoa, sob orientação do Prof. Doutor Elói J. F. Figueiredo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

## RESUMO

PAZ, Alex da Luz. (2020) A Termografia Radiométrica como Recurso ao Diagnóstico de Patologias das Edificações. 100p. Dissertação. Universidade Fernando Pessoa - UFP.

A presente dissertação incide sobre o uso da termografia como método não destrutivo de verificação da existência de patologias nas edificações, nomeadamente o descolamento de revestimento de argamassa em paredes, o deslocamento de revestimentos cerâmicos e possibilidades de verificação de infiltrações e vazamento de água. Tem como motivação o preparo para inserção no mercado de consultoria. Logo, objetiva um estudo em profundidade de aplicações da termografia e radiometria no estudo das patologias aqui elencadas. O texto, que inicialmente emerge o conhecimento científico disponível, com ênfase na aplicabilidade prática de cada conceito, aborda os aspectos transversais da tecnologia da informação que permeiam a produção de arquivos digitais, o melhoramento de imagens e a produção de relatórios comerciais. Também versa sobre os aspectos técnicos da termografia, apresentando e discutindo as normas existentes no âmbito nacional e internacional. Aponta os principais fabricantes e evidencia as mais relevantes características técnicas dos equipamentos termográficos, inclusive, dando suporte ao processo decisório da seleção e escolha do equipamento mais adequado para o uso pretendido, evitando, assim, o emprego desnecessário de consideráveis recursos financeiros em equipamentos inadequados ou que excedem em muito a necessidade para o uso que deles se quer dar. Ensina os fundamentos de captura e interpretação de imagens termográficas, sugere boas práticas de operação, chama a atenção para as capacidades e limitações desses equipamentos e apresenta termogramas comentados de falhas engendradas para simular as patologias citadas como alvos deste estudo. Para a ciência, contribui com uma rica fonte de informação cujo conhecimento foi construído, em parte, experimentalmente, seguindo o rigor do método científico, no controlado ambiente de um laboratório, a partir de simulacros que em muito se aproximam do quotidiano de trabalho no campo de atuação da consultoria.

Palavras-chave: Termografia, patologias nas edificações.

## **ABSTRACT**

PAZ, Alex da Luz. (2020) Radiometric Thermography as a Resource for the Diagnosis of Building Pathologies. 100p. Dissertation. Fernando Pessoa University - UFP.

The present dissertation focuses on the use of thermography as a non-destructive method of verifying the existence of pathologies in buildings, namely the detachment of mortar lining on walls, the detachment of ceramic tiles and possibilities of verifying infiltration and water leakage. Its motivation is to prepare for insertion in the consulting market. Therefore, it aims at an in-depth study of applications of thermography and radiometry in the study of the pathologies listed here. The text, which emerges from the available scientific knowledge, with an emphasis on the practical applicability of each concept, addresses the transversal aspects of information technology that permeate the production of digital files, the improvement of images and the production of commercial reports. It also deals with the technical aspects of thermography, discussing the existing standards at the national and international levels. It points out the main manufacturers and highlights the most relevant technical characteristics of thermographic equipment, including, supporting the decision-making process of selecting and choosing the most appropriate equipment for the intended use, thus avoiding the unnecessary use of considerable financial resources in equipment. inadequate or that far exceed the need for the intended use. It teaches the fundamentals of capturing and interpreting thermographic images, good operating practices, draws attention to equipment limitations and limitations and presents commented thermograms of engineered failures to simulate the pathologies cited as targets of this study. For science, it contributes with a rich source of information whose knowledge was built, in part, experimentally, following the rigor of the scientific method, without environmental control of a laboratory, from simulations that are very close to the daily work in the field consulting activities.

**Keywords:** Thermography, pathologies in buildings.

"Quando o engenheiro especializado em cálculos  
atualiza seus conhecimentos profissionais,  
quando está a par de todos os avanços da técnica da construção,  
quando ele abandona as regras e as normas limitativas  
para especular somente sobre os problemas colocados pelo concreto armado,  
porque descobriu que é a melhor maneira de evoluir;  
quando ele conhece não só a profissão, mas também as artes visuais  
e a verdadeira arquitetura – o que, aliás, é raro -, enfim,  
quando ele consegue se entusiasmar não só pelo problema técnico a solucionar,  
mas também pelo sentido artístico e criador da obra para a qual colabora,  
então sua associação com o arquiteto torna-se fecunda e positiva."

*(Oscar Niemeyer)*

À minha esposa, **Laura Mitie Hasebe**,  
que neste plano me acompanha; e,  
*in memoriam*, ao meu avô, **Dilon da Luz**,  
cuja crença no meu potencial foi determinante  
no momento mais decisivo de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

O meu eterno agradecimento àqueles que contribuíram de maneira relevante para minha formação profissional e para a elaboração deste trabalho, em especial:

Ao Prof DSc **Celso Correia de Souza**, professor titular da Universidade Anhanguera-UNIDERP, pelo modelo inspirador de profissional que se constituiu na minha formação de professor do curso de Matemática, Licenciatura Plena, com ênfase em Ciências da Computação;

Aos colegas **Anselmo Pereira da Silva**, **Gabriel Ferreira Lopes**, **Franklin de Oliveira Silva** e, *in memoriam*, **Douglas de Alencar Sasaki Volpini**, pelo constante apoio e afinco nas incontáveis horas de estudo, elaboração de trabalhos e realização dos ensaios de laboratórios do meu Bacharelado em Engenharia Civil;

Ao Prof MSc **Willian de Araújo Rosa**, pela didática irrepreensível e pedagogia inspiradora com que contribuiu para minha formação em estruturas, servindo, ainda, suas aulas, como modelo para as minhas – quando professor que fui do Curso de Engenharia Civil da FACSUL e do Curso de Arquitetura da UCDB;

Ao Prof DSc **Sidiclei Formagini**, cuja bagagem de conhecimento, inabalável disposição para ensinar e empatia com ser humano fez emergir em mim o amor que tenho pela Engenharia e pelo concreto armado, meu imenso agradecimento por seus exitosos esforços para viabilizar o acordo de cooperação entre a UFP e a UFMS, o que possibilitou a disponibilização das instalações daquela distinta casa brasileira de ensino superior para que eu pudesse realizar os ensaios que me propus a fazer em meu projeto de pesquisa, planeado em terras lusitanas;

À Engenheira Civil **Ana Maria Allen**, minha veterana de graduação e colega de pós-graduação, que me possibilitou oportunidade ímpar de estagiar por dois anos com um dos mais respeitados Engenheiros Cíveis da cidade de Campo Grande-MS, onde me graduei;

Ao Engenheiro Civil **Humberto Abdulahad**, pela oportunidade de estágio que me concedeu e por todo o aprendizado que me proporcionou da prática de execução de obras de alto padrão de acabamento, ao longo de dois profícuos anos;

Ao Prof MSc **Frederico Santos Belchior dos Reis**, coordenador do Curso de Engenharia Civil da Faculdade Mato Grosso do Sul – FACSUL, pela confiança e oportunidade de trabalho que me concedeu como professor universitário;

Ao Prof MSc **Alessandro Campos**, coordenador do Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Católica Dom Bosco – UCDB, por ter me proporcionado uma das mais ricas experiências profissionais que tive, a de docente de um conceituado curso de Arquitetura;

Ao Sr **Antônio Tadashi Kumagai**, gerente comercial da ATM Brasil Equipamentos Industriais Ltda, pelas profícuas conversas e sempre pronto atendimento;

Ao Prof MSc **Nielsen José Dias Alves**, que forneceu-me, pronta e gentilmente, as primeiras indicações de leituras para este trabalho final de mestrado, bem como transmitiu-me as melhores informações possíveis, furto de sua experiência como profissional ativo no campo das patologias e dos concretos de alto desempenho, para a assertividade nas aquisições que fiz dos equipamentos que se fizeram necessários para os trabalhos de campo que subsidiaram esta dissertação;

Ao Eng Civil Especialista **Manoel Gomes Júnior**, da empresa Sulmetal – Construções Ltda, por ter fabricado para minha pesquisa, sem custo, os painéis utilizados para dar mobilidade às muretas de ensaio, um meio auxiliar de pesquisa que se mostrou extremamente importante para os resultados alcançados;

À Cerâmica Volpiso, na pessoa do Sr **Marcos Angelim**, Gerente de Produção, por ter cedido os tijolos cerâmicos estruturais e de vedação utilizados na edificação das muretas de ensaio;

Ao Eng Civil Especialista **Gabriel Silva de Sousa**, da Tecol Engenharia, por ter cedido os tijolos de concreto estruturais utilizados na edificação das muretas de ensaio;

Ao Prof DSc **Andrés Batista Cheung**, que me assistiu como tutor designado pela UFMS para supervisionar meus ensaios termográficos no Laboratório de Materiais de Construção Civil e no Laboratório de Estruturas e Modelos Experimentais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul;

Ao Técnico de Laboratório **Israel Vilalba de Andrade**, que me assistiu como auxiliar em meus ensaios termográficos no Laboratório de Materiais de Construção Civil e no Laboratório de Estruturas e Modelos Experimentais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sobretudo nas etapas de reboco e revestimento cerâmico das muretas de ensaio;

Ao Prof DSc **Elói J. F. Figueiredo**, meu orientador, detalhista, metódico, crítico, pragmático, cujas observações sempre pertinentes me faziam refletir sobre minhas argumentações, expondo lacunas, oportunidades de melhorias e elucidando dúvidas. Seus posicionamentos, sempre firmes e convictos, me deram muita energia e confiança para seguir por esse caminho, para mim desconhecido: o da pesquisa experimental – a verdadeira pesquisa, onde se manipula a variável independente para provocar uma mudança na variável dependente, estabelecendo causas e efeitos dos fenômenos e, assim, emergindo conhecimentos novos e resultados surpreendentes. Eis o professor que me fez pesquisador, pelo que lhe devo minha mais elevada e eterna gratidão; e

E, finalmente, mas em destaque, ao Prof DSc **Miguel Branco Teixeira**, coordenador do Programa de Mestrado Internacional Intensivo em Engenharia Civil da UFP, com quem primeiramente sondei a possibilidade de empreender acordo de cooperação com alguma universidade brasileira para que pudesse fazer uso de instalações laboratoriais que me permitissem realizar uma pesquisa experimental, pela confiança a mim dispensada e pronta disposição em apoiar-me, com todos os seus esforços, de forma a tornar isso possível – atitude que me fez crente e convicto de que estava realmente no caminho certo para me tornar, finalmente, um pesquisador.

## ÍNDICE GERAL

Capítulo I – INTRODUÇÃO.....	1
I.1 Contexto e relevância .....	1
I.2 Motivação para o trabalho.....	3
I.3 Problemas e desafios .....	4
I.4 Objetivos do trabalho .....	5
I.4.1 Objetivo geral.....	5
I.4.2 Objetivos específicos.....	5
I.5 Metodologia de abordagem do tema .....	6
I.6 Limitações e exclusões do trabalho.....	7
I.7 Estrutura do trabalho .....	8
Capítulo II – REVISÃO DA LITERATURA.....	9
II.1 Considerações sobre termodinâmica.....	9
II.2 Aspectos físicos da radiação eletromagnética e sua detecção .....	11
II.3 Aspectos físicos dos corpos materiais e sua interferência na detecção .....	16
II.3.1 Principais aspectos que interferem na detecção no processo de condução.....	16
II.3.2 Principais aspectos que interferem na detecção no processo de convecção .....	20
II.3.3 Principais aspectos que interferem na detecção no processo de radiação .....	24
II.3.4 Interferência da opacidade, transparência e translucidez dos corpos .....	29
II.3.5 Efeito da profundidade e do tamanho dos defeitos .....	33
II.3.6 Interferência da cor, da textura e do tempo de exposição à fonte de calor .....	34
Capítulo III – ASPECTOS TÉCNICOS DA TERMOGRAFIA .....	45
III.1 Normas técnicas para serviços termográficos e literatura .....	45
III.2 Características técnicas relevantes dos equipamentos termográficos.....	46
III.3 Fundamentos de captura e interpretação de imagens termográficas .....	60
III.4 A formação do termografista .....	68
Capítulo IV – METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	69
IV.1 Introdução.....	69
IV.2 Descrição dos ensaios.....	81
IV.3 Objetivos dos ensaios .....	81
IV.4 Roteiro dos ensaios.....	82
IV.5 Lista de ensaios realizados .....	82
Capítulo V – ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	83
V.1 Ensaio de verificação da existência de fenda horizontal e fendas verticais .....	83
V.2 Ensaio de verificação da conformação do substrato.....	83
V.3 Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento de argamassa .....	84
V.4 Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento cerâmico .....	89
V.5 Ensaio de verificação de humidade por capilaridade .....	94
V.6 Ensaio de verificação de humidade por infiltração e vazamento de água .....	96
Capítulo VI – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	99
VI.1 Conclusões obtidas do estudo realizado.....	99
VI.2 Sugestões e recomendações para trabalhos futuros.....	100
Referências Bibliográficas.....	101
APÊNDICES .....	I
Apêndice A: método de cálculo do IFOV .....	II
Apêndice B: método de cálculo da máxima distância câmera/objeto .....	III

ANEXOS .....	IV
Anexo A: Principais normas técnicas do emprego da termografia .....	V
A.1 Relação das principais normas técnicas brasileiras: .....	V
A.2 Relação de normas técnicas estadunidenses: .....	VI
A.3 Relação das principais normas técnicas europeias: .....	VII
Anexo B: Exemplos de paletas de cores utilizadas pela Flir .....	X
Anexo C: Registros mínimos para relatórios de inspeções termográficas .....	XIII
Anexo D: Conhecimento e habilidades esperadas do termografista .....	XIV
D.1 Termografista Classe I.....	XIV
D.2 Termografista Classe II.....	XIV
D.3 Termografista Classe III .....	XV
ÍNDICE REMISSIVO .....	XVI

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – A supremacia da classe C.....	1
Figura 2 – Consumo de cimento no Brasil. ....	2
Figura 3 – Número de Engenheiros formados no Brasil, em diversas áreas. ....	4
Figura 4 – Fluxograma da metodologia da pesquisa. ....	7
Figura 5 – Aparato utilizado por William Herschel .....	11
Figura 6 – Dispersão da luz visível por um prisma. ....	11
Figura 7 – Campo elétrico, Campo magnético e Campo Eletromagnético. ....	12
Figura 8 – Fase, crista, vale, frequência, período e amplitude de uma onda.....	12
Figura 9 – Comprimento de onda e energia de uma onda. ....	13
Figura 10 – Espectro eletromagnético. ....	13
Figura 11 – Transmitância atmosférica do infravermelho.....	15
Figura 12 – Microbolômetro.....	16
Figura 13 – Materiais compostos por uma mesma substância com massas diferentes. .	17
Figura 14 – Barras de metal aquecido até o estado de incandescência. ....	24
Figura 15 – Sistema complexo de energia emitida e recebida por um corpo.....	25
Figura 16 – Curvas de corpo negro. ....	27
Figura 17 – Janela de infravermelho. ....	31
Figura 18 – Transparência do vidro <i>float</i> e cristais especiais ao infravermelho. ....	32
Figura 19 – Efeito da profundidade dos defeitos.....	33
Figura 20 – Efeito do tamanho dos defeitos. ....	33
Figura 21 – Sistema de cores de Munsell e catálogo de Munsell.....	34
Figura 22 – Esquema de construção do sistema de cores CIE-Lab.....	35
Figura 23 – Sistema de cores RGB.....	35
Figura 24 – Modelos HSL e HSV. ....	37
Figura 25 – Modelos RGB e CMY.....	38
Figura 26 – Interface com o usuário do Paint.....	38
Figura 27 – Colorímetro marca FRU, modelo WR10. ....	38
Figura 28 – Espectro da radiação solar para o caso do Sol no zênite.....	40
Figura 29 – Representação da absorvância incremental difusa da radiação solar.....	42
Figura 30 – Comportamento térmico geral de regiões com e sem defeito, $t_0 > t_1$ . ....	44
Figura 31 – Interferência da cor em um termograma. ....	44
Figura 32 – Influência da quantidade de <i>pixels</i> na resolução. ....	47
Figura 33 – Influência da quantidade de <i>bits</i> na resolução. ....	47
Figura 34 – Comparação de termogramas de com resoluções 160x120 e 640x512.....	48
Figura 35 – Comparação de termogramas com uso de diferentes lentes.....	50
Figura 36 – FOV, IFOV, HFOV, VFOV e a projeção do pixel de sensor no objeto. ....	51
Figura 37 – Opções de captura. ....	53
Figura 38 – Qualificação pela variação da distância entre a câmera e o objeto.....	53
Figura 39 – Mira da câmera e resolução MFOV.....	54
Figura 40 – Mira da câmera e representação do MFOV para os valores 3 e 5.....	54
Figura 41 – Enquadramento da mira no alvo do objeto. ....	55
Figura 42 – Função MSX da câmera UAV Flir Duo Pro R. ....	56
Figura 43 – Funcionalidade MultiSharp de seleção de foco. ....	57
Figura 44 – Captura de imagens em várias posições.....	61
Figura 45 – Emissividade aparente em metais e não metais. ....	62

Figura 46 – Interferência de superfícies reflexivas. ....	62
Figura 47 – Diferenças na leitura qualitativa com a alteração da cena. ....	63
Figura 48 – Paleta monocromática e colorida. ....	64
Figura 49 – Classificação da termografia. ....	67
Figura 50 – Imagem melhorada por meio do <i>software</i> FlirTools. ....	67
Figura 51 – Estruturas metálicas de ensaio. ....	70
Figura 52 – Tijolos utilizados nos ensaios. ....	70
Figura 53 – Calha de acumulação de água. ....	71
Figura 54 – Materiais utilizados no sistema hidráulico das muretas de ensaio. ....	72
Figura 55 – Sistema hidráulico das muretas de ensaio. ....	72
Figura 56 – Aquecedor elétrico. ....	72
Figura 57 – Proteções térmicas das muretas de ensaio. ....	73
Figura 58 – Cocar de proteção térmica do entorno. ....	73
Figura 59 – Marcações de posições de captura de termogramas. ....	74
Figura 60 – Fendas vertical e horizontal. ....	75
Figura 61 – Apresentação após conclusão do chapisco e retirada das fitas adesivas. ....	76
Figura 62 – Simulação de deslocamento de reboco. ....	77
Figura 63 – Simulação de deslocamento de revestimento cerâmico. ....	78
Figura 64 – Esquema técnico das muretas de ensaio. ....	79
Figura 65 – Muretas de ensaio com revestimento cerâmico pronto e acabado. ....	80
Figura 66 – Ensaio de verificação da conformação do substrato. ....	84
Figura 67 – Primeiros ensaios de verificação de deslocamento de reboco. ....	86
Figura 68 – Verificação de deslocamento de reboco com técnica aprimorada. ....	86
Figura 69 – Deslocamento de revestimento de argamassa em ângulos com CTBRA. ....	87
Figura 70 – Deslocamento de revestimento de argamassa em ângulos com CTARA. ....	88
Figura 71 – Deslocamento de revestimento cerâmico fosco com CTARA. ....	91
Figura 72 – Deslocamento de revestimento cerâmico brilhoso com CTBRA. ....	92
Figura 73 – Deslocamento de revestimento cerâmico brilhoso com CTARA. ....	92
Figura 74 – Verificação de humidade por capilaridade. ....	95
Figura 75 – Verificação de humidade superficial. ....	97
Figura 76 – Verificação de humidade por infiltração e vazamento de água. ....	97
Figura 77 – Cálculo do IFOV e da máxima dimensão do objeto. ....	II
Figura 78 – Cálculo da máxima distância entre a câmara e o alvo no objeto. ....	III
Figura 79 – Paleta <i>White Hot</i> . ....	X
Figura 80 – Paleta <i>Black Hot</i> . ....	X
Figura 81 – Paleta <i>Rainbow High Contrast</i> . ....	X
Figura 82 – Paleta <i>Ironbow</i> . ....	XI
Figura 83 – Paleta <i>Sepia</i> . ....	XI
Figura 84 – Paleta <i>Arctic</i> . ....	XI
Figura 85 – Paleta <i>Outdoor Alert</i> . ....	XII

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Comprimentos de onda e frequência das cores. ....	13
Quadro 2 – Comprimentos de onda, frequências e tecnologia do sensor. ....	14
Quadro 3 – Absortância muito distintas entre o visível e o espectro total da luz solar..	41
Quadro 4 – Absortância do branco gelo maior que cores visualmente mais escuras. ....	41

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de calor específico de alguns materiais .....	18
Tabela 2 – Valores de condutividade térmica do betão com argila expandida .....	19
Tabela 3 – Valores de condutividade térmica de alguns materiais isolantes.....	20
Tabela 4 – Valores médios de emissividade de alguns materiais.....	26
Tabela 5 – Espelho ideal, corpo transparente ideal e corpo negro .....	29
Tabela 6 – Materiais transparentes ao Infravermelho, por faixa espectral .....	32
Tabela 7 – Absortância para radiação solar (ondas curtas) para superfícies pintadas....	39
Tabela 8 – Classificação das principais normas técnicas .....	45
Tabela 9 – Fabricantes de equipamentos termográficos.....	46
Tabela 10 – Formatos mais comuns de termogramas.....	59
Tabela 11 – Características técnicas das câmeras termográficas utilizadas .....	69
Tabela 12 – Características dos revestimentos cerâmicos utilizados .....	71
Tabela 13 – Ensaio de verificação da conformação do substrato.....	83
Tabela 14 – Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento de argamassa..	85
Tabela 15 – Ensaio de deslocamento de reboco com variação de ângulo de captura .	85
Tabela 16 – Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento cerâmico.....	90
Tabela 17 – Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento cerâmico.....	91
Tabela 18 – Ensaio de verificação de humidade por capilaridade .....	95
Tabela 19 – Ensaio de verificação de humidade por infiltração de água .....	96

## GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENOR	Associação Espanhola de Normatização e Certificação
ACEPE	Associação Industrial do Poliestireno Expandido
ACEPE	Associação Industrial do Poliestireno Expandido
AFNOR	Associação Francesa de Normatização
AMN	Associação Mercosul de Normalização
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
API	Instituto Americano de Petróleo
ASME	Sociedade Americana de Engenharia Mecânica
ASNT	Sociedade Americana de Testes Não Destrutivos
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
AVAC	Sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
B I <sub>a</sub>	Classificação de revestimento cerâmico: $E \leq 0,5\%$
B II <sub>b</sub>	Classificação de revestimento cerâmico: $6\% \leq E \leq 10\%$
BR	Brasil
BSI	Instituto Britânico de Padronização
BVLOS	Além da Linha Visual de Visão (oculto, longe demais para se ver)
CAU	Conselho de Arquitetura e Urbanismo
CH-III	Cal Hidratada, tipo III (altos teores de carbonatos)
CIE-Lab	Comissão Internacional de Iluminação (Lab são cores)
CMY	Ciano, Magenta, Amarelo e Preto
CMYK	Ciano, Magenta, Amarelo e Preto
CNC	Confederação Nacional do Comércio de Bens, Serviços e Turismo
CONFEA	Conselho Federal de Engenharia e Agronomia
CPII-E32	Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno
CREA	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CTBRA	Câmara Termográfica de Baixa Resolução e Baixo Custo de Aquisição
CTARA	Câmara Termográfica de Alta Resolução e Alto Custo de Aquisição

DIN	Instituto Alemão de Padronização
DJI	Inovação de Grande Fronteira
DPI	Pontos por polegada
EN	Norma Europeia
END	Ensaio Não Destrutivo
EUA	Estados Unidos Americanos
EVA	Acetato-Vinilo de Etileno
EVLOS	Linha Visual de Visão Estendida (por binóculo, por exemplo)
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FGV	Fundação Getúlio Vargas
FIR	Infravermelho Distante
FOV	Campo de Visão
FOVH	Abertura Horizontal do FOV
FOVV	Abertura Vertical do FOV
GL	Ladrilho Vidrado
H	Dimensão horizontal
HC	Alto Contraste
HFOV	Campo de Visão Horizontal
hrs	Horas
HSG	Matiz, Saturação e Claridade
HSI	Matiz, Saturação e Intensidade
HSL	Matiz, Saturação e Claridade
HSV	Matiz, Saturação e Valor
HVC	Valor, Matiz e Saturação
i	Incidente
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IFOV	Campo de Visão Instantâneo
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	Organização Internacional de Normalização
JIS	Normas Industriais Japonesas
LEME	Laboratório de Estruturas e Modelos Experimentais

LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LWIR	Infravermelho de Onda Longa
MFOV	Campo de Visão de Medição
MRA	Medição, Registro e Análises
MS	Mato Grosso do Sul, um dos 27 estados federativos do Brasil
MWIR	Infravermelho de Onda Média
N	Normal
NBR	Norma Brasileira
NEDT	Temperatura Diferencial Equivalente ao Ruído
NFPA	Associação Nacional de Proteção contra Incêndios
NIR	Infravermelho Muito Próximo
NTSC	Comitê Nacional dos Sistemas de Televisão, dos EUA
PAL-M	Sistema de televisão em cores analógico brasileiro
PPI	<i>Pixels</i> por polegada
r	Refletido
RGB	Vermelho, Verde e Azul
RGBA	Vermelho, Verde, Azul e Claridade
RMUS	Gerenciamento de Frota de Sistemas Não-tripulados
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada
SECAM	Cor Sequencial com Memória
<i>sqrt</i>	Raiz quadrada
SWIR	Infravermelho de Onda Curta
TRC	Contraste de Funcionamento Térmico
TRC	Tubo de Raios Catódicos
UAV	Veículo Aéreo Não-tripulado
UET	Termografia com excitação por ultrassom
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
UFP	Universidade Fernando Pessoa
UGL	Ladrilho Não Vidrado
UHF	Frequência Ultra-Alta ( <i>Ultra High Frequency</i> )
URL	Localizador Padrão de Recursos
USP	Universidade de São Paulo
UV	Radiação Ultravioleta

UV-A	Radiação Ultravioleta de Onda Longa
UV-B	Radiação Ultravioleta de Onda Média
UV-C	Radiação Ultravioleta de Onda Curta
V	Dimensão Vertical
V1	Classe tonal para ladrilhos (de 1 a 4): aparência uniforme
V2	Classe tonal para ladrilhos (de 1 a 4): pouca variação
VFOV	Campo de Visão Vertical
VHF	Frequência Muito-Alta ( <i>Very High Frequency</i> )
VLWIR	Infravermelho de Onda Muito Longa
XYZ	Coordenadas do plano cartesiano
YAG	Cristal de Granada de Ítrio-Alumínio

## GLOSSÁRIO DE VARIÁVEIS

A	Área
a	Absorvidade
$arctag$	Arco Tangente
C	Capacidade térmica
c	Calor específico
$cos$	Cosseno
D	Densidade
E	Energia; Classificação de ladrilhos quanto à absorção de água
e	Espessura
$E_n$	Energia total irradiada por unidade de área
f	Frequência
FOV	Campo de Visão
$FOV_H$	Abertura Horizontal do FOV, em graus
$FOV_V$	Abertura Vertical do FOV, em graus
$H_{Alvo}$	Altura do alvo
$h_c$	Coefficiente de trocas térmicas por convecção
HFOV	Dimensão horizontal do FOV
HPixel	Dimensão horizontal do <i>pixel</i> do IFOV
IFOV	Campo de visão de 1 <i>pixel</i> , em <i>mRad</i>
k	Número de onda angular
K	Condutividade térmica
L	Calor latente; Distância
m	Massa
Q	Quantidade de calor
$Q_a$	Quantidade de calor absorvido
$q_c$	Intensidade do fluxo térmico por convecção
$Q_i$	Quantidade de calor incidente
$Q_r$	Quantidade de calor refletido
$Q_t$	Quantidade de calor transmitido ou refratado
R	Energia total irradiada por comprimento de onda

R	Resistência térmica à condução
r	Refletividade
R <sub>se</sub>	Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa
R <sub>si</sub>	Resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna
RT	Resistência térmica total
R <sub>t</sub>	Resistência térmica de superfície a superfície
<i>sen</i>	Seno
T	Período; temperatura em kelvin
t	Temperatura; tempo; transmissividade
t <sub>0</sub>	Tempo inicial
T <sub>a</sub> (t)	Temperatura média da superfície no tempo t
T <sub>a</sub> (t <sub>0</sub> )	Temperatura média da superfície no tempo inicial
<i>tan</i>	Tangente, função tangente
T <sub>d</sub> (t)	Temperatura da área com defeito no tempo t
T <sub>F</sub>	Temperatura da face fria
T <sub>nd</sub> (t)	Temperatura da área sem defeito no tempo t
T <sub>Q</sub>	Temperatura da face quente
TRC	Contraste de Funcionamento Térmico
U	Transmitância térmica
VFOV	Dimensão vertical do FOV
VPixel	Dimensão vertical do <i>pixel</i> do IFOV
y	Amplitude de onda
α	Energia absorvida
λ	Comprimento de onda
ε	Energia emitida
θ	Temperatura da superfície do sólido (parede)
ρ	Energia refletida
τ	Energia transferida ou refratada
ω	Frequência angular
Δt	Variação de temperatura

## GLOSSÁRIO DE CONSTANTES FÍSICAS

c	Velocidade da luz (no vácuo)
d	Constante de dispersão de Wien
e	Número de Euler
h	Constante de Planck
k	Constante de Boltzmann
$\rho$	Constante de Stefan

# Capítulo I INTRODUÇÃO

## I.1 Contexto e relevância

O Brasil experimentou, nos anos de 2003 a 2014, um expressivo crescimento da economia. Tal crescimento foi decorrente de políticas públicas agressivas de fomento dos níveis de emprego e distribuição de renda, com vistas à redução da desigualdade social e ao alcance de condições de vida mais dignas à população de baixa renda.

O êxito dessas políticas foi corroborado por alguns fatores presentes na conjuntura nacional à época: a estabilidade da economia, proporcionada pelo sucesso do Plano Real; a valorização das *commodities* no cenário internacional, face à voracidade da expansão chinesa que injetou um vultoso volume de capital estrangeiro na economia brasileira, a qual tem como um de seus alicerces a produção destes produtos; a grande demanda reprimida por moradias, que encontrou fomento em programas habitacionais de larga escala, como o Minha Casa Minha Vida; e a queda do dólar, em vista da retração da economia americana, decorrente do confronto no Afeganistão e à invasão do Iraque, favorecendo a balança comercial e o incremento das reservas nacionais desta moeda.

Toda essa conjuntura, aliada ao aumento gradual do salário mínimo, algumas vezes, com índices acima da inflação, juntamente com programas sociais de distribuição de renda, como o Bolsa Família, melhoraram expressivamente o poder aquisitivo das classes mais baixas da população, tirando milhões de pessoas da linha da miséria. A Figura 1 ilustra muito bem este momento áureo do Brasil.

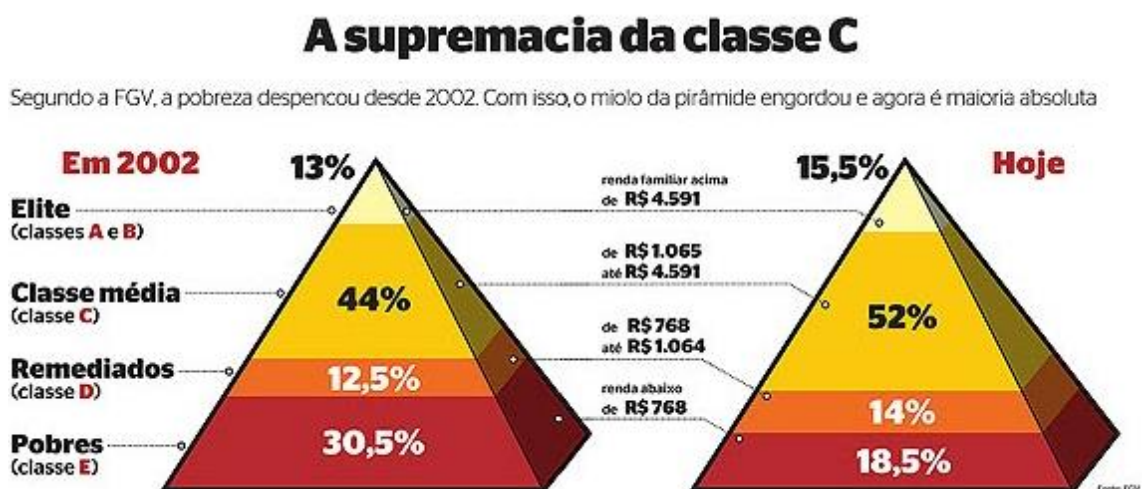


Figura 1 – A supremacia da classe C.  
Fonte: (FGV, 2008).

Este infográfico, reproduzido em diversos jornais, revistas e *sites* de notícias, tornou-se marcante na história dos brasileiros. Ele mostra como injetar dinheiro nas camadas mais humildes da população, em uma nação de pobres, por meio de programas sociais de distribuição de renda e de facilitação do crédito, levou uma multidão de pessoas às lojas. Um fenômeno socioeconômico que elevou o consumo, abrindo mais postos de trabalho, o que produziu mais renda, que, por sua vez, produziu ainda mais consumo, dando avivamento à indústria, gerando ainda mais empregos e acelerando a movimentação dos capitais, criando, assim, um círculo virtuoso de melhora da economia.

Uma das áreas da economia que mais cresceu foi o subsetor de edificações da indústria da construção civil nacional, levando ao surgimento de um fenômeno que logo ficou conhecido como “o *boom* da construção civil brasileira”. A Figura 2 fornece uma ideia da dimensão e velocidade deste crescimento.



Figura 2 – Consumo de cimento no Brasil.  
Fonte: (Cimento.org, 2017).

Percebe-se que, de 2004 a 2014, o consumo de cimento no Brasil mais que dobrou. Todavia, o mercado não estava preparado para uma expansão tão rápida.

A alta e repentina demanda por arquitetos, engenheiros, mestres-de-obras, pedreiros, serventes, eletricitas, encanadores, azulejistas e demais oficiais trouxe, num primeiro momento, uma grande valorização salarial para estes profissionais e, logo em seguida, uma horda de trabalhadores que não possuíam adequada capacitação para o trabalho. Todavia, estes trabalhadores não puderam ser ignorados.

Com o mercado muito aquecido, o emprego desta nova mão de obra logo se tornou inevitável, e, junto com ela, uma onda de não conformidades nas construções, que, associadas à até então precariedade na aplicação da lei do Código de Defesa do Consumidor em relação às obras civis e à ainda inexistência da Norma de Desempenho das Edificações, a ABNT NBR 15.575, que só viria a ser aprovada em 2013, resultaram na consolidação de um grande número de patologias nas edificações novas.

De todo este contexto, emergiu um novo filão no mercado de atuação profissional para arquitetos e engenheiros civis: o dos consultores. Estes são profissionais que atuam na avaliação e proposição de soluções para patologias instaladas nas edificações ou na elaboração de laudos periciais e pareceres técnicos para subsidiar processos judiciais de indenização ou reparação de danos.

Assim, a relevância do tema desta pesquisa repousa sobre o fato de que a termografia é um importante, mas ainda desconhecido, recurso no diagnóstico de algumas destas patologias, podendo, portanto, instrumentalizar engenheiros civis e arquitetos consultores com uma valorosa ferramenta de trabalho.

## **I.2 Motivação para o trabalho**

Como ilustrado na Figura 2, entre o final de 2014 e o início de 2015, o cenário nacional da construção civil mudou completamente, o mercado foi severamente afetado pelas consequências de um crescimento econômico não sustentável, fomentado pela facilitação do crédito imobiliário e por um considerável período favorável para o Brasil no comércio externo, revelando a até então oculta fragilidade da macroeconomia brasileira.

A euforia, que levou milhões de brasileiros aos bancos, em busca do crédito fácil, agora se encontrava arrefecida pelo grande nível de endividamento das famílias brasileiras e por um novo cenário econômico nacional, incapaz de manter o mesmo giro de capitais dos anos anteriores.

Em setembro de 2015, o número de famílias endividadas atingiu o percentual de 63,5%. Dentre elas, 23,1% declaram possuir dívidas em atraso e 8,6% afirmaram não ter condições de honrar com os compromissos assumidos (CNC, 2015).

Em dezembro de 2017, a Síntese de Indicadores Sociais divulgou que 25,4% dos brasileiros, o que correspondia a 52,168 milhões de pessoas, ganhavam menos do que US\$ 5,5 por dia, critério adotado pelo Banco Mundial como linha da pobreza. O mesmo estudo apontou que 4,2% dos brasileiros viviam em pobreza extrema (IBGE, 2017).

Os avanços sociais alcançados até 2014 haviam regredido significativamente. Paralelamente, a formação de novos profissionais de engenharia deu um salto. A quantidade de cursos de formação cresceu de 963, em 2004, para 3.774, em 2015, perfazendo um aumento de 392% (USP, 2015). Mais expressivo, ainda, foi o incremento na formação de novos profissionais de engenharia, tal como ilustrado na Figura 3.

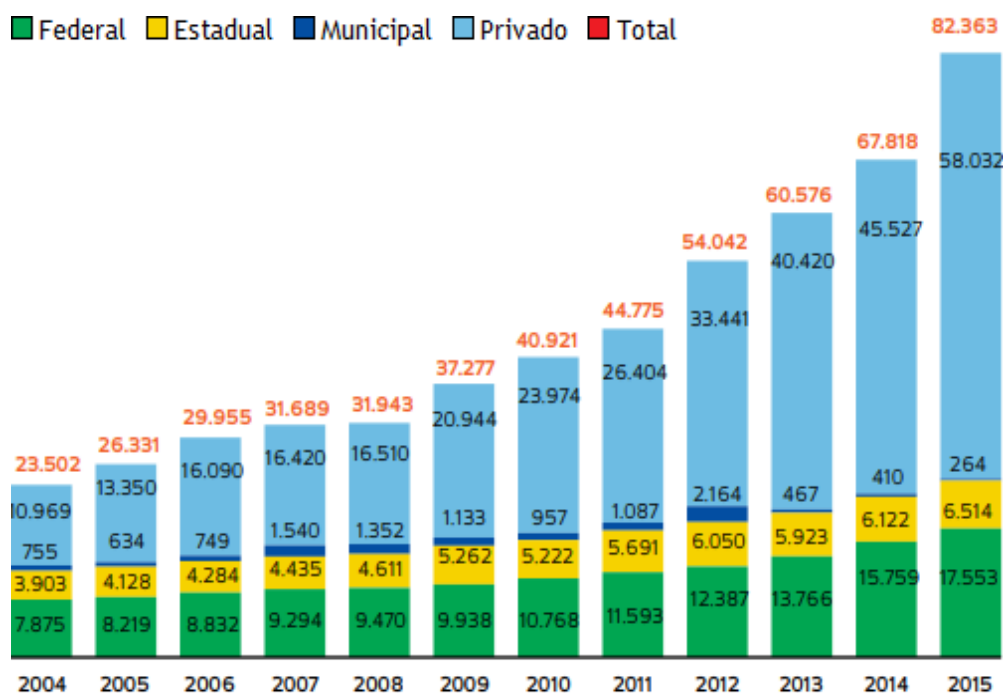


Figura 3 – Número de Engenheiros formados no Brasil, em diversas áreas.  
Fonte: (FAPESP, 2017).

Um fenômeno semelhante também se verificou na formação de novos arquitetos, que, no Brasil, concorrem no mesmo mercado. Hoje o país possui 310.849 engenheiros civis (CONFEA/CREA, 2018) e 164.786 arquitetos e urbanistas (CAU, 2018). Este cenário colocou milhares de profissionais em situação de desemprego.

Assim, lograr êxito na profissão requer a busca por diferenciação, ou seja, capacitar-se para fazer algo que os outros não fazem, a fim de se posicionar em nichos de um mercado bastante saturado onde ainda há carência de profissionais.

Em função desta conjuntura, emerge a motivação para este trabalho, isto é, explorar uma nova frente laboral do mercado da construção civil, que engloba os profissionais de engenharia, com atuação em um nicho emergente, que ora se encontra com alta demanda e baixa oferta de profissionais, com vistas a obter rápida rentabilidade.

### I.3 Problemas e desafios

Patologias da construção civil é uma área de pesquisa que envolve um grande e variado número de problemas instalados em edificações, que resultam ordinariamente de não conformidades de projeto ou de execução das obras civis.

De entre esses inúmeros problemas há aqueles cujo diagnóstico é extremamente difícil ou demasiadamente oneroso e cujas técnicas tradicionais de inspeção ensejam o desmonte ou destruição parcial do que se encontra edificado.

Faz parte deste universo de problemas as infiltrações de água em alvenarias, cujo método tradicional de busca pela origem dos vazamentos é a quebra de revestimentos e paredes; e o deslocamento de revestimentos em fachadas de edifícios, cuja técnica tradicional de verificação é a inspeção *in situ*, por percussão manual ou marteleto, com uso de andaimes ou balancins. Outra patologia muito difícil de ter sua fonte identificada é a sobrecarga localizada em instalações elétricas, cujo sintoma característico é o desarmamento constante de disjuntores, pois nem sempre a simples leitura do projeto elétrico ou a verificação da carga efetivamente instalada torna claro a causa desta não conformidade. Ainda, é possível verificar a eficiência de sistemas AVAC.

Todavia, novas técnicas vêm surgindo, nomeadamente a utilização de câmeras termográficas e radiométricas com o objetivo de diagnosticar patologias como infiltrações, vazamentos ocultos de água, e deslocamento de revestimentos.

## **I.4 Objetivos do trabalho**

### **I.4.1 Objetivo geral**

Realizar um estudo em profundidade do conhecimento teórico disponível e verificar experimentalmente, com o a utilização de equipamentos de termografia e radiometria, a eficácia destes equipamentos no diagnóstico da origem de infiltrações de água, da existência e localização de deslocamentos de revestimentos. Em particular, serão focados os revestimentos de fachadas de edifícios, dado ao risco que tal ocorrência acarreta à segurança das pessoas, face à velocidade de queda que os fragmentos adquirem, sobretudo se provenientes dos andares mais superiores.

### **I.4.2 Objetivos específicos**

- ✓ Emergir o conhecimento teórico disponível, tanto acadêmico como o proveniente de normalizações, sobre o uso da termografia na investigação de patologias nas edificações;

- ✓ Verificar experimentalmente a eficácia do uso de câmeras termográficas para investigar e detectar a origem de infiltrações de água, vazamentos ocultos e apurar a existência de deslocamentos de revestimentos, tanto de argamassa quanto cerâmico, no interior e exterior das edificações; e

- ✓ Comparar as diferenças, vantagens e limitações de câmeras termográficas de diferentes valores de resolução de imagens para o uso específico de diagnóstico de patologias nas edificações, por meio de ensaios experimentais.

## **I.5 Metodologia de abordagem do tema**

A presente pesquisa é de natureza aplicada, pois objetiva gerar conhecimento para o avanço das práticas de engenharia com foco em uma aplicação definida: verificar a eficácia do uso de equipamentos de termografia e radiometria no diagnóstico de patologias da construção civil.

A forma é tanto quantitativa quanto qualitativa, pois enseja a análise de resultados das atividades de laboratório não apenas pela frieza dos números como também pelas impressões percebíveis das imagens produzidas para o diagnóstico das patologias que foram alvo desta pesquisa.

Têm objetivo exploratório, pois buscou-se emergir informações quanto à empregabilidade dos equipamentos estudados e estabelecer suas possibilidades e limitações no imageamento térmico e radiométrico como recurso ao diagnóstico da existência ou não das patologias estudadas em edificações.

Quanto aos procedimentos, consiste em uma pesquisa experimental, pois está orientada para a construção do conhecimento por meio do imageamento termográfico e radiométrico e, posterior, análise rigorosa dos dados obtidos em medições realizadas no interior de um laboratório, a fim de descrever, ao final, os resultados alcançados.

De tal forma, buscou-se emergir uma aprendizagem concreta, alicerçada no resultado de práticas realizadas em laboratório, orientadas ao que frequentemente se encontra nas rotinas de trabalho de engenheiros e arquitetos, quando solicitados a investigar e diagnosticar patologias nas edificações. Assim, adotou-se o método dedutivo.

A estratégia de abordagem consistiu na realização de ensaios em ambiente controlado sobre painéis construídos para a simulação de patologias em condições climáticas similares às encontradas geralmente em fachadas de edifícios.

As patologias propositalmente engendradas foram:

- ✓ Presença de fendas entre os blocos de paredes;
- ✓ Deslocamento de reboco e de revestimento cerâmico;
- ✓ Infiltrações de água por excesso de humidade ou via rachaduras;
- ✓ Capilaridade de água em paredes, vinda das fundações; e
- ✓ Vazamentos de água de tubos hidráulicos.

As condições climáticas que se buscou simular foram:

- ✓ Condição de sombreamento;
- ✓ Condição de insolação; e
- ✓ Condição de chuva.

Tais ensaios tiveram como objetivo principal a familiarização com as imagens termográficas obtidas para a aquisição de proficiência nas competências e habilidades de interpretação de imagens termográficas, de modo a desenvolver perícia no discernimento em um termograma do que realmente é a representação de uma manifestação patológica ou o registro de uma anomalia térmica imprevista, capaz de induzir a um erro de interpretação. Para tal, as imagens foram coletadas com câmeras termográficas de diferentes resoluções.

No final, é realizado um estudo comparativo dos resultados alcançados e sua análise, com vistas a evidenciar as boas práticas na produção e interpretação de termogramas, bem como elencar as condições de contorno que favorecem ou prejudicam a obtenção dos melhores resultados. O fluxograma da Figura 4 ilustra essa estratégia de abordagem.

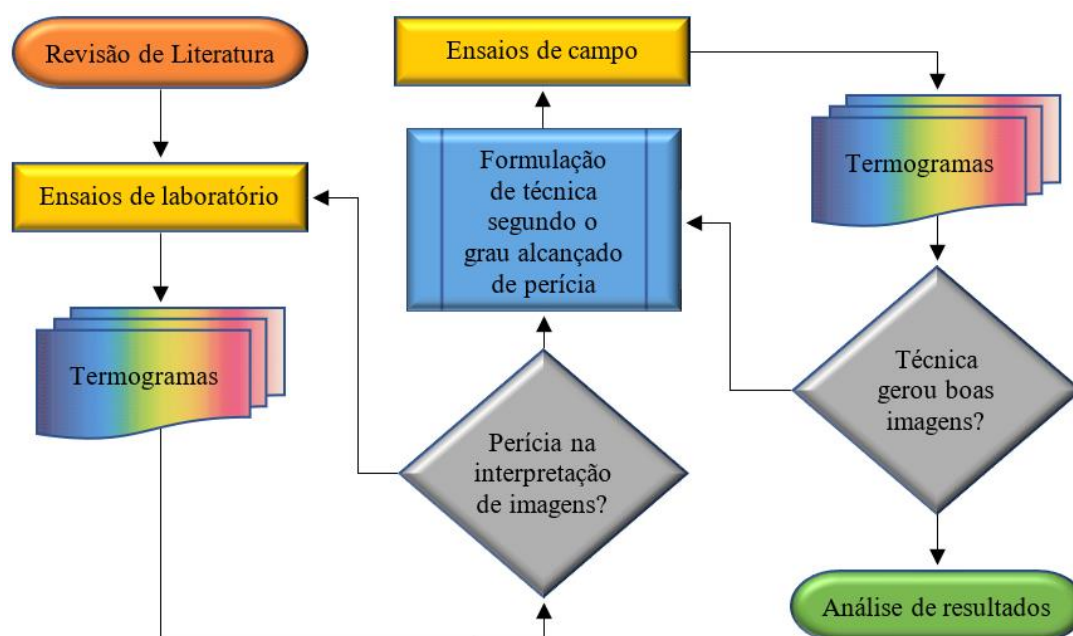


Figura 4 – Fluxograma da metodologia da pesquisa.

Fonte: o autor.

## I.6 Limitações e exclusões do trabalho

Este trabalho está limitado às capacidades técnicas dos equipamentos eleitos como meios de pesquisa e às possibilidades de simulação de patologias no interior do laboratório de pesquisa utilizado. Atividades de campo restaram limitadas pelas restrições sanitárias impostas pelo poder público, decorrentes da pandemia de COVID-19.

Constituem exclusões à esta pesquisa a investigação das causas dessas patologias, visto que a proposta é adquirir as competências e habilidades para, por meio do uso da termografia e da radiometria, tão somente as identificar, localizar e documentar.

Da mesma forma, abstêm-se neste trabalho em sugerir qualquer proposta para dar solução às patologias estudadas ou emergir quaisquer técnicas, métodos ou mesmo boas práticas para solucioná-las.

## **I.7 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está organizado em seis capítulos.

O Capítulo I compreende a introdução do trabalho, onde são abordados o contexto e relevância da temática em voga, a motivação do autor para escrevê-lo, os problemas e desafios a serem superados, os objetivos do trabalho, a metodologia adotada e as limitações e exclusões do campo de estudo.

No Capítulo II aborda-se a revisão da literatura, onde procura-se emergir ao leitor os conceitos necessários para familiarizá-lo com o objeto de estudo, que se reveste de certo grau de profundidade técnica; e o resultado de alguns estudos já realizados, com ênfase na interferência de determinados aspectos na qualidade de produção de termogramas.

O Capítulo III apresenta a normatização nacional e internacional para os serviços termográficos em vigência, aborda as características técnicas relevantes dos equipamentos de leitura térmica e radiométrica, inclusive orientando para escolha na aquisição e quanto as boas práticas de operação, interpretação de imagens e produção de relatórios de inspeção. Também aborda os requisitos da formação do termografista.

No Capítulo IV é justificado a razão de realização dos ensaios, apresentado o local de realização, os materiais utilizados, as atividades de preparação, a forma como foram simuladas as patologias alvo de estudo, a descrição dos métodos de realização e o objetivo a ser alcançado em cada um dos ensaios realizados.

O Capítulo V registra e relata os ensaios realizados em laboratório, sua aplicação no mundo mercadológico, bem como expõe a análise dos dados obtidos, discutindo-os à luz dos objetivos deste trabalho.

Finalmente, no Capítulo VI são apresentadas as conclusões à cerca dos resultados alcançados, as sugestões para trabalhos futuros, bem como recomendações do autor àqueles que desejem debruçarem-se sobre o instigante universo da termografia.

Para além destes capítulos citados, foram escriturados diversos elementos pré-textuais, como sumários e glossários, para dar suporte à leitura. E elementos pós-textuais, como as referências bibliográficas utilizadas, índice remissivo, apêndices e anexos – peças de grande valia para apoiar e subsidiar estudos futuros.

## Capítulo II

# REVISÃO DA LITERATURA

### II.1 Considerações sobre termodinâmica

O conceito de calor transita entre a Teoria do Calor como Fluido, defendida por Galileu Galilei e Antoine Laurent de Lavoisier, e a Teoria do Calor como Resultado do Movimento, também conhecida como Teoria Cinética do Calor, que tem como adeptos Roger Bacon, Johannes Kepler, Daniel Bernoulli e Benjamin Thompson. Mas, ambas são deficitárias, pois a primeira não explica satisfatoriamente a produção de calor por atrito e, a segunda, não explica a transmissão do calor no vácuo (Sampaio & Calçada, 2001).

No entanto, há consenso de que calor é a energia que se transfere de um corpo para outro exclusivamente devido à diferença de temperatura entre ambos (Axt & Brückmann, 1989).

O calor é o objeto de estudo da termofísica. A termologia é a parte da termofísica que se incumbe de estudar os fenômenos relativos ao aquecimento e resfriamento dos corpos. A termodinâmica se ocupa de analisar as causas e os efeitos que ensejam as trocas de calor, relacionando-as com outros conceitos: pressão, volume, energia e trabalho.

As Leis da Termodinâmica são:

- ✓ Lei Zero ou Lei do Equilíbrio Térmico: aduz que quando dois corpos de temperaturas distintas entram em contato, o que estiver mais quente transferirá energia ao outro até que cesse a diferença de temperatura entre ambos;
- ✓ Primeira Lei da Termodinâmica: obsecra que a energia é conservativa, ou seja, não pode ser criada ou destruída, somente transferida ou transformada;
- ✓ Segunda Lei da Termodinâmica: infere que a transferência de calor sempre ocorre do corpo mais quente para o mais frio, de forma espontânea e irreversível;
- ✓ Terceira Lei da Termodinâmica: postula que quando a temperatura de um corpo é de tal forma transferida, que se aproxima do zero absoluto (0 K), a entropia deste corpo tende à zero, sendo, portanto, uma impossibilidade levar um corpo ao zero absoluto.

As transferências de calor entre os corpos podem ocorrer por três diferentes processos:

- ✓ Condução, quando o calor é transmitido por meio sólido, ou pelo contato entre corpos sólidos;
- ✓ Convecção, quando o calor é transmitido em meio fluído, líquido ou gasoso, por fluxos determinados por diferenças de densidade, chamados correntes convectivas; e
- ✓ Radiação, quando há transmissão de calor por ondas eletromagnéticas, em qualquer meio, inclusive no vácuo. Todo o corpo que possui calor, emite ondas eletromagnéticas.

A exposição à radiação é geralmente designada por irradiação. Ambas as terminologias não se confundem com radioatividade, que designa um tipo particular de radiação: a ionizante.

A termografia pode ser também entendida como a ciência que trata da reprodução de imagens a partir da emissão de radiação infravermelha (Getrotech, 2017).

Para discorrer sobre termografia, primeiramente deve-se entender de onde ela se origina. Sua origem advém da descoberta da radiação eletromagnética e da luz infravermelha. E o ser humano vive em um mundo pleno de radiação eletromagnética. Tanto que, ao longo da evolução da vida, diversas espécies biológicas desenvolveram sensores para percebê-la. Os olhos do ser humano, por exemplo, são sensíveis à radiação eletromagnética no espectro da luz visível. Todas as outras formas de radiação eletromagnética, como o infravermelho, são invisíveis ao olho humano (MRA, 2011).

No ano de 1800 o astrônomo alemão William Herschel, curioso com as diferenças térmicas entre as cores dispersadas da luz branca por um prisma, decidiu fazer um experimento decompondo a luz solar, em suas sete cores visíveis, sobre uma folha de papel. Percebeu que a temperatura aumentava à medida que se passava do violeta para o vermelho. Mas, mais intrigante ainda, descobriu que a temperatura mais alta ocorria para além do vermelho, para além do visível (Mendonça, et al., 2013).

Decidido a provar a hipótese, providenciou um suporte móvel com quatro apoios e o cobriu com papel branco. Neste papel, ele desenhou cinco linhas paralelas à extremidade do suporte, separadas por uma distância de meia polegada uma da outra, mas de modo que a primeira das linhas pudesse estar a apenas  $\frac{1}{4}$  de uma polegada da borda. Interceptou as linhas com três perpendiculares, sendo a segunda a  $2'' \frac{1}{2}$  da primeira; e a terceira a quatro polegadas da primeira. Sobre o suporte, posicionou três termômetros de bulbo escurecido. Herschel variou a posição dos termômetros, verificando as diferentes medições da temperatura (Oliveira & Silva, 2014), tal como ilustrado na Figura 5.

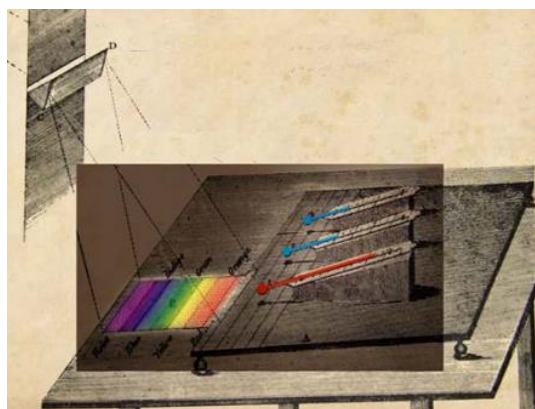


Figura 5 – Aparato utilizado por William Herschel para investigar o poder de aquecer e iluminar das diferentes cores prismáticas.  
Fonte: (Silva, 2016).

Com o experimento, comprovou que após o violeta não havia variação significativa da temperatura, mas a região mais aquecida estava para além do vermelho. Essa percepção do aumento da temperatura pelas diferentes faixas de luz visível dispersadas por um prisma é melhor ilustrada na Figura 6.

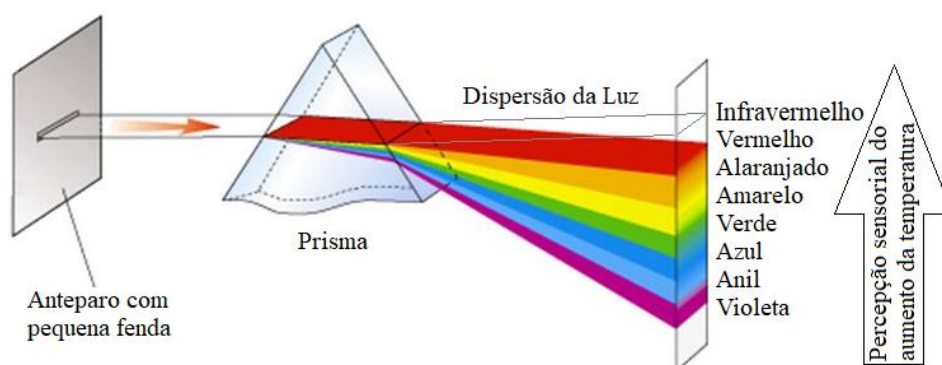


Figura 6 – Dispersão da luz visível por um prisma.  
Fonte: adaptado de (Carneiro, s.d.).

Assim, concluiu que havia raios caloríficos emitidos pelo sol com alto poder de aquecimento, mas nenhum poder de sensibilizar o olho humano (Oliveira & Silva, 2014). Esses raios ficariam, anos mais tarde, conhecidos como os raios infravermelhos.

## II.2 Aspectos físicos da radiação eletromagnética e sua detecção

Sabe-se da física que uma carga estática cria em torno de si um campo elétrico que ocupa uma região no espaço. Quando esta carga entra em movimento, ela cria em torno de si um segundo campo, magnético. Este campo também ocupa uma região no espaço (Sampaio & Calçada, 2001).

Esses campos, que ensejam grandezas vetoriais, oscilam, aumentando e diminuindo periodicamente, ora em um sentido, ora no sentido oposto, ao mesmo tempo em que se movem no espaço, chama-se isso de fase.

Embora mantenham o mesmo período, os campos elétrico e magnético oscilam em direções mutuamente perpendiculares, e sua energia enfraquece com a distância (Sampaio & Calçada, 2005).

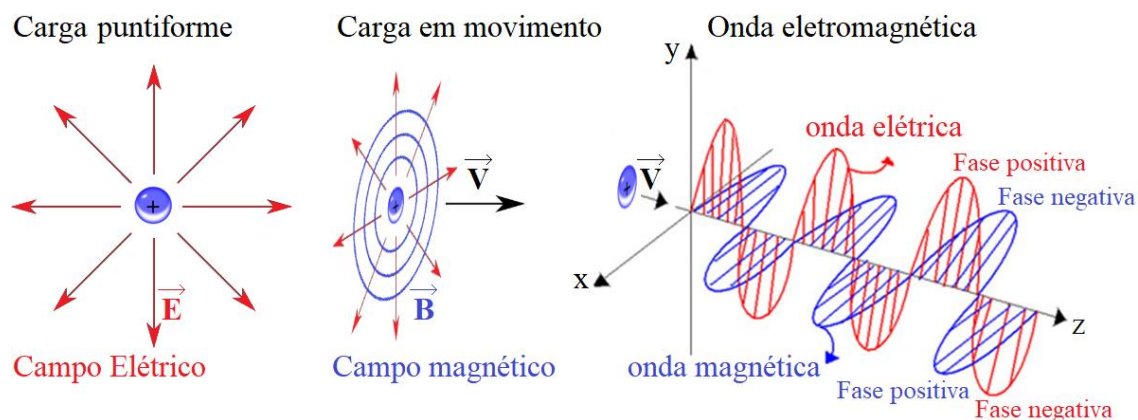


Figura 7 – Campo elétrico, Campo magnético e Campo Eletromagnético.  
Fonte: o autor.

Mas, para se descrever mais adequadamente uma onda, ainda é necessário considerar sua forma. Em geral, uma forma sinusoidal, como a da onda da Figura 10, pode ser descrita tal como uma função seno, com tudo o que a trigonometria oferece.

Nessa senoide, nomina-se cristas os picos superiores da onda; vales, os picos inferiores; e amplitude, o módulo do deslocamento máximo desses elementos a partir de suas posições de equilíbrio de fase. À distância entre duas cristas ou dois vales, dá-se o nome comprimento de onda; e o número de vibrações, ou ciclos completos, medido em um intervalo de tempo, frequência. Seu inverso, ou seja, o tempo decorrido para que um ciclo de vibração seja completado, denomina-se período (Walker, 2006).

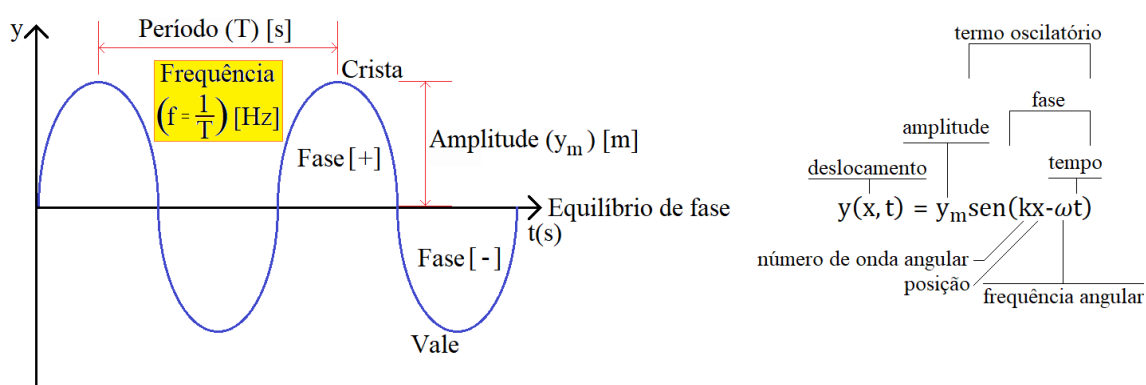


Figura 8 – Fase, crista, vale, frequência, período e amplitude de uma onda.  
Fonte: o autor.

Ao se mudar a abscissa do gráfico da Figura 8, de unidade de tempo para unidade de medida linear, obtém-se a dimensão do comprimento da onda, como pode-se constatar na Figura 9.

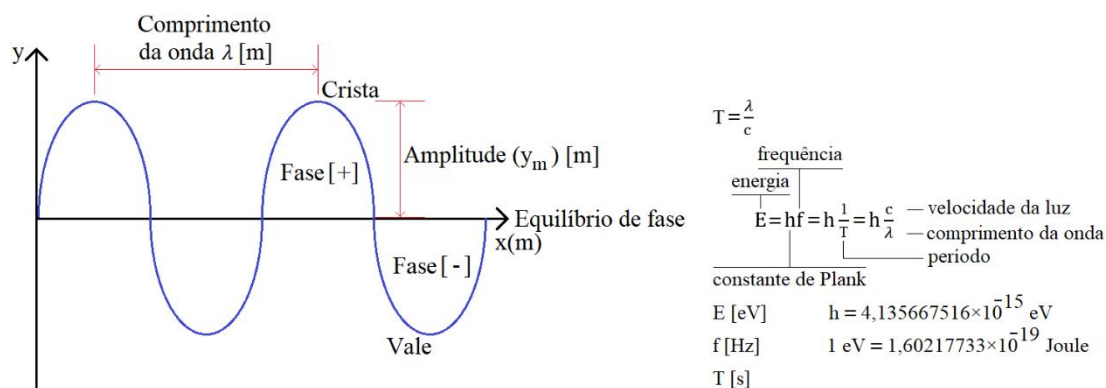


Figura 9 – Comprimento de onda e energia de uma onda.  
 Fonte: o autor.

Como toda onda se desloca no vácuo à velocidade da luz, a partir de seu comprimento pode-se determinar a sua energia, valendo-se da constante de Planck, que foi determinada em um estudo que ficou conhecido como “catástrofe do ultravioleta” (Nussenzveig, 2014). Assim, pode-se verificar que o comprimento de onda, frequência e energia nos permitem qualificar as ondas, agrupando-as para melhor estudá-las.

Por exemplo, o espectro eletromagnético visível ao olho humano está compreendido por ondas com comprimento entre 380 a 740 nanômetros e frequência entre 480 e 680 terahertz. O Quadro 1 compila esses valores.

Cor visível	Comprimento de onda (nm)	Frequência (THz)
Vermelho	625 – 740	480 – 405
Laranja	590 – 625	510 – 480
Amarelo	565 – 590	530 – 510
Verde	500 – 565	600 – 530
Ciano	485 – 500	620 – 600
Azul	440 – 485	680 – 620
Violeta	380 – 440	790 – 680

Quadro 1 – Comprimentos de onda e frequência das cores.  
 Fonte: (Silva, 2007).

Para além do visível, a Figura 10 classifica o espectro eletromagnético.

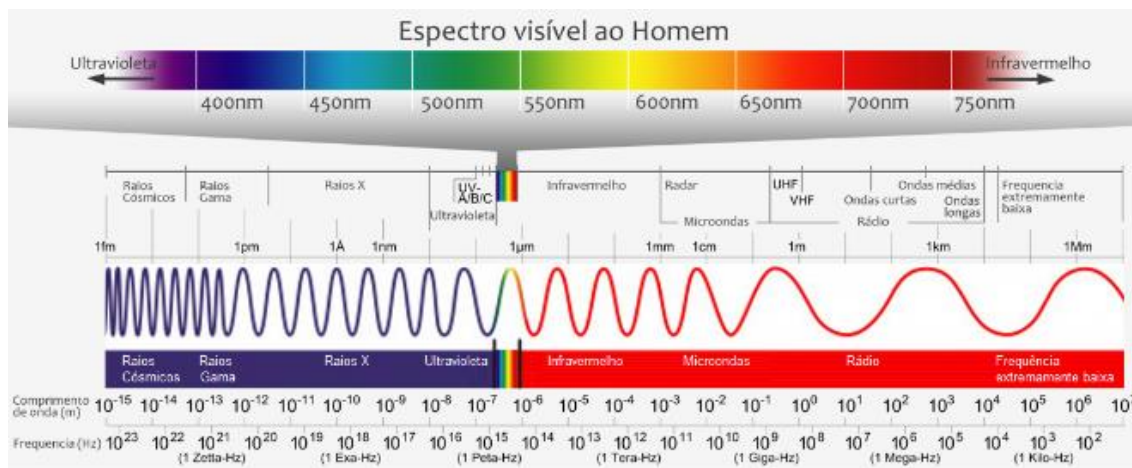


Figura 10 – Espectro eletromagnético.  
 Fonte: adaptado de (Stefenon, 2015).

Nos interessa estudar a faixa do espectro que compreende a radiação infravermelha, ou seja, ondas com comprimento entre 780 a  $10^6$  nm e frequência entre 0,3 a 430 THz. Nesta faixa, a energia varia entre 1,589487 e  $1,2398 \cdot 10^{-3}$  eV, bem menor que 10 eV, portanto, a radiação infravermelha é não ionizante (Knoll, 2010).

No entanto, o comportamento do infravermelho neste amplo espectro não é homogêneo e grande parte desse espectro não é útil porque a radiação é bloqueada pela atmosfera (Curityba, et al., 2018).

Ademais, para cobrir todo o espectro, são necessários diferentes tipos de sensores, pois cada um se mostra eficiente apenas para uma determinada região espectral.

O Quadro 2 compila os valores característicos dos comprimentos de onda e da frequência do infravermelho com os sensores em suas subdivisões por região espectral.

Banda espectral	Frequência (THz)	Comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )	Tecnologia do sensor
Infravermelho Muito Próximo <i>Near Infrared (NIR)</i>	430 a 214	0,78 a 1,1	Si (0,5–1,1 $\mu\text{m}$ )
			InGaAs (0,8–1,8 $\mu\text{m}$ )
Infravermelho de Onda Curta <i>Short Wave Infrared (SWIR)</i>	214 a 100	1,1 a 2,5	PbS (1,3–3,5 $\mu\text{m}$ )
			InGaAs (0,8–1,8 $\mu\text{m}$ )
			InAs (1–3,8 $\mu\text{m}$ )
Infravermelho de Onda Média <i>Mid Wave infrared (MWIR)</i>	100 a 37	2,5 a 5	InSb (3–5,5 $\mu\text{m}$ )
			PbSe (2–6 $\mu\text{m}$ )
			HgCdTe (2–14 $\mu\text{m}$ )
Infravermelho de Onda Longa <i>Long Wave Infrared (LWIR)</i>	37 a 20	8 a 14	Microbolometers
			HgCdTe (2–14 $\mu\text{m}$ )
Infravermelho de Onda Muito Longa <i>Very Long Wave Infrared (VLWIR)</i>	20 a 0,3	14 a 25	HgCdTe, ZnSe, InSb (12–22 $\mu\text{m}$ )
Infravermelho Distante <i>Far Infrared (FIR)</i>			25 a 1000

**Legenda:**

<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #800000; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Infravermelho Muito Próximo (NIR)	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Infravermelho de Onda Longa (LWIR)
<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FF4500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Infravermelho de Onda Curta (SWIR)	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FFFF00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Infravermelho de Onda Muito Longa (VLWIR)
<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FF8C00; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Infravermelho de Onda Média (MWIR)	<span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; background-color: #FFDAB9; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Infravermelho Distante (FIR)

Quadro 2 – Comprimentos de onda, frequências e tecnologia do sensor.

Fonte: adaptado de (Dhar, et al., 2013).

As faixas de NIR e SWIR são detectadas como o resultado da excitação do sensor às reflexões da luz invisível nos objetos, transformada em impulsos elétricos. Um sistema computacional se encarrega de converter esses impulsos em imagens inteligíveis, apresentadas em uma escala de cinza ou em um gradiente de cores. São particularmente úteis ao campo da espectroscopia de materiais; para medições em corpos acima dos 700°C, quando a alta temperatura pode provocar, além da emissão de calor, a emissão de luz; e para levantamento de áreas com importante humidade diferencial, posto que as moléculas de H<sub>2</sub>O absorvem a radiação infravermelha (Ibarra-Castanedo, et al., 2015).

Já as faixas de MWIR e LWIR são detectadas como o resultado da captação das emissões térmicas dos objetos, transformada em impulsos elétricos. E, da mesma forma, um sistema computacional se encarrega de converter esses impulsos em imagens. Como essa tecnologia é baseada na emissão de calor, a presença de luz torna-se pouco relevante, embora algumas tecnologias recentes estejam inovando ao combinarem sensores térmicos com câmeras usuais de luz visível, para compor, por sobreposição, imagens com maior nível de detalhamento e definição, reduzindo a exigência de esforço na interpretação (Pereira, et al., 2017). As faixas de VLWIR e FIR são de interesse do sensoriamento remoto e da astronomia.

A escolha dessas faixas está relacionada principalmente com a transmitância da atmosfera à radiação infravermelha, que varia de acordo com o comprimento de onda da radiação. Quanto maior a transmitância atmosférica à radiação infravermelha, melhor o desempenho do termovisor. As maiores transmitâncias estão compreendidas, aproximadamente, nas bandas espectrais de MWIR e de LWIR. Dentre elas, a faixa de LWIR é a mais utilizada por apresentar maior sensibilidade a objetos à temperatura ambiente e melhor transmitância através de neblina (Caldeira, 2016).

A Figura 11 ilustra as bandas espectrais em tela e suas respectivas transmitâncias atmosféricas, para uma melhor compreensão.

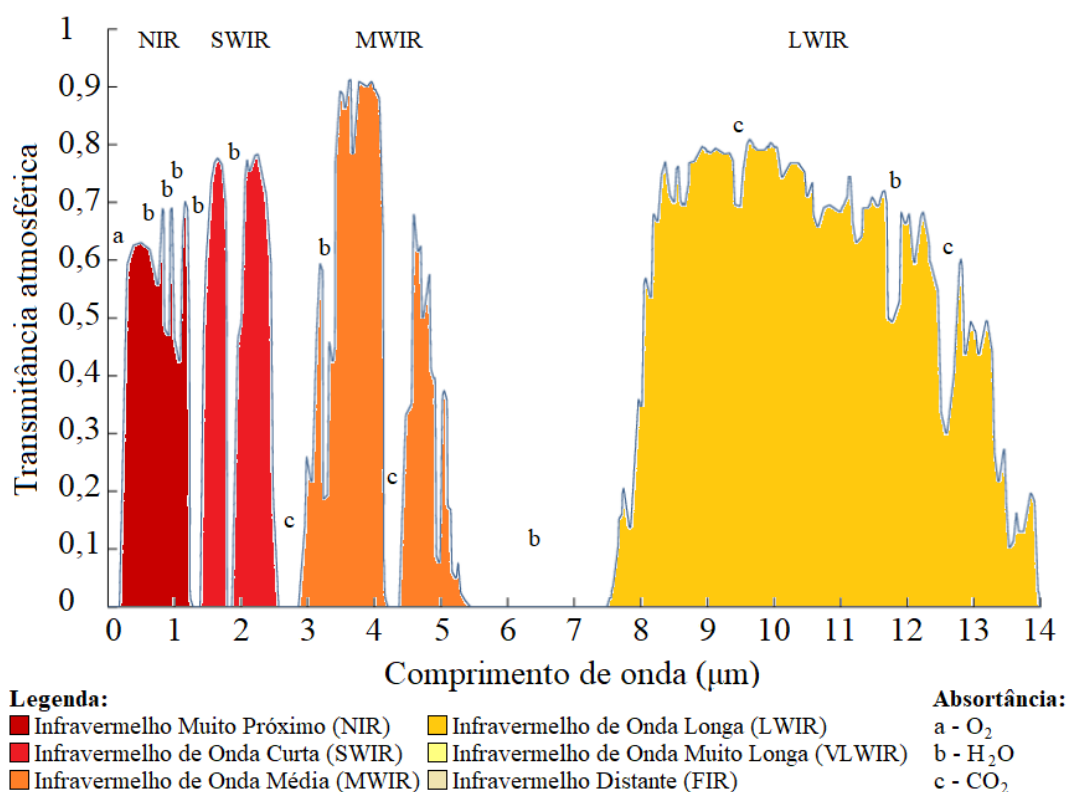


Figura 11 – Transmitância atmosférica do infravermelho.

Fonte: adaptado de (Usamentiaga, et al., 2014).

Além disso, a tecnologia empregada na faixa de LWIR é o microbolômetro, um tipo de detector que tem a vantagem de dispensar o resfriamento criogênico exigido pelos dispositivos baseados em HgCdTe e InSb, que tornam esses equipamentos volumosos, pesados e dispendiosos, restritos à astronomia e a sistemas militares (Rogalski, 2002).

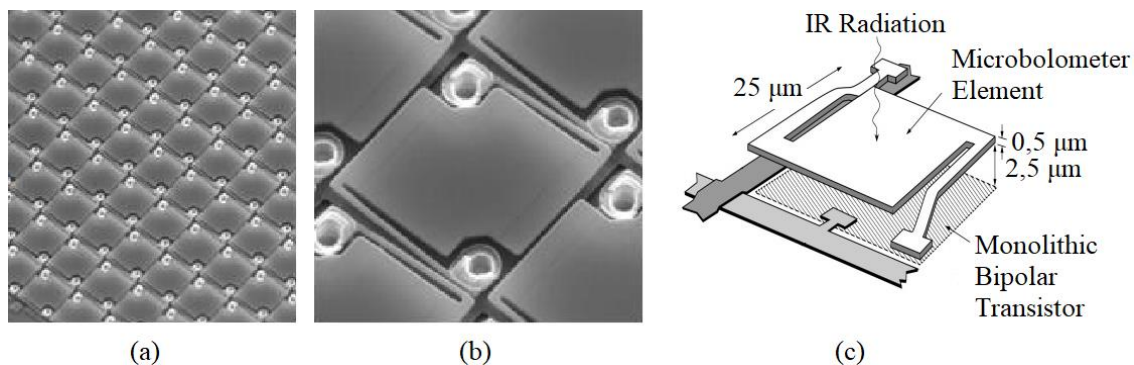


Figura 12 – Microbolômetro.

(a) Sistema de detecção por Matriz de Plano Focal. (b) Microbolômetro. (c) Detalhamento.  
 Fonte: (Caldeira, 2016).

### II.3 Aspectos físicos dos corpos materiais e sua interferência na detecção

#### II.3.1 Principais aspectos que interferem na detecção no processo de condução

No processo de transferência de calor por condução, onde sobressaem-se as Leis Zero e Segunda da Termodinâmica, os corpos materiais também possuem propriedades físicas que interferem na detecção termográfica. A primeira delas, e talvez a mais relevante, pois enseja a razão de existir da termografia, é a capacidade térmica dos materiais, que se relaciona com a capacidade que um corpo tem de receber ou ceder calor.

Capacidade térmica é definida como a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C a temperatura de um corpo (Silva & Filho, 2016). Algebricamente, temos:

$$C = \frac{Q}{\Delta t}$$

com

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad \text{e} \quad Q = m \cdot L$$

*para calor sensível*                      *para calor latente*

Onde:

- C – capacidade térmica [cal/°C]
- Q – quantidade de calor [cal]
- $\Delta t$  – variação de temperatura [°C]
- m – massa [g]
- c – calor específico [cal/(g.°C)]
- L – calor latente [cal/g]

É oportuno recordar que o calor que produz variação de temperatura é chamado calor sensível. Quando o calor modifica o estado físico de um corpo, é chamado calor latente e, neste caso, não há variação na temperatura até que cesse a mudança de estado físico (Ramalho Júnior, et al., 2015).

A palavra “capacidade” neste contexto é enganosa, uma vez que sugere a ideia de se constituir do atributo de um corpo de conter calor, em analogia com a capacidade de um balde de conter água.

Essa analogia é falsa, não se deve pensar em termos da capacidade de um corpo de conter calor, pois esse juízo enseja a existência de um limite de contenção, como a capacidade máxima do balde de conter a água. A condução de calor em um corpo pode prosseguir indefinidamente, desde que a diferença de temperatura seja mantida, embora que este corpo possa derreter-se ou vaporizar-se durante o processo (Walker, 2006).

E, como a capacidade térmica relaciona-se com a quantidade de calor, que por sua vez é diretamente proporcional à massa do corpo, pode-se inferir que a capacidade térmica é uma propriedade extensiva, logo, dois corpos materiais compostos pela mesma substância com massas diferentes possuem diferentes capacidades térmicas. Uma conclusão importante, pois emerge que um mesmo material se comportará de forma diferente, em uma análise termográfica, segundo seu volume e geometria, pois essa transferência de calor se dará em diferente velocidade, tanto menor quanto maior a massa, como ilustrado na Figura 13.



Figura 13 – Materiais compostos por uma mesma substância com massas diferentes.  
Fonte: o autor.

A partir da capacidade térmica de um corpo, pode-se encontrar o calor específico da substância que o compõe. Calor específico é definido como a quantidade de calor necessária para elevar em 1°C a temperatura de uma unidade de massa de um corpo (Silva & Filho, 2016). Algebricamente, temos:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta t}$$

ou

$$C = \frac{C}{m}$$

Onde:

- c – calor específico [cal/(g.°C)]
- Q – quantidade de calor [cal]
- m – massa [g]
- $\Delta t$  – variação de temperatura [°C]
- C – capacidade térmica [cal/°C]

E, como o calor específico relaciona-se com a capacidade térmica de uma unidade de massa do corpo, pode-se inferir que calor específico é uma propriedade intensiva, logo, dois corpos materiais compostos pela mesma substância, embora com massas diferentes, possuem o mesmo calor específico. Uma conclusão importante, pois emerge que o calor específico caracteriza o material e que cada material se comportará de forma diferente em uma análise termográfica, segundo sua composição química.

Na determinação e no uso do calor específico de qualquer substância é necessário considerar as condições sob as quais a energia é transferida sob a forma de calor.

Para sólidos e líquidos supõe-se que o corpo está sob pressão constante – atmosférica – durante a transferência por condução. Pode-se também conceber que o corpo é mantido em volume constante enquanto o calor é transferido, pois a expansão ou contração térmica em sólidos e líquidos é pouco significativa em interferir neste processo (Walker, 2006).

Abaixo, vê-se uma tabela com valores de calor específico de alguns materiais:

Tabela 1 – Valores de calor específico de alguns materiais de interesse da construção civil, no estado sólido

Material	Calor específico [cal/(g.°C)]	Material	Calor específico [cal/(g.°C)]
Zinco	0,09	Alumínio	0,21
Aço, ferro	0,11	Tijolo cerâmico maciço	0,22
Placa fibrocimento	0,20	Argamassa comum	0,24
Vidro	0,20	Betão comum	0,24
Mármore, granito	0,20	Carvalho, pinus, cedro	1,32

Fonte: (ABNT, 2005).

Observa-se que quanto maior for o valor do calor específico de um corpo, mais ele se aproximará de ser um isolante térmico, pois mais lenta será a sua variação de temperatura ao longo do tempo, o que favorece a análise termográfica quando há transferência de calor por condução entre corpos de materiais distintos.

Mas a capacidade térmica e o calor específico não são suficientes para caracterizar a velocidade com que o calor transita por um corpo no processo de transferência por condução. Outras propriedades também interferem significativamente neste processo, tal como a densidade.

A densidade é definida como sendo o quociente entre a massa de um corpo e seu volume (Feltre, 2004). Algebricamente, temos:

$$D = \frac{m}{V}$$

Onde:

D – densidade [kg/m<sup>3</sup>]

m – massa [kg]

V – volume [m<sup>3</sup>]

Embora não seja evidente pela equação, em linhas gerais, a condução de calor aumenta com o aumento da densidade. Isso decorre porque o aumento na concentração de massa por unidade de volume enseja uma maior aproximação entre as moléculas, favorecendo a transmissão de calor por condução. Por isso a transmissão de calor por condução é mais contundente em sólidos que em líquidos, e em líquidos que em gases. Para entender melhor o porquê dessa constatação, precisa-se, ainda, introduzir outro conceito: a condutividade térmica.

Condutividade térmica é definido como a propriedade que qualifica a capacidade de uma placa de um material de conduzir energia térmica por unidade de tempo. Um material que transfere rapidamente energia por condução é um bom condutor térmico e tem elevado valor de condutividade (Walker, 2006).

Algebricamente, temos:

$$K = \frac{Q \cdot A \cdot e}{t \cdot (T_Q - T_F)}$$

Onde:

$K$  – condutividade térmica [W/(m.°C)]

$Q$  – quantidade de calor [cal]

$A$  – área da face da placa [m<sup>2</sup>]

$e$  – espessura da placa [m]

$t$  – tempo [s]

$T_Q$  – temperatura da face quente [°C]

$T_F$  – temperatura da face fria [°C]

Isso é importante porque nos leva à percepção de que haverá diferenças nas leituras termográficas ao longo da extensão de um corpo constituído por um mesmo material, como um elemento de betão, se houverem camadas com diferentes dosagens de seus elementos constituintes que variem a densidade desse corpo, o que altera a condutividade térmica de cada camada, favorecendo a análise termográfica.

Na Tabela 2 vê-se a variação da condutividade térmica em decorrência da variação de densidade do betão com argila expandida, a partir de diferentes dosagens de seus elementos constituintes:

Tabela 2 – Valores de condutividade térmica do betão com argila expandida consideradas duas diferentes densidades dos inertes

Dosagem	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutividade térmica [W/(m.°C)]
Dosagem de cimento < 250 kg/m <sup>3</sup> com densidade dos inertes < 350 kg/m <sup>3</sup>	< 600	0,20
	de 600 a 800	0,25
	de 800 a 1000	0,33
Dosagem de cimento > 300 kg/m <sup>3</sup> com densidade dos inertes > 350 kg/m <sup>3</sup>	de 1000 a 1200	0,46
	de 1200 a 1400	0,70
	de 1400 a 1600	0,85
	de 1600 a 1800	1,05
Betão fabricado na obra com vermiculite (3 a 6 mm) ou perlite expandida	400 a 600	0,24
	600 a 800	0,31

Fonte: (ABNT, 2005).

Outra constatação importante é que a variação de densidade ao longo da extensão de um corpo constituído de diferentes materiais, como um muro de tijolos estruturado por pilares de betão, também levará à existência de alterações na condutividade térmica ao longo desse corpo, criando as chamadas pontes térmicas, facilmente perceptíveis na análise termográfica (Larsen & Hongn, 2012).

Antagônica ao conceito de condutividade térmica é a resistência térmica à condução de calor.

Resistência térmica à condução de calor é definida como sendo a propriedade que qualifica a capacidade de uma placa de um material de se opor à condução de energia térmica por unidade de tempo, equacionada como sendo o quociente entre a condutividade térmica e a espessura da placa. O conceito foi introduzido na prática da engenharia em vista do interesse em explorar materiais isolantes térmicos (Walker, 2006). Algebricamente, temos:

$$R = \frac{e}{K}$$

Onde:

R – resistência térmica à condução [ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ ]

e – espessura da placa [m]

K – condutividade térmica [ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ]

Na Tabela 3 vê-se valores de resistência térmica à condução de calor de alguns materiais comumente utilizados na indústria da construção civil como isolantes térmicos:

Tabela 3 – Valores de condutividade térmica de alguns materiais isolantes de interesse da construção civil, consideradas placas com 50 mm de espessura

Material	Densidade [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	Condutividade térmica [ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ]	Resistência térmica [ $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ ]
Lã de rocha	20 a 200	0,045	1,11
Lã de vidro	10 a 100	0,045	1,11
Poliestireno expandido moldado	15 a 35	0,040	1,25
Poliestireno extrudado	25 a 40	0,035	1,43
Espuma rígida de poliuretano	30 a 40	0,030	1,67

Fonte: (ABNT, 2005).

Com os dados elencados na Tabela 3, observa-se que os materiais que apresentam os menores valores de condutividade térmica possuem os maiores valores de resistência térmica, o que corrobora o antagonismo entre os dois conceitos. Esse aspecto também é importante, pois enseja a percepção de que os pontos de uma edificação que possuírem revestimentos térmicos também serão destacadamente perceptíveis na análise termográfica e carecem de serem corretamente interpretados.

### II.3.2 Principais aspectos que interferem na detecção no processo de convecção

No processo de transferência de calor por convecção, também se sobressaem as Leis Zero e Segunda da Termodinâmica. No entanto, no que tange o interesse desta pesquisa, insere-se neste contexto um importante diferencial, a transferência de calor entre corpos materiais em diferentes estados físicos da matéria: a edificação, no estado sólido; e o ar, no estado gasoso. E nesta relação de contato, há algumas particularidades.

A primeira delas, o fato de que há grande diferença nos valores de condutividade térmica entre o ar atmosférico e os materiais usuais utilizados na construção civil. A condutividade térmica do ar atmosférico é menor, inclusive, que a dos materiais isolantes térmicos citados acima, cerca de 0,023 W/(m.°C) (Protolab, 2019).

Neste sentido, seria de se esperar que o ar fosse conservativo do calor do edifício, mas nem sempre é assim. Há de que se considerar três principais e distintas situações.

Inicialmente, o ar confinado em uma câmara selada, recurso construtivo utilizado quando se deseja dar isolamento térmico entre dois ambientes, valendo-se de anteparas separadas por uma camada de ar. Em segundo, o ar circulante no interior da edificação, que, mesmo confinado nos ambientes internos, age como um condutor, equalizando o calor entre os cômodos. Finalmente, o ar envolvente, livre, que circunda e circula dentro da edificação pelas suas aberturas, podendo agir para equalizar o calor interior do edifício com o calor exterior – algo normalmente indesejável.

No primeiro caso, em que o ar confinado é utilizado como isolante térmico, a consideração à cerca das trocas de calor entre o exterior e o interior por convecção em edifícios na fase de arrefecimento pode ser dada pelo conceito de transmitância térmica. A mesma consideração também pode ser feita nas trocas de calor entre os cômodos internos igualmente separados por paredes duplas, com ar confinado entre elas. Já nas trocas de calor entre o exterior e o interior na fase de aquecimento, sobressai-se a transferência por irradiação solar.

Transmitância térmica, que nada mais é que a ideia de condutividade térmica aplicada à um corpo extenso, é definida como sendo uma medida da quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária de um elemento do invólucro da edificação por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que este separa (ACEPE, 2019). Algebricamente, temos:

Com	$U = \frac{1}{R_T}$	Onde:
		U – transmitância térmica [W/(m.°C)]
		R <sub>T</sub> – resistência térmica total [m <sup>2</sup> .°C/W]
		R <sub>si</sub> – resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície interna [m <sup>2</sup> .°C/W]
		R <sub>t</sub> – resistência térmica de superfície a superfície [m <sup>2</sup> .°C/W]
		R <sub>se</sub> – resistência térmica da camada de ar adjacente à superfície externa [m <sup>2</sup> .°C/W]

Os níveis de desempenho térmico são diretamente influenciados pelos materiais constituintes do envelopamento do edifício, entenda-se, paredes externas e coberturas (Lima, 2014).

No segundo caso, que considera o ar circulante no interior das edificações, as coberturas, aliás, podem ter papel determinante na condução do calor por convecção, pois quanto maior for a sua altura, mais intensas serão as correntes convectivas no interior dos edifícios, sobretudo naqueles dotados de átrios ou dutos de exaustão. O mesmo pode-se afirmar com relação à altura do pé-direito dos cômodos. Cômodos com pé-direito duplo apresentam correntes convectivas mais intensas que os de pé-direito simples. Estes fenômenos são conhecidos como efeito chaminé.

Na ausência de vento, o efeito chaminé é o único responsável pela movimentação do ar no interior dos edifícios não dotados de sistemas mecânicos de ventilação. Esse efeito tem sua origem na diferença de temperatura e, por conseguinte, de densidade entre as camadas de ar interior e/ou entre o ar interior e o ar exterior da edificação. Essa diferença de densidade produz gradientes de pressão, que por sua vez, são formadores das correntes de convecção (Chiarello, 2006).

A intensidade do fluxo térmico envolvido no mecanismo de troca de calor por convecção é uma função do coeficiente de trocas térmicas por convecção pela diferença entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície do sólido (Frota & Schiffer, 2001).

Algebricamente, temos:

	$q_c = h_c(t - \theta)$	Onde:
com	$t \neq \theta$	$q_c$ – intensidade do fluxo térmico por convecção [W/m <sup>2</sup> ]
sendo:		$h_c$ – coeficiente de trocas térmicas por convecção [W/(m <sup>2</sup> .°C)]
$h_c=1,2$ W/(m <sup>2</sup> °C) para superfície horizontal, fluxo descendente		$t$ – temperatura do ar [°C]
$h_c=4,7$ W/(m <sup>2</sup> °C) para superfície vertical		$\theta$ – temperatura da superfície do sólido (parede) [°C]
$h_c=7$ W/m <sup>2</sup> °C para superfície horizontal, fluxo ascendente		

Ainda, é preciso considerar o efeito dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado. Os sistemas AVAC aumentam a velocidade da circulação de ar no interior dos ambientes, favorecendo o transporte de calor por convecção.

E, ao refrigerar ou aquecer o ar interior, criam-se correntes convectivas que acabam por distribuir o calor de forma notadamente diferencial dentro dos ambientes, produzindo um gradiente vertical de temperaturas, mais frias próximo ao piso e mais quentes próximo ao teto. Esse gradiente será tão mais nítido nas análises termográficas das paredes dos cômodos quanto maior for a potência e a proximidade do equipamento condicionador de ar, fato que também se relaciona com a transmitância térmica (Garcia & Fontes, 2007).

Na verdade, o calor naturalmente tende a se concentrar, por convecção, junto ao teto dos ambientes, mas essa distribuição diferencial natural do calor interior dos cômodos é bem mais difícil de ser captada em uma análise termográfica de salas fechadas não dotados de sistemas AVAC. Essa dificuldade repousa no fato de que, na convecção natural, as trocas térmicas são bem mais lentas, o que favorece a equalização calorífica entre os corpos, mesmo sendo eles de diferentes estados físicos (Pena, 2011).

Isso é importante, pois o desconhecimento desses efeitos dos sistemas AVAC sobre paredes e divisórias pode induzir a equívocos nas análises termográficas.

No terceiro e último caso, em que o ar circunda e circula dentro da edificação pelas suas aberturas, sendo a convecção dita forçada, a transmissão de calor será tanto maior quanto mais veloz for o movimento do ar (Bauer & Leal, 2013).

Percebe-se que o principal fator potencializador da transferência de calor por convecção é a velocidade das correntes de ar – o vento. Velocidade que impõe sobre a superfície de contato dois destacados fatores: força de pressão, o que favorece as trocas de calor porque aproxima as moléculas; e maior quantidade de massa circulante sobre a área de contato, o que aumenta a capacidade térmica relativa.

Essas considerações são importantes porque denotam que as análises termográficas devem ser feitas, preferencialmente, na ausência de vento, pois o vento é um forte agente influenciador dos resultados.

Ainda, o vento é vetor de umidade. E a umidade também é um agente fortemente influenciador nas análises termográficas, sendo possível afirmar que os pontos onde se evidenciam uma maior porcentagem de umidade são aqueles em que os termogramas ficam representados pelas cores mais frias (Soares, 2014).

O vento, soprando com uma velocidade significativa, cria pressões positivas à barlavento, que provocam infiltrações da umidade transportada nos poros da parede; e as pressões negativas, à sotavento, geram exfiltrações, provocando alterações superficiais na temperatura da parede, arrefecendo-a. Este efeito é diferencial, já que o arrefecimento é maior junto aos cantos (Barreira, 2004).

Outrossim, a presença de umidade no ar modifica a transmitância atmosférica, outro agente influenciador nas análises termográficas. Esse conhecimento é igualmente importante e enseja que se deve evitar a realização de análises termográficas sob a presença de neblina, ou névoa, e nevoeiro, ou cerração (Pereira & Nunes, 2013).

Diz-se nevoeiro quando uma nuvem está sobre o solo ou próximo dele; e névoa quando há junção de nuvem baixa e suspensão de partículas poluentes (Silva, 2005).

Finalmente, fatores como a presença de poluentes particulados nas correntes convectivas, como a fumaça, também interferem significativamente na transmitância atmosférica, sobretudo nas faixas de NIR, SWIR e MWIR, uma preocupação a mais em grandes centros urbanos. Mas essa influência é bastante atenuada na faixa de LWIR, o que ressalta a importância da escolha do detector (Caldeira, 2016).

### II.3.3 Principais aspectos que interferem na detecção no processo de radiação

No processo de transferência de calor por radiação, além das Leis da Termodinâmica, inserem-se outras leis da física que merecem ser estudadas no escopo deste trabalho. São elas:

- Lei de Kirchoff, postulada por Gustav Robert Kirchoff;
- Lei de Stefan-Boltzmann, postulada por Jozef Stefan e Ludwig Boltzmann;
- Lei de Planck, postulada por Max Karl Ernst Ludwig Planck; e
- Lei de Wien, postulada por Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien.

Mas, iniciaremos por abordar a Terceira Lei da Termodinâmica.

A Terceira Lei da Termodinâmica nos diz que quando um corpo se aproxima do zero absoluto (0 K), sua entropia tende à zero. Isso implica que, no zero absoluto, as moléculas que compõe o corpo encontram-se sem nenhuma agitação, logo, a energia cinética molecular é nula. Sem energia do movimento, a energia térmica do corpo também é zero. Assim, no zero absoluto, o corpo não emite energia térmica (Gregio, 2016). Como o zero absoluto é uma impossibilidade, pode-se inferir que todos os corpos emitem, em maior ou menor grau, energia térmica sob a forma de ondas eletromagnéticas.

Em baixas temperaturas, a maior taxa de emissão está na faixa do infravermelho. Aumentando gradativamente a temperatura, percebe-se a emissão da luz visível, de início a luz vermelha, passando a seguir para a amarela, a verde, a azul e, em altíssimas temperaturas, a luz branca, chegando à região do ultravioleta do espectro eletromagnético, novamente fora do espectro visível (Ramalho Júnior, et al., 2007).

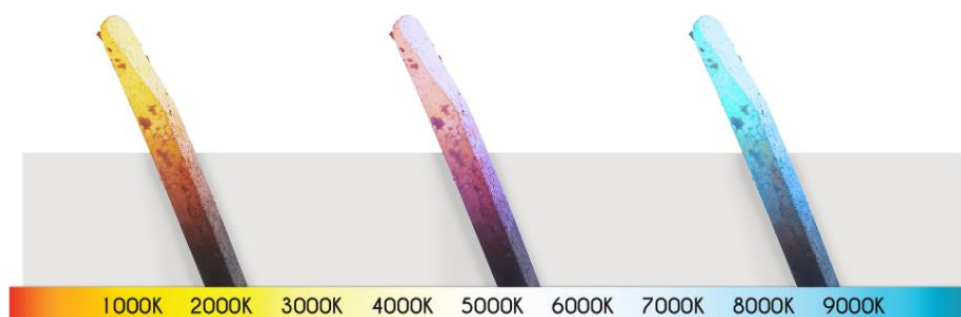


Figura 14 – Barras de metal aquecido até o estado de incandescência.

Fonte: (AVANT, 2017).

Mas, da mesma forma que o corpo emite radiação eletromagnética, também recebe a radiação eletromagnética emitida por outros corpos. A radiação recebida pode ser refletida, absorvida, transferida ou refratada (Walker Halliday, 1996). Ilustrativamente, temos:

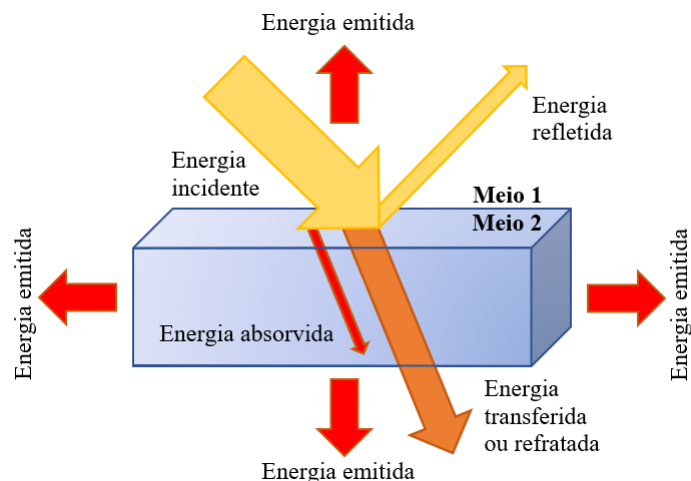


Figura 15 – Sistema complexo de energia emitida e recebida por um corpo.  
Fonte: inspirado em (Bastos, et al., 2019).

Assim, quando um corpo está a uma temperatura maior que a de seus adjacentes, sua taxa de emissão excede a taxa de incidência de energia advinda do meio. À contrário *sensu*, quando um corpo está a uma temperatura menor que a de seus adjacentes, continua emitindo energia térmica, mas a taxa de incidência do meio excede sua taxa de emissão. Quando as taxas de emissão e incidência são iguais, diz-se que o equilíbrio térmico entre o corpo e sua vizinhança é alcançado (Álvares, 2008).

Como parâmetros de estudo, foram idealizados três corpos hipotéticos: o espelho ideal, o corpo transparente ideal e o corpo negro.

Espelho ideal é definido como sendo um corpo hipotético capaz de refletir todo o calor nele incidente e possuir absorvância nula (Silva & Filho, 2016). Algebricamente, temos:

$$\begin{array}{l}
 \rho = 1 \\
 \alpha = 0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{Onde:} \\
 \rho - \text{energia refletida} \\
 \alpha - \text{energia absorvida}
 \end{array}$$

Corpo transparente ideal é definido como sendo um corpo hipotético capaz de transferir ou refratar todo o calor nele incidente e possuir absorvância e reflectância nulas (Pávon De La Fé, 2017). Algebricamente, temos:

$$\begin{array}{l}
 \tau = 1 \\
 \alpha = \rho = 0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{Onde:} \\
 \tau - \text{energia transferida ou refratada} \\
 \alpha - \text{energia absorvida} \\
 \rho - \text{energia refletida}
 \end{array}$$

Corpo negro é definido como sendo um corpo hipotético capaz de absorver todo o calor nele incidente e possuir refletância nula (Martini, et al., 2016). Um corpo com essa propriedade, em princípio, não pode ser visto e, portanto, é negro. Para tal corpo estar em equilíbrio termodinâmico, ele deve irradiar energia na mesma taxa em que absorve, do contrário ele esquentaria ou esfriaria, e sua temperatura variaria. Portanto, um corpo negro, além de ser um absorvedor perfeito, é também um emissor perfeito (Oliveira Filho & Saraiva, 2014). Algebricamente, temos:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \alpha = 1 & \text{Onde:} \\ \rho &= 0 & \rho - \text{energia refletida} \\ & & \varepsilon - \text{energia emitida} \\ & & \alpha - \text{energia absorvida} \end{aligned}$$

É esse comportamento ideal e hipotético que é postulado pelas leis de Kirchoff, Stefan-Boltzmann, Planck e Wien. A Lei de Kirchoff aduz que para um dado comprimento de onda e uma dada temperatura, a absorvidade de um corpo é igual a sua emissividade. Algebricamente, temos:

$$\begin{aligned} \varepsilon(\lambda, t) &= \alpha(\lambda, t) & \text{Onde:} \\ & & \varepsilon - \text{energia emitida} & \lambda - \text{comprimento de onda} \\ & & \alpha - \text{energia absorvida} & t - \text{temperatura} \end{aligned}$$

Isso é importante, pois nos mostra que um corpo bom absorvedor de energia térmica é também um bom emissor. Sendo o corpo negro o melhor absorvedor e emissor de calor, tomando-o como referência, todos os demais corpos – não idealizados – terão valores de emissividade e absorvância menores do que 1. O corpo não idealizado chama-se de corpo cinza (Israel, 2016). A Tabela 4 mostra alguns desses valores.

Tabela 4 – Valores médios de emissividade de alguns materiais comumente empregados na construção civil

Material	Temperatura [°C]	Faixa espectral	Emissividade
Aço inoxidável, chapa polida	70	LWIR	0,14
Alumínio anodizado cinza claro opaco	70	LWIR	0,61 a 0,67
Alumínio fundido, jato de areia	70	LWIR	0,46
Argamassa seca	36	SWIR / MWIR	0,94
Betão seco	36	SWIR / MWIR	0,95
Ferro galvanizado, placa oxidada	70	LWIR	0,85
Granito enrijecido	70	LWIR	0,77 a 0,87
Plástico, poliuretano, placa de isolamento	70	LWIR	0,55
Plástico, PVC, opaco, estruturado	70	LWIR	0,93
Tijolo cerâmico de alvenaria	35	SWIR / MWIR	0,94
Tinta, 3 cores, pulverizada sobre alumínio	70	LWIR	0,92 a 0,94
Verniz sobre tacos de madeira de carvalho	70	LWIR	0,90 a 0,93

Fonte: (Contemp, 2017).

A Lei de Stefan-Boltzmann define a relação entre poder emissivo de um corpo negro ( $E_n$ ) e sua temperatura, dada por:

$$E_n = \sigma T^4 \quad \text{Onde:}$$

$E_n$  – energia total irradiada por unidade de área [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]

$\sigma$  – constante de Stefan ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$ )

T – temperatura [K]

Isso é importante, pois nos mostra que a irradiância é proporcional à temperatura do corpo, logo, a emissividade dos materiais varia de acordo com a temperatura em que se encontram. Assim, corpos mais aquecidos sensibilizam melhor os detectores.

Irradiância é densidade de energia solar incidente, por unidade de tempo. A Lei de Planck descreve a irradiância emitida por um corpo em função de sua temperatura e do seu comprimento de onda por:

$$R_{(\lambda,t)} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$

Onde:

R – energia total irradiada por comprimento de onda [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ]

$\lambda$  – comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ]

T – temperatura absoluta do corpo negro [K]

e – número de Euler (2,718281828459045235360287)

h – constante de Planck ( $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

k – constante de Boltzmann ( $1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J}/\text{K}$ )

c – velocidade da luz, no vácuo ( $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

A partir da Lei de Planck pode-se construir o gráfico das curvas de corpo negro em função do comprimento de onda e da temperatura:

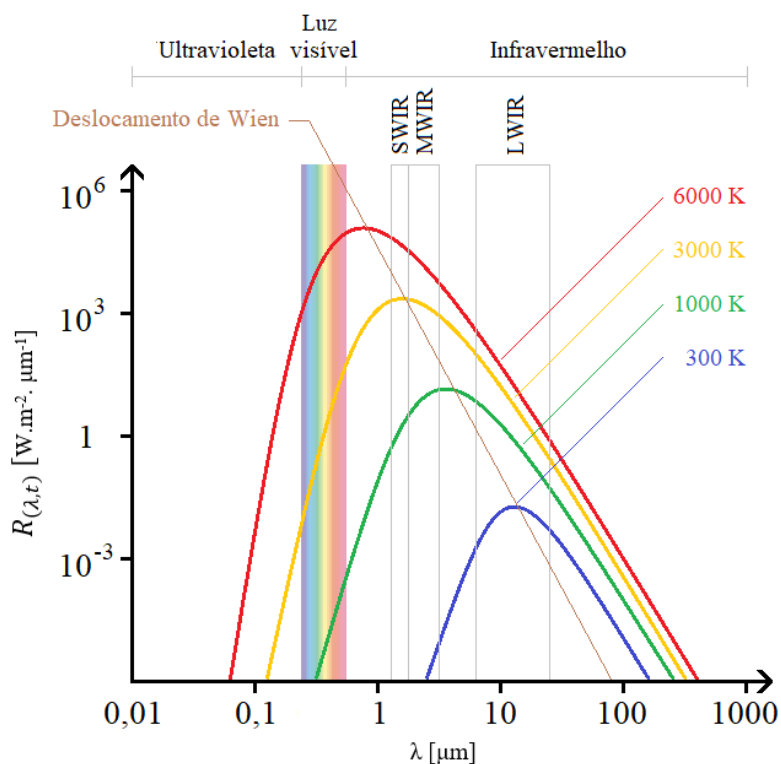


Figura 16 – Curvas de corpo negro.  
Fonte: adaptado de (Costa, 2014).

As áreas sob estas curvas são iguais a energia total emitida para cada comprimento de onda. As curvas ilustram graficamente o significado da Lei de Stefan-Boltzmann: quanto maior for a temperatura do objeto maior será a quantidade de radiação que ele emitirá.

Note que há um deslocamento dos picos de distribuição de radiação do corpo negro em direção aos comprimentos de ondas mais curtos, à medida que a temperatura aumenta. Esse comportamento foi definido pela Lei de Wien (USP, 2019).

A Lei de Wien revela o comportamento decremental do comprimento de onda na região de pico de emissão de ondas eletromagnéticas à medida do incremento de temperatura. Algebricamente, temos:

$$\lambda_{(máx)} = \frac{d}{T}$$

Onde:  
 $\lambda$  – comprimento de onda onde a energia irradiada é máxima [ $\mu\text{m}$ ]  
 $d$  – constante de dispersão de Wien ( $2,8977685 \cdot 10^{-3} \mu\text{m.K}$ )  
 $T$  – temperatura [K]

Isso é importante por dois motivos. Primeiro, porque nos indica que à temperaturas próximas de 300 K, aproximadamente  $27^\circ\text{C}$ , temperatura média ambiente, o pico de energia encontra-se na região de comprimento de onda de 10  $\mu\text{m}$ , ou seja, na faixa de LWIR, o que aponta como mais adequado para as avaliações termográficas o uso de detectores fabricados com a tecnologia do microbolômetro (Israel, 2016).

Segundo, porque nos revela que o aumento da temperatura, e conseqüente aumento da energia, induz o aumento da frequência da onda eletromagnética emitida. Assim, energia e frequência de onda são grandezas diretamente proporcionais. Revelação que é descrita pela relação de Planck-Einstein, algebricamente representada por:

$$E = hf$$

ou

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Onde:  
 $E$  – energia de um único fóton de onda eletromagnética [J]  
 $h$  – constante de Planck ( $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ )  
 $f$  – frequência [Hz]  
 $c$  – velocidade da luz, no vácuo ( $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )  
 $\lambda$  – comprimento de onda [ $\mu\text{m}$ ]

Finalmente, pode-se afirmar que a energia total incidente sobre um corpo, seja ele idealizado ou não, é equivalente ao somatório da energia por ele absorvida, refletida, transferida ou refratada. Algebricamente, temos:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Onde:  
 $\alpha$  – a energia absorvida  
 $\rho$  – a energia refletida  
 $\tau$  – a energia transferida ou refratada

E que, no equilíbrio térmico entre o corpo e sua vizinhança, temos:

$$\varepsilon = \alpha + \rho + \tau$$

Onde:

$\varepsilon$  – a energia emitida       $\rho$  – a energia refletida  
 $\alpha$  – a energia absorvida       $\tau$  – a energia transferida ou refratada

A Tabela 5 resume as características dos três corpos hipotéticos descritos:

Tabela 5 – Espelho ideal, corpo transparente ideal e corpo negro e suas características conceituais, sob a lógica booleana

Corpo	$\alpha$	$\rho$	$\tau$
Corpo negro	1	0	0
Corpo transparente ideal	0	0	1
Espelho ideal	0	1	0

Fonte: (Álvares, 2008).

À cerca dessas características, ainda pode-se discorrer que a capacidade absorvente, absorvidade ou absorvância de um corpo é dada pela razão existente entre a quantidade de calor absorvido e a quantidade de calor incidente. A capacidade reflexiva, reflexividade ou reflectância de um corpo é dada pela razão existente entre a quantidade de calor refletido e a quantidade de calor incidente. A transparência um corpo ou sua transmissividade é dada pela razão existente entre a quantidade de calor transmitido ou refratado e a quantidade de calor incidente (Silva & Filho, 2016). Algebricamente, temos:

$$a = \frac{Q_a}{Q_i}$$

$$r = \frac{Q_r}{Q_i}$$

$$t = \frac{Q_t}{Q_i}$$

Onde:

a – absorvidade  
 r – refletividade  
 t – transmissividade  
 $Q_a$  – quantidade de calor absorvido  
 $Q_r$  – quantidade de calor refletido  
 $Q_t$  – quantidade de calor transmitido ou refratado  
 $Q_i$  – quantidade de calor incidente

com

$$Q_i = Q_a + Q_r + Q_t$$

Isso é importante porque, a partir desses cálculos pode-se definir um corpo como opaco, transparente ou translúcido.

### II.3.4 Interferência da opacidade, transparência e translucidez dos corpos

Opacidade é a qualidade do corpo opaco. Corpo opaco é definido como sendo aquele de transparência nula, mas que não se constitui de um espelho ideal ou de um corpo negro. A energia nele incidente será parcialmente refletida ou absorvida (Kylili, et al., 2014). Algebricamente, temos:

$$\alpha + \rho = 1$$

Onde:

$\alpha$  – a energia absorvida  
 $\rho$  – a energia refletida  
 $\tau = 0$        $\tau$  – a energia transferida ou refratada

com

Do equacionamento, pode-se inferir que um corpo opaco de superfície mais polida terá maior reflectância e, portanto, comportamento mais próximo ao de um espelho. Por outro lado, um corpo opaco de superfície mais grosseira terá maior absorvância, logo, comportamento mais próximo ao de um corpo negro.

Isso é importante porque nos mostra que um mesmo material terá diferentes valores de absorvância e reflectância de acordo com a polidez de sua superfície, e que materiais opacos muito reflexivos, como os metais, terão baixíssima absorvância.

E, como a Lei de Kirchoff aduz que um material mau absorvedor é também um mau emissor, metais, em linhas gerais, terão sempre baixíssimas emissividades. Neste caso, a refletividade acaba por se tornar um complemento da emissividade (Israel, 2016).

Superfícies opacas com emissividade muito baixa representam um problema real para a termografia e não há solução totalmente satisfatória. A imagem formada pela câmera será quase inteiramente composta de radiação refletida, podendo induzir a erros ou a dificuldades severas em se realizar uma análise termográfica (Hart, 1992).

Diante de um material opaco bastante reflexivo, como paredes revestidas por cerâmicas esmaltadas, por exemplo, parte do calor captado pela câmera termográfica será da própria parede, mas parte poderá ser o calor emitido pelo corpo do termografista, refletido da parede – um problema difícil de se contornar.

O oposto de opacidade é a transparência. Transparência é a qualidade do corpo transparente. Corpo transparente é definido como sendo aquele que permite a visualização nítida dos objetos através dele (Bonjorno, et al., 2013).

Para efeito deste trabalho, consideraremos como transparente o corpo com índice de transmissão luminosa acima de 85%, que é o índice especificado para o vidro *float*, com 6 mm de espessura (ABNT, 2004).

E, em alguns casos, o conhecimento à cerca do comportamento dos materiais se reveste de especial importância, pois alguns se portam de forma contra intuitiva. É o caso do vidro comercial, muito utilizado nas janelas das edificações, transparente para a luz visível, mas, surpreendentemente, opaco para a luz infravermelha. O que se constitui de um grande problema.

Ocorre que a termografia é muito empregada como recurso ao diagnóstico de falhas em máquinas e em equipamentos elétricos de alta tensão. Face ao grande risco que esses equipamentos oferecem ao ser humano, eles devem permanecer protegidos por caixas e telas aterradas (MTb, 1978). O mesmo se verifica em ambientes de calor extremo, cuja inspeção deve ser feita sob a proteção de uma anteparo de proteção térmica.

A fim de permitir os procedimentos de inspeção, estas caixas e anteparas são dotadas de janelas de vigia. Mas, como foi visto, o vidro e, ainda, o policarbonato e o polimetacrilato de metila, conhecidos por *plexiglás*, *cellcast* ou *perspex*, que nada mais são que acrílico com aparência de vidro, materiais muito utilizados nas aberturas de espia das tais caixas de proteção, apesar de transparentes para a luz visível, são opacos para o infravermelho, o que denota a necessidade de emprego de novas matérias-primas (SIT-IR, 2005).

A partir de cristais e polímeros especiais foram desenvolvidas as chamadas janelas infravermelhas, que apresentam diferentes graus de transparência segundo o comprimento de onda emitido pelos corpos na faixa do infravermelho. Nesse sentido, os materiais mais utilizados são poli 3-hexatíofeno, granada de ítrio-alumínio, fluoreto de magnésio, fluoreto de cálcio e fluoreto de bário. A Figura 17 mostra uma janela termográfica e ilustra um procedimento de inspeção através de um painel de segurança.

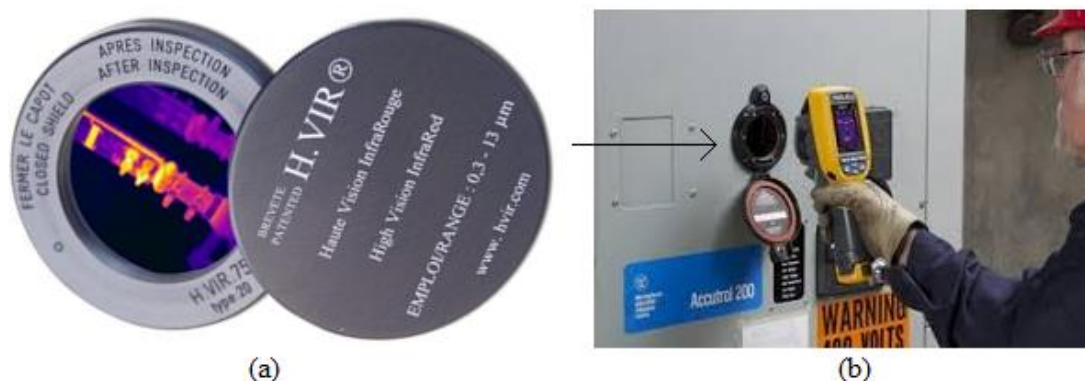


Figura 17 – Janela de infravermelho.

- (a) Janela infravermelha para faixa de 0,3 a 13  $\mu\text{m}$ , ou seja, até LWIR.  
 (b) Inspeção através de anteparas de proteção para risco de acidente com eletricidade.  
 Fonte: adaptado de (Direct Industry, s.d.) e (Getrotech, s.d.).

A escolha deve ser feita para o equipamento termográfico disponível, caso ele já tenha sido adquirido. Do contrário, caso a janela termográfica já tenha sido instalada, é a escolha do equipamento termográfico que deve ser feita com acurácia.

Convém ressaltar que uma janela infravermelha nunca será opaca para esta faixa espectral, mas pode ser transparente para um detector que opere, por exemplo, na faixa do MWIR, porém translúcida para outro, próprio para LWIR.

Translucidez é a qualidade do corpo translúcido. Corpo translúcido é definido como sendo o meio pelo qual os feixes de luz descrevem trajetórias irregulares com intensa difusão, ou seja, a onda eletromagnética se espalha sobre o meio no qual está se propagando. Consegue passar, porém seus feixes sofrem desvios na sua orientação por causa da constituição do material sobre o qual está incidindo (Santos, 2019).

O resultado é que o observador não consegue ver com nitidez o objeto visado. A neblina e o ar atmosférico saturado de partículas poluentes são considerados meios translúcidos (Martini, et al., 2016).

Nesse sentido, a janela infravermelha enseja especial atenção, pois como nem todas transmitem a mesma intensidade da radiação para todas as faixas espectrais, deve-se verificar se ela apresenta transparência ótima na banda em que o detector em uso é sensível, pois, do contrário, seria como se quiséssemos ver com os nossos olhos através de um vidro translúcido: acabar-se-ia por perder a leitura de pontos quentes de menor intensidade, o que levaria a erros na análise termográfica (SI T-IR, 2005).

A Tabela 6 caracteriza alguns dos materiais empregados na fabricação de janelas infravermelhas e a Figura 18 os ilustra, fazendo uma comparação com o vidro comum.

Tabela 6 – Materiais transparentes ao Infravermelho, por faixa espectral

Material	Composição química	Faixa de transparência	Faixa correspondente espectral
Cristais de YAG	Granada de Ítrio-Alumínio $Y_3Al_5O_{12}$	0,21 a 5,5 $\mu m$	UV até MWIR
Cristais de Magnésio	Fluoreto de Magnésio $MgF_2$	0,11 a 7,5 $\mu m$	UV até MWIR
Cristais de Cálcio	Fluoreto de Cálcio $CaF_2$	0,13 a 10 $\mu m$	UV a low LWIR
Cristais de Bário	Fluoreto de Bário $BaF_2$	0,2 a 14 $\mu m$	UV até LWIR

Fonte: (MetaLaser, 2019).

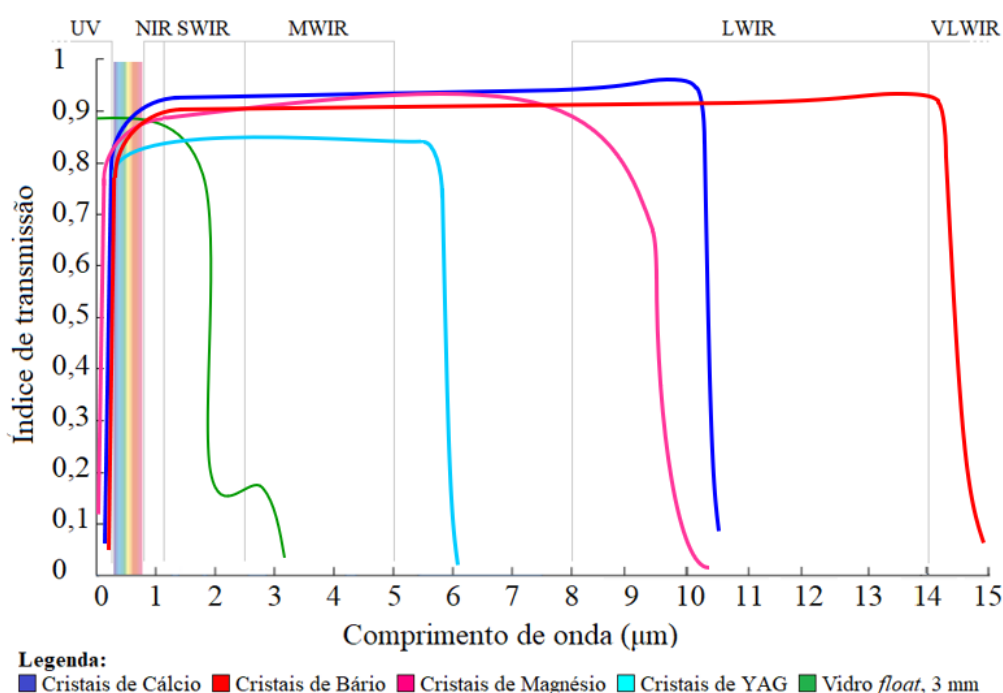


Figura 18 – Transparência do vidro float e cristais especiais ao infravermelho.

Fonte: adaptado de (SI T-IR, 2005) e (MetaLaser, 2019).

### II.3.5 Efeito da profundidade e do tamanho dos defeitos

A profundidade de defeitos causa diferentes efeitos nas imagens termográficas. Como a termografia é baseada na leitura dos gradientes de temperatura superficial nos corpos, isto é, não há penetração de ondas como ocorre nas análises de raios-x e de ultrassom, somente defeitos próximos à superfície são capazes de produzir gradientes térmicos suficientes para alcançar leituras inteligíveis. Logo, quanto mais profundo o defeito, pior será o grau de compreensibilidade. Da mesma forma, o tamanho do defeito também influencia a compreensibilidade dos termogramas produzidos. Defeitos menores são menos capazes de produzir gradientes térmicos superficiais com suficiente contraste para permitir que se perceba, com nitidez, o contorno da área afetada.

Os resultados de um estudo realizado por a partir de placas de betão com vazios incorporados, preenchidos com agregado grosseiro para simular a falha de concretagem conhecida como bicheira ou favo de mel, que se podem observar nas Figuras 19 e 20, ilustram essas afirmações. Destaque para a Figura 20, no qual o defeito grifado de amarelo não pode ser percebido no termograma.

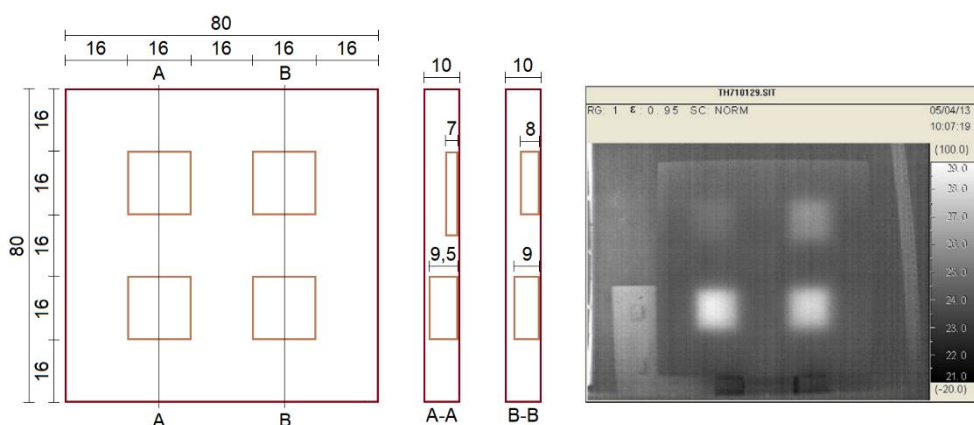


Figura 19 – Efeito da profundidade dos defeitos.  
Fonte: adaptado de (Cheng, et al., 2008).

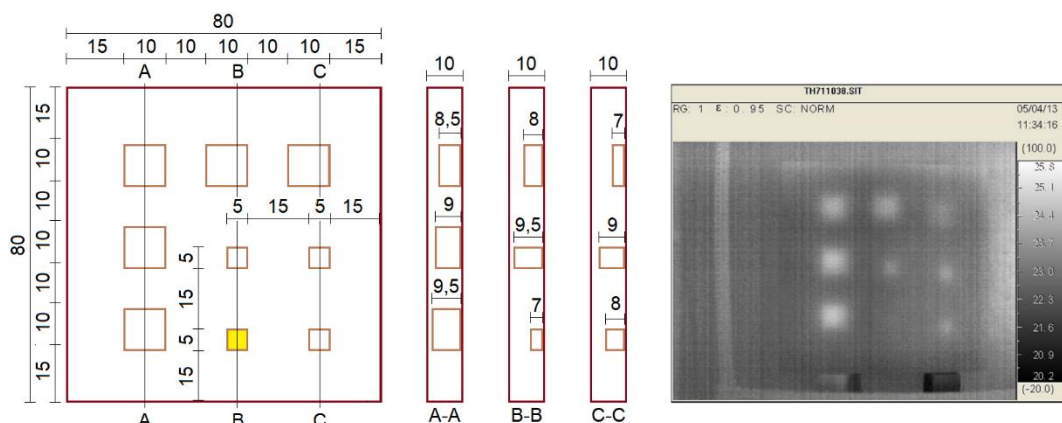


Figura 20 – Efeito do tamanho dos defeitos.  
Fonte: adaptado de (Cheng, et al., 2008).

### II.3.6 Interferência da cor, da textura e do tempo de exposição à fonte de calor

A cor, textura e o tempo de exposição à fonte de calor, quer seja artificial, no caso da utilização de aquecedores, ou natural, particularmente o sol, interferem significativamente na obtenção de imagens termográficas. Todas as superfícies encontradas na construção civil, como paredes, aberturas e equipamentos, possuem, ordinariamente, algum revestimento colorido. Em equipamentos, geralmente estas superfícies são coberturas, carcaças ou painéis de proteção, normalmente de material plástico ou metálico, com apresentação lustra ou fosca. Aberturas de alumínio, usualmente, se apresentam nuas, as demais costumam ser pintadas. Paredes recebem, ordinariamente, uma infinidade de tintas e revestimentos à disposição no mercado; ou são deixadas *in natura*, na cor de seus elementos constituintes, como cinza, no caso do reboco.

As cores com as quais todas essas superfícies se apresentam são igualmente infinitas, mas o efeito térmico que é conferido por cada uma delas é distinto. Algumas cores têm a propriedade de conferir uma maior absorção às superfícies que outras, sendo, inclusive, objeto de muitos estudos nos quais importa a resposta térmica conferida por tintas e revestimentos coloridos às edificações. Qualificar ou mensurar as cores, todavia, não é tarefa fácil. Há diversos sistemas de classificação de cores em uso no mundo, os mais consagrados são o HVC, CIE-Lab, o RGB, o HSL, o HSV e o CMY.

No HVC, ou Sistema Munsell, as cores são arranjadas cilindricamente, onde o eixo vertical representa *value* (V), uma dimensão associada à luminosidade. Perpendicularmente ao eixo vertical, o ângulo polar representa *hue* (H), ou matiz, tendo amarelo, verde, azul, violeta e vermelho como sendo os cinco matizes primários; e a distância do eixo representa o *chroma* (C), dimensão associada à saturação. É um sistema de comparação, utilizado por diversas indústrias até os dias atuais (Santana, 2005).

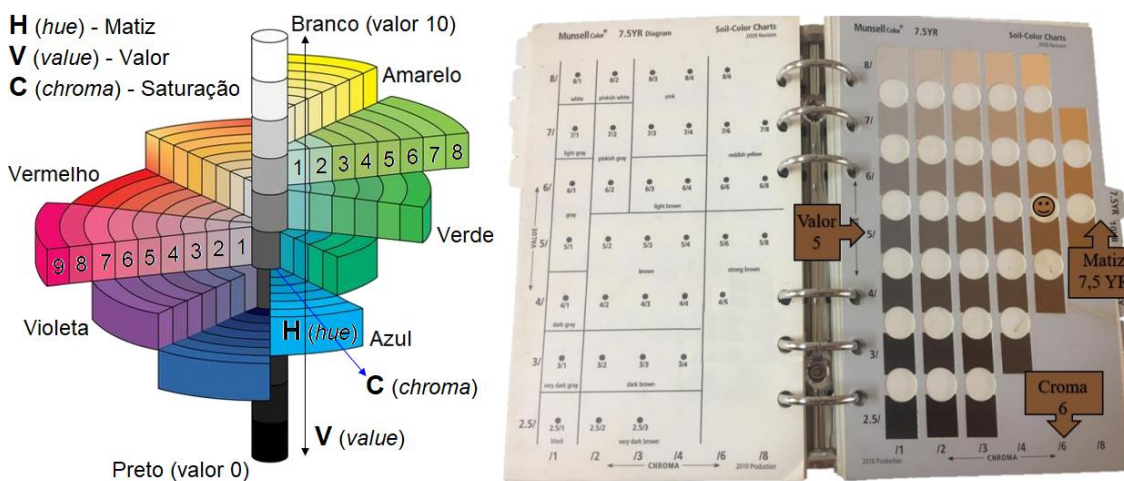


Figura 21 – Sistema de cores de Munsell e catálogo de Munsell.  
Fonte: adaptado de (Santana, 2005) e (Guimarães, 2016).

Diferentemente do Sistema Munsell, o CIE-Lab obedece a requisitos matemáticos, o que permite sua fácil conversão para coordenadas XYZ, possibilitando, assim, sua normalização, além de consistir no mais completo sistema de obtenção de cores, capaz de ser aproveitado nos meios computacionais, dentre os aqui estudados. É a escolha natural para aplicações que exijam o cumprimento das normas ISO e/ou NBR, sendo fruto de pesquisas da CIE – *Comissão Internacional de L'Eclairage*. Nesse sistema, as cores também são organizadas segundo três parâmetros, sendo eles “L” para luminosidade, “a” para variações de magenta à verde limão e “b” para variações de amarelo à azul (Mortara, 2015).

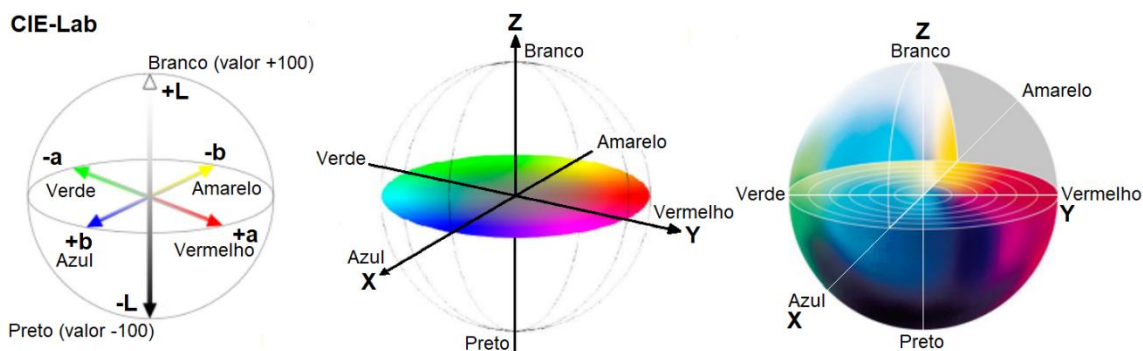


Figura 22 – Esquema de construção do sistema de cores CIE-Lab.  
 Fonte: adaptado de (Daum, s.d.).

O Sistema RGB também é um modelo matemático que se fundamenta em coordenadas XYZ, mas é restrito a apenas 256 posições para cada vértice de um cubo que representa as três cores primárias R (*red*), G (*green*) e B (*blue*), o que o torna limitado a 16.777.216 opções de cores. E, computacionalmente, é um sistema dependente do dispositivo, isto é, os mesmos valores de coordenadas obtidas de um equipamento não reproduzem necessariamente a mesma cor se inseridas em outro. Não obstante, é o sistema mais usado para imagens de 8 bits (Farias, 2016).

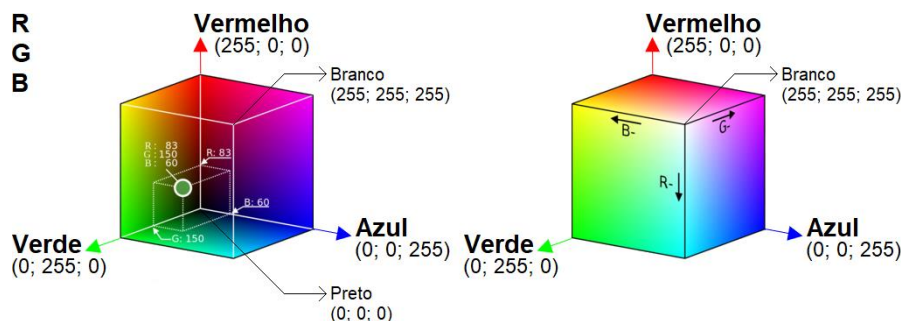


Figura 23 – Sistema de cores RGB.  
 Fonte: adaptado de <https://www.gratispng.com/png-puqhme>

Uma variação é o Sistema RGBA, que acrescenta o parâmetro “A”, um canal de transparência variando de 0 a 1, onde 1 é totalmente opaco e 0 é totalmente transparente.

Os sistemas HSL, também chamado modelo bi-hexacone, e HSV, chamado modelo hexacone, são modelos matemáticos computacionais, idealizados para o funcionamento de televisores e telas de computadores com tecnologia de emprego de TRC (tubo de raios catódicos). Ambos se fundamentam em coordenadas cilíndricas, sendo alternativos ao sistema RGB, para o qual as correspondências são feitas a partir de algoritmos de cálculo, e, embora sejam conceitualmente parecidos, reservam em si algumas diferenças importantes.

O HSL define uma cor segundo a combinação de três componentes, H (*hue*), como sendo o matiz; S (*saturation*), como sendo a quantidade de branco ou cinza presente no matiz; e L (*lightness*), no sentido de claridade. Em algumas referências o HSL é chamado por HLS ou HSI, com I sendo *intensity*, no sentido de intensidade luminosa; ou, HSG, com G sendo *gightness*, no sentido de claridade; ou, ainda HSB, com B sendo *brightness*, no sentido de brilho, ou seja, a energia em cada cor. E há referências em que L é apresentado como sendo ou *luminance*. Mas, todas estas designações referem-se ao mesmo sistema idealizado por Georges Valensi, em 1938, para dar uma solução à indústria televisiva, que à época migrava para transmissões a cores, permitindo que os receptores existentes recebessem as novas transmissões em banda colorida apresentando-as em formato preto e branco, tendo sido usado em todas as principais codificações de televisão em transmissão analógica, incluindo NTSC, PAL e SECAM. De outra forma, o advento do sinal colorido de televisão implicaria no descarte de todos os aparelhos produzidos até então, projetados para receber apenas imagens em preto e branco. Desde então, tornou-se um modelo consagrado na indústria, sendo utilizado em vários *softwares*.

O HSV define uma cor segundo a combinação de três componentes, H (*hue*), ou matiz, S (*saturation*) e V (*value*). Nesse sistema, S também corresponde à saída de uma tonalidade de acromático, ou seja, de branco ou cinza. Quanto mais saturado, menos branco ou cinza; e V relaciona-se a saída de uma tonalidade de preto, a cor da energia zero, ou seja, a quantidade de escuridão. É o sistema idealizado por Alvy Smith, em 1974, para o *SuperPaint* da *Macintosh*, um dos primeiros *softwares* gráficos para pintura em *bitmap* e desenho vetorial. Assim, a distinção entre V (*value*), do sistema HSV, e L (sendo *brightness*), do sistema HSL, é a maneira como os tons puros, totalmente saturados, são tratados. No HSL o componente *saturation* regride do matiz totalmente saturado para o cinza equivalente; já no HSV, passa do matiz totalmente saturado para o branco equivalente. Mas, a principal vantagem do HSV é exigir menor capacidade computacional nas transformações de RGB, do que de RGB para HSL (Smith, 1978).

A Figura 20 ilustra a forma de tratamento dado pelos modelos HSL e HSV com os tons puros e suas modificações para as demais cores suportadas por esses dois modelos.

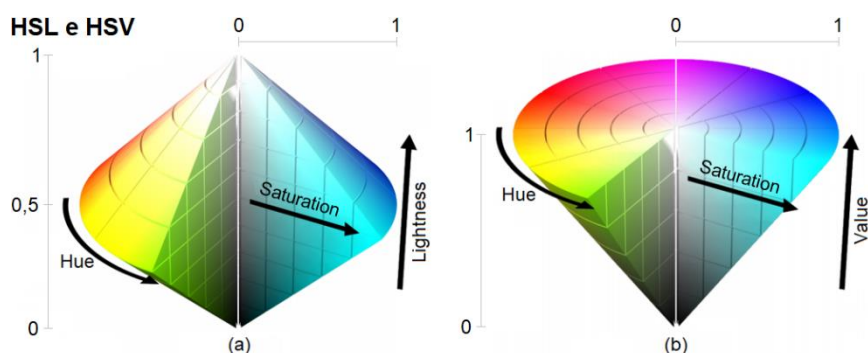


Figura 24 – Modelos HSL e HSV.  
 (a) Modelo HSL. (b) Modelo HSV.  
 Fonte: adaptado de (Mastelini, 2015).

Já a explicação para o fato do modelo HSV exigir menor capacidade computacional reside nas equações de transformação escolhidas para o sistema RGB. Ocorre que Georges Valensi modelou o sistema HSL para encontrar equivalência ao RGB por meio de equações trigonométricas, com uso extensivo das funções *cos*, *arctan* e *sqrt*. A grande sacada de Alvy Smith foi trabalhar com operações básicas, matrizes e variáveis lógicas, as quais são resolvidas computacionalmente apenas com operações de adição, que corresponde ao processamento mais rápido em qualquer processador binário.

Por último, o sistema CMY foi desenvolvido para reproduzir cores em papel, onde a resolução é dada por DPI. É, portanto, antagônico aos sistemas RGB, HSL e HSV que produzem as cores por síntese aditiva, ou seja, misturam feixes luminosos das cores RGB para produzir todas as demais cores. Papel não produz luz, reflete luz. Para refletir uma cor é necessário absorver todas as demais cores, razão pela qual o CMY é qualificado como um sistema subtrativo, ou seja, valendo-se de pigmentos com capacidades de absorvância específicas, subtrai da luz visível recebida todos os comprimentos de onda à exceção daquele que representa a cor desejada, único a ser refletido. A sigla CMY identifica esses pigmentos, C (*cyan*), como sendo ciano; M (*magenta*), como sendo magenta; e Y (*yellow*), como sendo amarelo. Em tese, da mesma forma que os feixes luminosos primários aditivos RGB, quando misturados, produzem o branco, a mistura dos três pigmentos das cores primárias subtrativas deveria resultar o preto, mas, os pigmentos não são substâncias ideais. Radiações com certos comprimentos de onda são refletidas em vez de serem absorvidas, resultando numa cor marrom turvo. Para corrigir esse efeito em impressoras, adicionou-se a cor preto (*black*), representada por K, pois B poderia confundir com *blue*. Essa variação é denominada CMYK (Lyra, 2008).

A Figura 21 representa o espaço de cores ideal das sínteses aditivas e subtrativa.

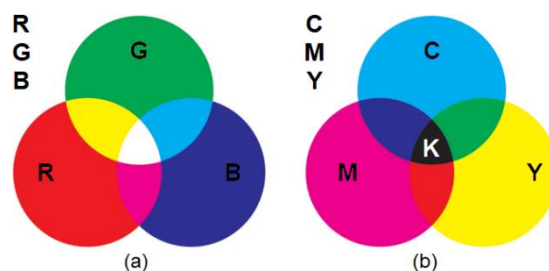


Figura 25 – Modelos RGB e CMY.  
 (a) Modelo RGB. (b) Modelo CMY ou CMYK.  
 Fonte: adaptado de (UFRGS, s.d.).

A importância do conhecimento dos sistemas de classificação de cores é a de deter o conhecimento necessário para traduzir cores em dados numéricos, de modo a obter competências e habilidades para a operação dos diversos *softwares* de melhoramento de imagens para a produção de relatórios de inspeções termográficas, posto que a conversão de uma imagem aditiva para subtrativa acarreta perda de resolução. A Figura 22 mostra a interface gráfica do *Microsoft Paint*, um dos mais simples e populares do mercado.

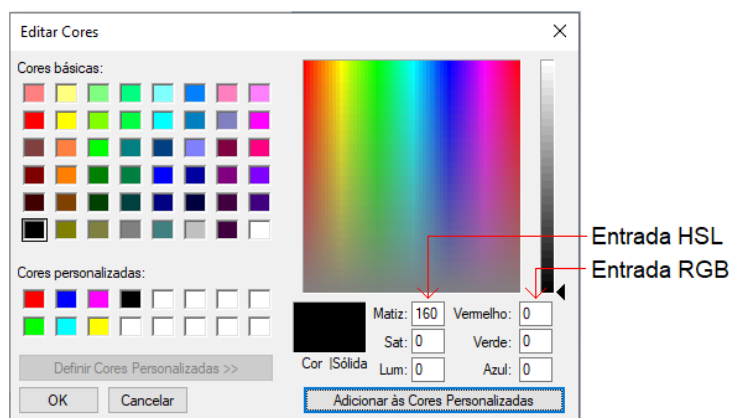


Figura 26 – Interface com o usuário do Paint.  
 Fonte: *print* de tela feito pelo autor.

Se necessário determinar a cor de superfícies, há diversos tipos de colorímetros no mercado, que permitem fazer essa leitura, usualmente, no sistema CIE-Lab.



Figura 27 – Colorímetro marca FRU, modelo WR10.  
 Fonte: <https://portuguese.alibaba.com>

A cor das superfícies tem influência ostensiva nos resultados dos termogramas, pois interfere diretamente em dois parâmetros físicos importantes: a reflectância e a absorptância. Superfícies de cor branca refletem todas as cores, portanto tem baixa absorptância em todos os comprimentos de onda do espectro visível. Quanto menor a absorptância de onda, menor a excitação do corpo, logo, menor o seu ganho de calor. Já as superfícies de cor preta absorvem todas as cores, razão pela qual têm alta absorptância em todos os comprimentos de onda do espectro visível, assim, corpos de cor preta sofrem a maior excitação de onda e acabam por se aquecer mais rapidamente (Bôas, et al., 2016).

De igual sorte, corpos de superfície colorida aquecer-se-ão mais sob à luz solar que corpos de superfície branca; e menos que corpos de superfície preta. A NBR 15220-2/2005, que trata do desempenho térmico de edificações e normatiza métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, reforça essa afirmação ao trazer os valores de absorptância para radiação solar em superfícies pintadas, conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Absortância para radiação solar (ondas curtas) para superfícies pintadas

Pintura	Absortância
Branca	0,20
Amarela	0,30
Verde clara	0,40
Alumínio (cor)	0,40
Verde escura	0,70
Vermelha	0,74
Preta	0,97

Fonte: (ABNT, 2005).

Por conseguinte, em tese, superfícies multicoloridas devem ser analisadas com cautela, pois os resultados dos termogramas podem acusar variações de temperatura que nenhuma relação tem com a existência de quaisquer patologias, sendo esperado um gradiente de temperaturas das mais frias para as mais quentes em correspondência às cores mais claras para as mais escuras. Em tese, pois há outras variáveis a considerar.

Preliminarmente, o substrato. Camadas de tinta são extremamente finas, logo possuem baixa inércia térmica. De tal sorte, um termograma pode ser bastante diferente do esperado, sob o ponto de vista da influência da cor, se houver variação na composição ou na espessura do substrato. Desaprumos e a falta de padronização nas dimensões dos tijolos costumam ser compensados nas edificações pela regularização conferida pelo reboco. Reboco, que também oculta pilares e outros elementos construtivos, com importantes diferenças em suas propriedades térmicas.

Isolando-se todas as possíveis interferências do substrato, um aspecto que derruba a tese em tela e raramente considerado, por ser extremamente contraintuitivo, é a absorvância de calor no espectro não visível. Ocorre que os corpos são excitados por todo o espectro eletromagnético, não apenas pela faixa do visível. Ondas ultravioletas e infravermelhas vindas do sol também aquecem os corpos, embora em menor grau de irradiância. Para que se perceba a importância deste aquecimento incremental a Figura 20 ilustra a densidade da energia de irradiância solar, de UV até MWIR.

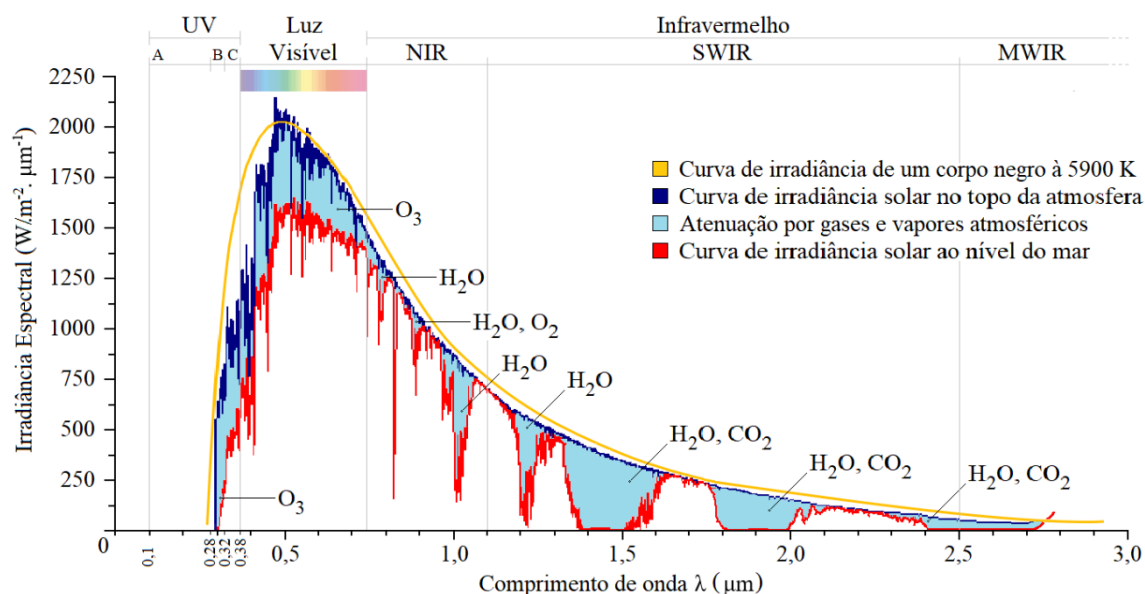


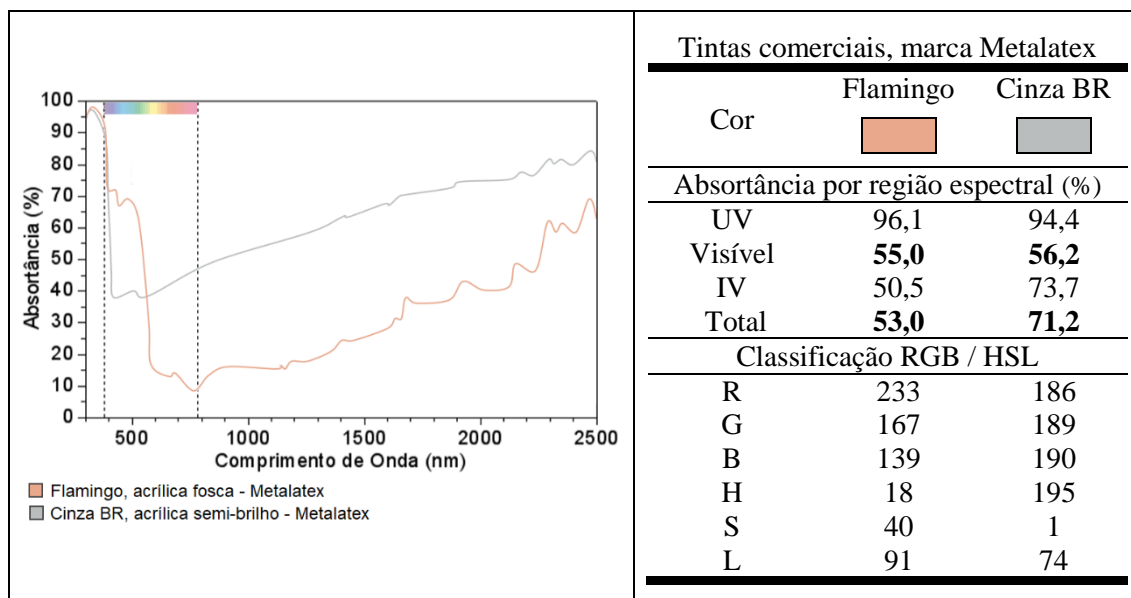
Figura 28 – Espectro da radiação solar para o caso do Sol no zênite.

Fonte: (Ponzoni, et al., 2015).

O aquecimento incremental pelas ondas não visíveis pode ser modificador de um resultado presumido. Como dito, é consuetudinário esperar em termogramas um gradiente de temperaturas das mais frias para as mais quentes em correspondência às cores mais claras para as mais escuras em superfícies coloridas, mas o aquecimento dos corpos por irradiância solar se dá pela excitação de onda – e onda não tem cor! As cores do espectro visível são apenas uma interpretação biológica do cérebro para estímulos sensoriais vindos do olho humano.

A análise por regiões do espectro solar, raramente é feita na literatura técnica especializada, onde são apresentados apenas dados genéricos referentes apenas à absorvância no visível, mas as diferentes cores se comportam de maneira bastante distinta para as três regiões do espectro solar, a do ultravioleta, a do visível e a do infravermelho. Esse comportamento varia de acordo com a composição química das tintas, podendo culminar com resultados bastante inesperados de absorvância frente à presunção realizada tão somente pela verificação da cor das superfícies.

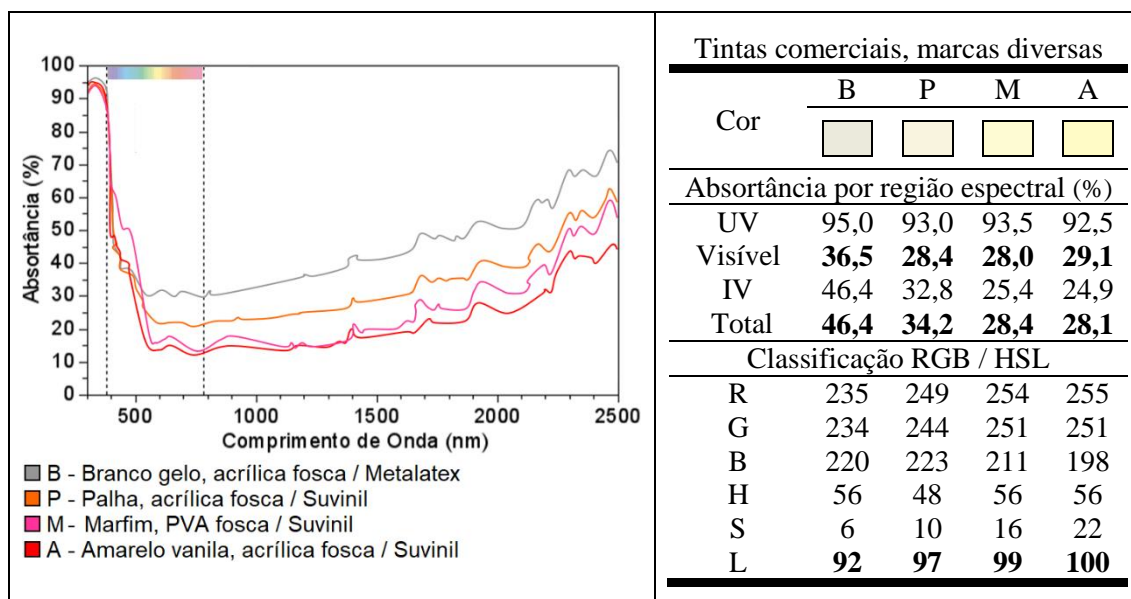
Por exemplo, amostras de um estudo realizado com tintas comerciais no Brasil, para medições de absorvância total média e absorvância média por região do espectro solar, feitas com espectrofotômetro, mostrou que as cores Flamingo e Cinza BR possuem absorvâncias semelhantes na região visível, mas suas absorvâncias totais, considerado todo o espectro solar, diferem muito significativamente, como ilustra o Quadro 3.



Quadro 3 – Absorvância muito distintas entre o visível e o espectro total da luz solar.

Fonte: adaptado de (Dornelles, 2008).

Já os resultados obtidos com a cor branco gelo, usualmente utilizada como segunda opção de cor clara depois do branco, apresentou absorvância superior às cores palha, marfim e areia, visualmente mais escuras, como ilustra o Quadro 4.



Quadro 4 – Absorvância do branco gelo maior que cores visualmente mais escuras.

Fonte: adaptado de (Dornelles, 2008).

Os resultados denotam que nem sempre o comportamento térmico é o esperado.

Para além da cor, a textura da superfície dos corpos também influencia o comportamento térmico. Como regra geral, superfícies rugosas tendem a se aquecer mais que superfícies polidas. A rugosidade de uma superfície é definida por suas micro-irregularidades geométricas. Ordinariamente, os materiais de construção civil apresentam considerável irregularidade, que estabelece picos e vales de diferentes alturas e a diferentes distâncias sobre sua superfície (Dornelles, 2008).

A Figura 27 exemplifica, de modo muito simplificado, a influência térmica da rugosidade na superfície de um material com absorvidade de 20%. Nela, o ponto A, localizado em região sem rugosidade, recebe a energia solar e absorve uma parcela desta, proporcional à absorvidade do material, ou seja 20%, o restante é refletido. O ponto B, localizado em região com rugosidade, também recebe a energia solar e absorve os mesmos 20%; os 80% restantes são refletidos, geralmente por reflexão difusa, em todas as direções. Uma parcela da energia refletida atinge o ponto C e outros 20% também é absorvido, incrementando, assim, a fração total de energia absorvida pela superfície e, por definição, sua absorvância. Algumas geometrias poderão provocar sucessivas inter-reflexões, mas apenas a primeira afeta a absorvância em níveis significativos.

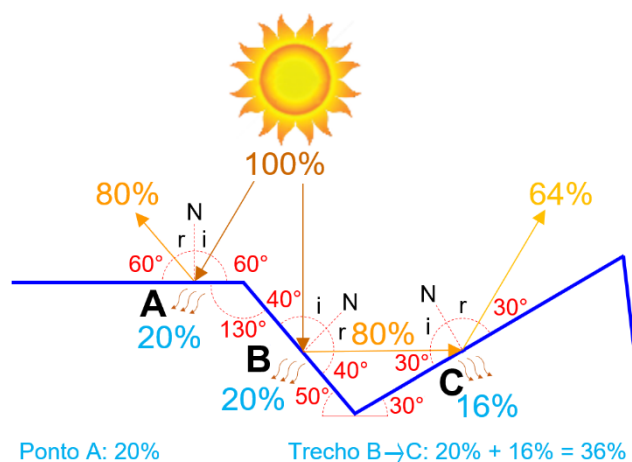


Figura 29 – Representação da absorvância incremental difusa da radiação solar.

Fonte: o autor.

A qualificação da rugosidade de um material é definida pelo tamanho ou altura das saliências existentes e a distribuição destas saliências sobre a superfície do corpo. Esta rugosidade pode ser verificada por vários tipos de equipamentos, como perfilômetros de contato ou rugosímetros, microscópios de varredura e até *scanners* de imagem. Dependendo da necessidade concreta, estes dispositivos permitem três técnicas de verificação: medição de erro de forma, de ondulação e de rugosidade (Santos, 2013).

Tais verificações são particularmente úteis quando se deseja investigar alguma não conformidade inesperada obtida em termogramas.

O tempo de exposição à irradiação de calor, pelo sol ou por outras fontes, quer, natural ou artificial, também é um fator a considerar, dependendo do tipo de patologia que se deseja investigar. Como a leitura termográfica nada mais é do que a representação, por meio de cores, da temperatura superficial dos corpos, para que se verifiquem os defeitos há a necessidade de que haja diferenças, mesmo que pequenas, na concentração de calor dos corpos. Em outras palavras, é improdutivo produzir termogramas em corpos que permaneceram prolongadamente em ambientes isotérmicos, pois, neste caso, todas as partes do corpo tendem a estar na mesma temperatura. Ou seja, os termogramas serão tanto mais úteis quanto maior o contraste das imagens entre as áreas com defeito e sem defeito, bem como melhor a definição do contorno dos defeitos, o que só é conseguido no instante de maior diferença térmica entre as áreas com e sem defeitos.

Este contraste pode ser medido por uma função de contraste, capaz de indicar a presença de defeito e até mesmo identificá-lo, por meio de *software*, desde que haja uma biblioteca de assinaturas de valores de contrastes conhecidos; ou ajudar a determinar o momento ótimo para a identificação de defeitos. O “*Thermal Running Contrast*” (TRC) é um exemplo de função de contraste, onde os valores são gerados para cada tempo e correspondem à evolução da diferença de temperatura da região da falha em relação à evolução da temperatura média da superfície em estudo (Vavilov, 2014).

Onde:

$$TRC = \frac{T_d(t) - T_{nd}(t)}{T_a(t) - T_a(t_0)}$$

$TRC$  – *Thermal Running Contrast*  
 $T_d(t)$  – temperatura da área com defeito no tempo  $t$   
 $T_{nd}(t)$  – temperatura da área sem defeito no tempo  $t$   
 $T_a(t)$  – temperatura média da superfície no tempo  $t$   
 $T_a(t_0)$  – temperatura média da superfície no tempo  $t_0$   
 $t_0$  – tempo inicial, instante do início do ensaio

O valor de TRC poderá ser positivo ou negativo, a depender dos materiais componentes da região com defeito e da região sem defeito; e da fase de ensaio considerada, aquecimento ou resfriamento. Por exemplo, uma parede de ensaio que apresente deslocamento de reboco se comportará, em geral, da seguinte forma: A região deslocada, por apresentar um bolsão de ar sob o reboco, aquecer-se-á mais rapidamente ante uma fonte de calor, pois o ar possui menor inércia térmica que o reboco, até que se atinja o instante isotérmico. Logo, este intervalo de aquecimento representa o primeiro período de maior TRC. Cessado o fornecimento de calor pela fonte, o resfriamento da região com defeito será igualmente mais veloz, produzindo um novo período de maior TRC, agora com valores negativos, até que se alcance o novo instante isotérmico. Quando TRC tender a zero, implica o instante isotérmico. A Figura 28 ilustra esta exemplificação.

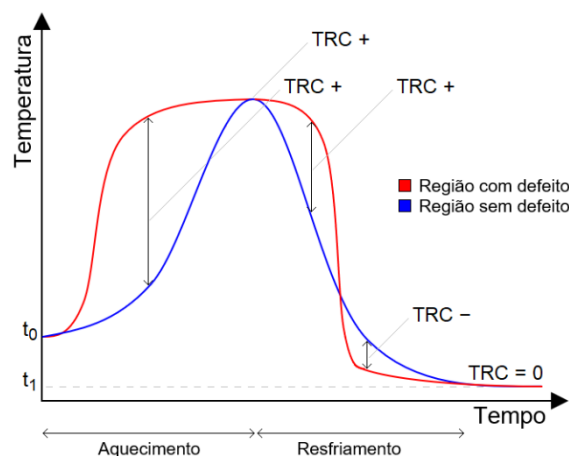


Figura 30 – Comportamento térmico geral de regiões com e sem defeito,  $t_0 > t_1$ .  
Fonte: o autor.

Assim, a presente revisão de literatura é concluída com a análise do termograma da Figura 31, que, apesar de apresentar uma grande variedade de cores, representando uma variação de temperaturas da ordem de mais de mais de  $10^{\circ}\text{C}$  na fachada de um imóvel, não evidencia a existência de qualquer patologia na edificação analisada.



Figura 31 – Interferência da cor em um termograma.  
Fonte: adaptado de (Lamberts, s.d.).

O termograma foi tirado da extremidade de uma edificação, às 11:45 horas, portanto, após haver sido aquecida pela irradiação solar por longo período de tempo na fachada leste. A fachada é pintada em duas cores: verde escuro, até o peitoril das janelas; e branco, no restante. Como esperado, o maior aquecimento superficial foi verificado na região “F”, por estar voltada para o sol e ser pintada de cor escura. A região “E”, por ter sido pintada de cor clara, aqueceu-se menos. A região “B”, também pintada de cor escura, mas, voltada para o sul, aqueceu-se menos que a região “F”. A região “A”, também sombreada, manifestou-se ainda mais fria que a região “B”, por ser pintada de cor clara. As regiões “C” e “D” são vistas mais frias que as regiões “A” e “B”, respectivamente, por localizarem o encontro das paredes (efeito massa). É possível verificar a fresa do reboco na face leste, detalhe “G”. A fresa da face sul, não alcançou suficiente contraste.

Percebe-se que tal análise prescinde de considerável capacitação técnica.

## Capítulo III

# ASPECTOS TÉCNICOS DA TERMOGRAFIA

### III.1 Normas técnicas para serviços termográficos e literatura

Apesar de ser uma técnica relativamente muito pouco empregada por profissionais da construção civil, a termografia é tecnologia bastante conhecida no lacônico mercado da inspeção de máquinas e edificações, perícias em máquinas e edificações e conservação de infraestruturas.

O Anexo A relaciona uma lista contendo trinta e cinco das principais normas técnicas brasileiras, europeias e estadunidenses alusivas ao emprego da termografia no mercado da engenharia. A tabela 8 tabula estas normas por assunto.

Tabela 8 – Classificação das principais normas técnicas que abordam a termografia, por assunto abordado

Norma	Assunto	Porcentagem
Inspeções não destrutivas em edificações	8	22,9
Inspeção elétrica, de máquinas e equipamentos	7	20,0
Princípios, fundamentos e terminologias da termografia	5	14,3
Inspeção de isolamento térmico	4	11,4
Treinamento e certificação de pessoal técnico	4	11,4
Inspeção não destrutiva aeroespacial	3	8,6
Equipamento termográfico e verificação de termovisores	3	8,6
Procedimento escrito (laudo)	1	2,9

Fonte: o autor.

Verifica-se que o maior interesse em normatização recai sobre inspeções não destrutivas em edificações, verificação de falhas em isolamento térmico e prevenção de panes em máquinas e equipamentos elétricos. Aliás, a aplicação da termografia no setor elétrico parece ser a mais bem assistida pelas normas estudadas na presente pesquisa. No entanto, todo este compêndio de normas técnicas está longe de esgotar o assunto.

O acesso à informação é ainda prejudicado pelo fato de existirem pouquíssimos livros sobre o tema, o que, associado ao elevando custo de aquisição dos equipamentos termográficos, torna a termografia um conhecimento restrito, sendo as publicações de normativas técnicas e as acadêmicas, como artigos científicos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, as melhores fontes de aprendizado. Também são raros os estabelecimentos de ensino que dão formação técnica na área, um cenário em parte amenizado pelo esforço dos fabricantes em disponibilizar manuais de operação e guias de utilização de seus equipamentos. A disseminação do conhecimento é, pois, singela.

### III.2 Características técnicas relevantes dos equipamentos termográficos

Como todo equipamento eletrônico, também as câmeras termográficas são qualificadas por suas características técnicas. E, como costuma ser para todo aquele que se propõe a comprar uma câmera de produção de fotos ou vídeos, é provável que o adquirente tenha como primeira preocupação primar pela resolução. Os demais aspectos, muitos dos quais são desconhecidos ao senso comum, acabam por ser menosprezados, um grande erro, que pode levar a um mau investimento. As câmeras termográficas têm qualidades bastante específicas, que devem ser cuidadosamente analisadas no momento da aquisição, pois, como o mercado da termografia é bastante exclusivo, revender o equipamento, para capitalizar a aquisição de algum outro, é uma empreitada muito difícil.

Eleger o pós-venda como primeira preocupação é altamente recomendável. Por serem dispositivos de alto valor de aquisição e muito especializados, todo o investimento pode restar perdido se o aparelho der algum defeito e não houver acesso à manutenção. E nenhum equipamento eletrônico, por melhor que seja, é imune a falhas. Assim, é de grande conveniência se certificar de que o fabricante dispõe de boa assistência técnica. A Tabela 9 lista alguns dos principais fabricantes mundiais de equipamentos termográficos.

Tabela 9 – Fabricantes de equipamentos termográficos

Fabricante	Site	País
FLIR Systems	<a href="http://www.flir.com">www.flir.com</a>	EUA
Fluke	<a href="http://www.fluke.com/pt-br/produtos/cameras-termicas">www.fluke.com/pt-br/produtos/cameras-termicas</a>	EUA
Advanced Energy	<a href="http://www.advancedenergy.com/products/temperature-measurement">www.advancedenergy.com/products/temperature-measurement</a>	EUA
Avio	<a href="http://www.avio.co.jp/products/infrared">www.avio.co.jp/products/infrared</a>	Japão
SAT Infrared	<a href="http://www.sat.com.cn">www.sat.com.cn</a>	China
Guide Smart	<a href="http://www.guideir.com/product/index/mid/11.html">www.guideir.com/product/index/mid/11.html</a>	China
Xenics	<a href="http://www.xenics.com">www.xenics.com</a>	Bélgica

Fonte: o autor.

A resolução depende da qualidade de *pixel*. A qualidade de *pixel* refere-se a seu tamanho, designado pela área que ocupa no espaço; à quantidade de *pixels* por unidade de área; e à quantidade de *bits* utilizados na representação de cada *pixel*.

*Pixel* é o menor elemento em um dispositivo de exibição ao qual é possível atribuir-se uma cor, ou seja, é o menor ponto que forma uma imagem digital (Canto, s.d.). Em uma imagem termográfica, cada *pixel* corresponde a uma determinada temperatura (Oliveira, 2017). O *bit* é a menor unidade de informação usada pelo computador, sendo representado pelos dígitos 1, para ativado, e 0, para desativado. Um *bit*, por exemplo, pode representar as cores branco e preto. Assim, um ponto pode ser representado pela menor resolução possível, que corresponde a um *pixel* a um *bit* por *pixel* (Righi, s.d.).

De tal forma, a resolução será tanto melhor quanto maior a quantidade de *pixels* por unidade de área e maior a quantidade de *bits* para representar cada *pixel*. Para compreender melhor a influência desses dois conceitos na resolução, a Figura 32 ilustra como a maior quantidade de *pixels* por unidade de área melhora a resolução de imagem; e a Figura 33, como a quantidade de *bits* agrega informação a cada *pixel*.

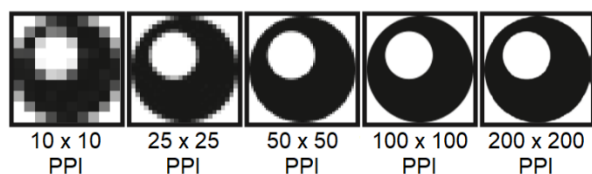


Figura 32 – Influência da quantidade de *pixels* na resolução.  
Fonte: (Flir, 2016).

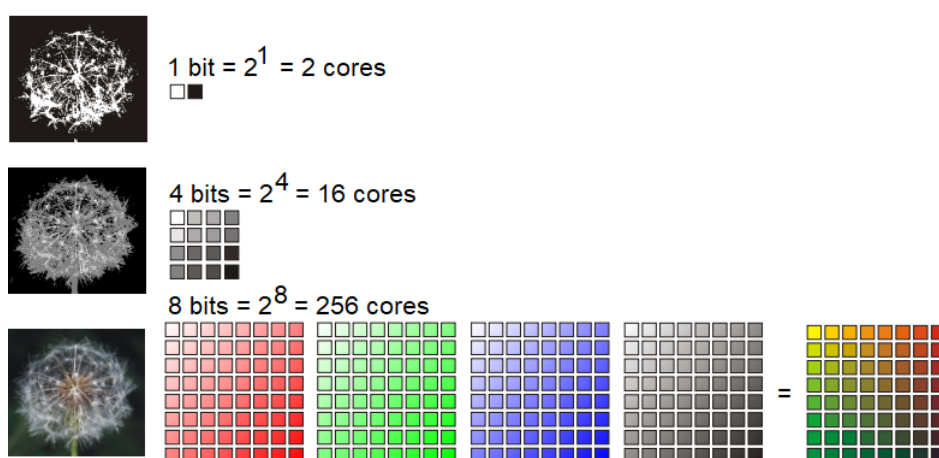


Figura 33 – Influência da quantidade de *bits* na resolução.  
Fonte: adaptado de (Righi, s.d.).

Por conseguinte, em termos lógicos, uma imagem é representada por uma matriz de *pixels* com 3 dimensões: largura, altura e profundidade de *bits*. Largura e altura podem ser arbitrariamente representadas por qualquer unidade de medida física, sendo PPI a mais comum no mercado de câmeras digitais. Por exemplo, uma imagem de 3000 x 3000 *pixels* a 300 PPI terá uma medida nativa de 10:10 polegadas, isto é 25,4 x 25,4 cm, podendo ser apresentada de forma ampliada ou reduzida. A profundidade de *bits* é dada pelo número de *bits* usados para codificar as cores. Imagens de 8 *bits* tem 256 níveis de cor. Com 16 *bits* serão 65536 níveis de cor, logo, com degradês mais suaves do objeto (Mortara, 2015).

Cabe ressaltar que uma câmera termográfica poderá ter vários valores distintos de resolução, a depender de sua arquitetura. Se possibilitar a captura e seleção de imagens dos espectros visível e não visível para apresentá-las em um visor, tem-se, no mínimo:

- ✓ Resolução da câmera de luz visível;
- ✓ Resolução do sensor de infravermelho; e
- ✓ Resolução do visor ou tela da câmera.

Alguns fabricantes, ao descreverem seus produtos, podem apresentar a terminologia “*pixels* efetivos”. Essa é uma forma mais transparente de qualificar o produto, designando que a resolução de imagem é igual à capacidade de processamento de imagem do dispositivo. Quando a unidade de processamento de imagem tem capacidade inferior, a captura se dá por quadros, que são interpolados para formar a imagem final. Esse processamento é mais lento, podendo resultar em imagens de menor qualidade, por exemplo, tremidas ou com sobreposições e emendas, visíveis quando ampliadas. Por empregar processadores menos complexos, tornam o produto mais barato.

É importante destacar que cada valor de resolução apresentado é independente, ou seja, a resolução da câmera de luz visível nada tem a ver com a do sensor de infravermelho. De tal sorte, a informação menos importante talvez seja aquela que descreve exatamente o que o operador verá no momento da captura da imagem, ou seja, a resolução da tela da câmera. O equipamento pode ter uma resolução de tela bem baixa, por razões comerciais, mas produzir imagens de alta resolução, tanto no visível como no espectro não visível. A Figura 34 ilustra dois termogramas de distintas resoluções.

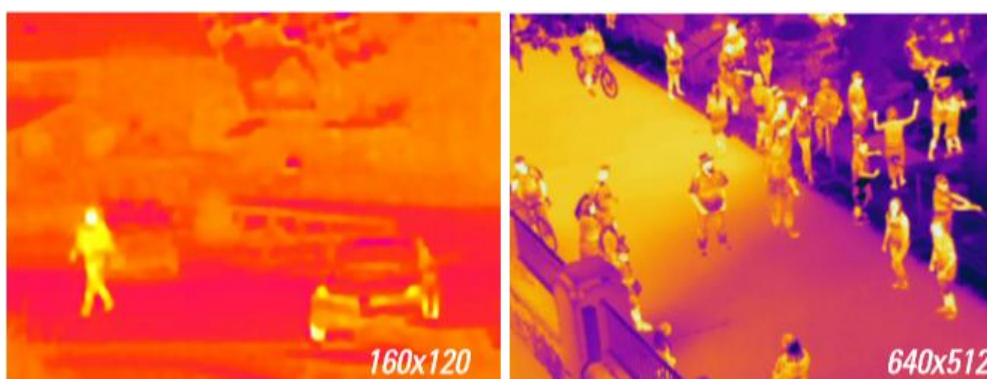


Figura 34 – Comparação de termogramas de com resoluções 160x120 e 640x512.  
Fonte: (Flir, 2016).

Algumas câmeras permitem não apenas a captura de termogramas como também a produção de pequenos vídeos termográficos. Nestes casos, a frequência do equipamento é uma qualidade de grande importância.

Frequência é a quantidade de quadros capturados por unidade de tempo para compor o vídeo. Para produzir um vídeo em que a câmera é posicionada de forma estática, como em um tripé, e o objeto filmado está imóvel, basta uma baixa frequência. Se a câmera é posicionada de forma estática e o objeto filmado está em movimento, é preciso uma frequência de operação maior. E se a câmera é instalada em um dispositivo móvel, como um drone, o objeto filmado, mesmo sendo imóvel, estará em movimento relativo, agravado pela oscilação inerente ao voo, exigindo uma ainda maior frequência.

Quando a relação frequência x velocidade relativa de movimento é inadequada, o vídeo produzido se apresenta como uma produção quadro-a-quadro. Assim, quanto maior a velocidade relativa entre a câmera e o objeto, mais elevada deve ser a frequência do dispositivo para que seja possível produzir vídeos de boa qualidade.

A frequência pode vir expressa em QPS, FPS ou Hertz. Uma câmera designada de 30 Hz implica dizer que produz trinta quadros por segundo de qualidade de vídeo, que é um bom valor para uso em drones. Para entender melhor essa questão, sugere-se assistir ao vídeo explicativo da RMUS *Unmanned Systems Fleet Management*, disponível no YouTube no *link* <https://www.youtube.com/watch?v=3mkkgzAwwsiY>, onde são apresentados dois vídeos termográficos simultâneos, gravados por câmeras de 9 e 30 Hz, porém, de mesma resolução espectral.

Um detalhe importante sobre a operação de câmeras embarcadas em drones é a distância entre a câmera e o objeto que se deseja termografar. Por vezes esse distanciamento é necessário para a proteção do próprio drone, cuja segurança de voo pode ser fortemente afetada, por exemplo, com uma rajada de vento inesperada ou uma interferência severa e persistente na comunicação entre o drone e a unidade de rádio controle. Nas demais situações, é por proteção de pessoas contra acidentes e incidentes que podem ocorrer durante essas operações aéreas. Destarte, diz a norma brasileira:

*“(...) Em nenhuma hipótese a distância da aeronave não tripulada poderá ser inferior a 30 metros horizontais de pessoas não envolvidas e não anuentes com a operação. O limite de 30 metros não precisa ser observado caso haja uma barreira mecânica suficientemente forte para isolar e proteger as pessoas não envolvidas e não anuentes na eventualidade de um acidente” (ANAC, 2017).*

Todavia, quando há anuência formal do proprietário do imóvel a inspecionar e/ou das pessoas sujeitas à operação aérea com drone, como no caso em que um síndico contrata a inspeção remota da fachada de seu edifício, não há normatização quanto à distância mínima de segurança a observar. Para estes casos, é de bom alvitre respeitar o distanciamento mínimo de segurança indicado pelo fabricante do drone.

De toda sorte, considerar o distanciamento entre a câmera e os objetos que se deseja termografar é reflexão indispensável na escolha de uma câmera termográfica, mesmo que não se pretenda operar com drones. A inspeção de fachadas de edifícios e de estações elétricas de alta voltagem com câmera portátil, a partir do solo, são casos muito comuns onde precisa-se obter imagens com grande riqueza de detalhamento, apesar de um considerável distanciamento. Para tal, o uso de lentes é fundamental.

A Figura 35 ilustra imagens capturadas por câmera Flir VUE Pro 640 Series, com frequência de 30 Hz, resolução 640x480 e diferentes lentes, mas, sempre embarcada em drone DJI Inspire, à 23 m de altura.



Figura 35 – Comparação de termogramas com uso de diferentes lentes.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=-iDWkGYmUik>

Há fabricantes que oferecem algumas de suas câmeras termográficas com diversas opções de lentes, cabendo ao consumidor fazer a sua escolha. Em buscas realizadas na *internet*, durante a realização desta pesquisa, no entanto, pouca ou nenhuma informação estava disponibilizada nos *sites* de fabricantes e revendedores para auxiliar nesta tomada de decisão.

Por oportuno, convém destacar que toda a teoria que subsidia o processo decisório para a aquisição de lentes de aplicação em câmeras fotográficas profissionais não se aplica às câmeras termográficas, pois elas tem como variável de cálculo da distância focal a abertura do diafragma, que controla a quantidade de luz, em área, que chega ao obturador, que, por sua vez, regula o tempo de passagem da luz. Câmeras termográficas não possuem diafragma, nem obturador.

Além disso, o uso de lentes, ao favorecer a tarefa de inspecionar objetos distantes, causa, pelo menos, três importantes problemas. O primeiro deles é que quanto maior é a distância que a lente permite operar entre a câmera e o objeto, maior será a interferência atmosférica a considerar na obtenção de imagens termográficas. O segundo é um aspecto que também pode ser observado na Figura 35, a redução do campo de visão. Ao se comparar o termograma produzido pela lente de 9 mm com os demais, percebe-se um campo de visão muito maior que nas imagens obtidas pelas lentes de 13 e 19 mm. Em operações de busca e salvamento esse é um efeito bastante prejudicial. O terceiro ainda pode ser observado na Figura 35, embora não esteja tão evidente, a área do objeto que se deseja termografar, que no caso é a pessoa caminhando no parque, muda de acordo com a lente utilizada, logo, há alteração na relação entre *pixels* de sensor e *pixels* espaciais.

Por outro lado, é exatamente essa alteração na relação entre *pixels* de sensor e *pixels* espaciais que importa ao estudo que subsidiará o processo decisório da escolha da câmera termográfica mais adequada à utilização que se pretende, independentemente da lente que o equipamento possa ter. Ocorre que, diferentemente do que é mister na prática de um fotógrafo, para o qual importa a melhor captura possível de toda a cena na qual se insere o objeto, ao termografista interessa tão somente capturar a leitura de calor da região que denuncia a existência de alguma patologia no objeto inserido nessa cena, pois é nesta região que se encontra o *pixel* espacial desejado capturar para a análise térmica pretendida. Capturar o *pixel* espacial certo é o mister do termografista.

Convém ressaltar que a câmera termográfica sempre mostrará alguma leitura qualquer à cerca da temperatura superficial dos corpos, mas, somente sua utilização consciente permitirá emergir a leitura pertinente que identificará a patologia desejada investigar no objeto em análise. Para tal, é preciso perceber que o *pixel* de sensor tem tamanho fixo e sua quantidade existente no dispositivo é definida, ao passo que a imagem capturada à altura do objeto, apesar de ter a mesma quantidade de *pixels* do sensor, terá cada *pixel* espacial de tamanho proporcional à distância entre a câmera e esse objeto. E de tal sorte, é preciso introduzir um novo conceito de resolução, a resolução espacial, que define o menor detalhe de imagem térmica que pode ser percebido. (Santos, 2006).

O campo de visão, informado pelo fabricante em graus, é chamado *Field of View*, ou FOV. A esse campo de visão corresponde uma área à certa distância da lente, que é delimitada por uma dada dimensão horizontal, chamada HFOV, e outra, vertical, chamada VFOV. O *pixel* espacial relevante encontrar-se-á em uma pequena região deste campo de visão, o *Instantaneous Field of View*, ou IFOV, usualmente expresso em miliradianos. Os *pixels* espaciais são, portanto, as projeções dos *pixels* da matriz do sensor no objeto observado (Teixeira, 2012). A Figura 36 ilustra estes conceitos.

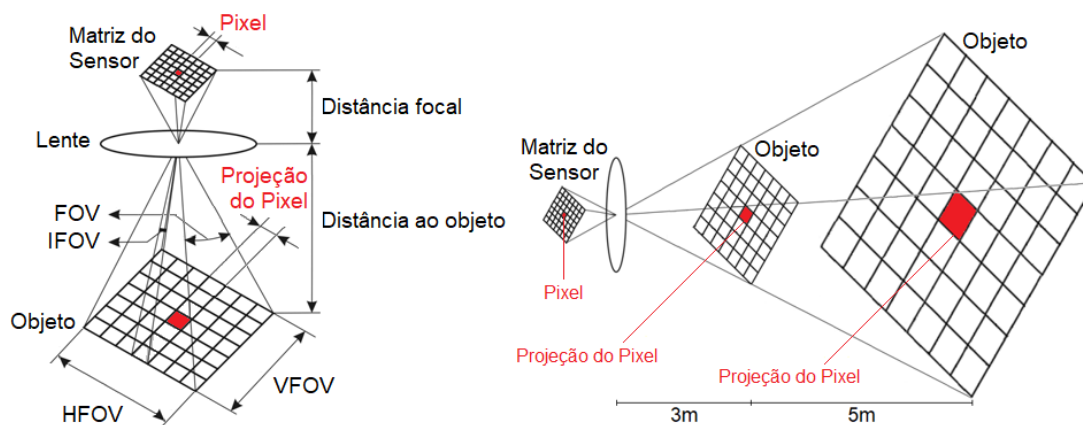


Figura 36 – FOV, IFOV, HFOV, VFOV e a projeção do pixel de sensor no objeto.

Fonte: adaptado de (Pencheva, et al., 2006).

A partir destes conceitos, é possível abstrair algumas relações matemáticas interessantes (Caldeira, 2016).

$$IFOV = \frac{FOV}{Pixel}$$

$$HFOV = L \cdot \tan\left(FOV_H \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right)$$

$$VFOV = L \cdot \tan\left(FOV_V \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right)$$

$$H_{Pixel} = L \cdot \tan\left(\frac{FOV_H}{Pixel_H} \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right)$$

$$V_{Pixel} = L \cdot \tan\left(\frac{FOV_V}{Pixel_V} \cdot \frac{\pi}{180^\circ}\right)$$

Onde:

FOV – Campo de visão da imagem, em graus

FOV<sub>H</sub> – Abertura horizontal do FOV, em graus

FOV<sub>V</sub> – Abertura vertical do FOV, em graus

IFOV – Campo de visão de 1 *pixel*, em *mRad*

L – Distância entre a câmera e o objeto

HFOV – Dimensão horizontal do FOV

VFOV – Dimensão vertical do FOV

H<sub>Pixel</sub> – Dimensão horizontal do *pixel* do IFOV

V<sub>Pixel</sub> – Dimensão vertical do *pixel* do IFOV

Com essas relações, é possível verificar o tamanho do *pixel* à altura do objeto para uma dada distância entre esse objeto e a câmera. Quanto menor o tamanho desse *pixel*, maior a precisão da leitura. Cabe ao termografista ponderar se o tamanho desse *pixel* é adequado à precisão da leitura que deseja obter. Assim, alcançar a resolução espacial adequada para a leitura pretendida depende muito mais da habilidade do termografista do que do equipamento em si. O Apêndice A demonstra a aplicação do método de cálculo para verificação do tamanho do *pixel* espacial e explica como o valor de cálculo obtido serve ao processo decisório da escolha do equipamento e à habilidade profissional de se obter a resolução espacial adequada para a leitura pretendida.

Há dois tipos de leituras que se pode obter com uma câmera termográfica, leitura qualitativa e quantitativa. Na termografia qualitativa, as informações obtidas advêm da análise das diferenças na distribuição térmica superficial do objeto, a partir de um gradiente de cores, para uma dada faixa de temperaturas. Na termografia quantitativa, as informações obtidas vão além desse gradiente de cores, pois são obtidos valores de temperaturas na superfície do objeto observado (Sales, 2008).

As medições de temperatura quantitativas são realizadas por meio da função radiométrica que algumas câmeras termográficas possuem. A partir desta função pode ser possível selecionar a medição por ponto ou por área, a depender do equipamento. No caso da medição por área, é exibida a temperatura média da área selecionada na tela da câmera, o que é feito por meio de algum tipo de *joystick* ou *touch*. Ainda a depender do equipamento, pode ser possível a escolha por uma área circular ou retangular, como também a seleção das múltiplas opções, concomitantemente. A Figura 37 ilustra essas variadas opções de captura radiométrica do valor de temperatura superficial de um corpo.

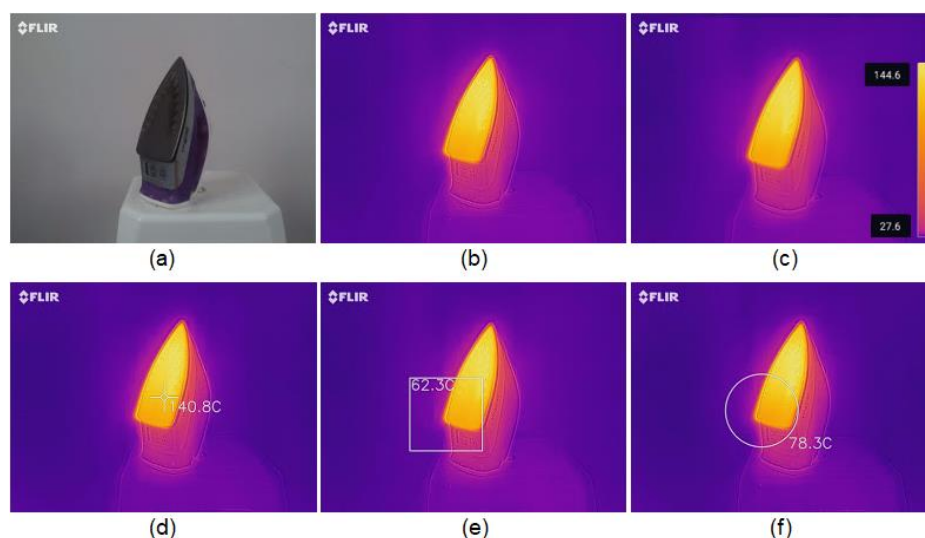


Figura 37 – Opções de captura.

- (a) espectro visível. (b) imagem qualitativa. (c) imagem qualitativa com legenda de temperatura.  
 (d) imagem quantitativa, medição no ponto. (e) imagem quantitativa, medição média em área retangular.  
 (f) imagem quantitativa, medição média em área circular.

Fonte: o autor.

Percebe-se que, para uma mesma cena, vários foram os valores de temperatura exibidos nas leituras quantitativas. Isso decorre do(s) *pixel(s)* espacial(ais) capturado(s) para a exibição da leitura. No caso das medições por área, haverá sempre vários *pixels* envolvidos na medição.

Caso o objeto seja muito pequeno, ou caso se deseje verificar a temperatura de apenas uma diminuta parte do objeto, que doravante chamaremos de alvo, esse ponto deve ser igual ou menor que o *pixel* espacial de leitura, o que é garantido pelo conhecimento do tamanho do *pixel* espacial a partir de um determinado distanciamento do alvo, caso contrário a leitura será totalmente imprecisa. A Figura 38 ilustra os resultados ótimo, aceitável e incorreto, obtidos a partir de diversos distanciamentos entre câmera e objeto.

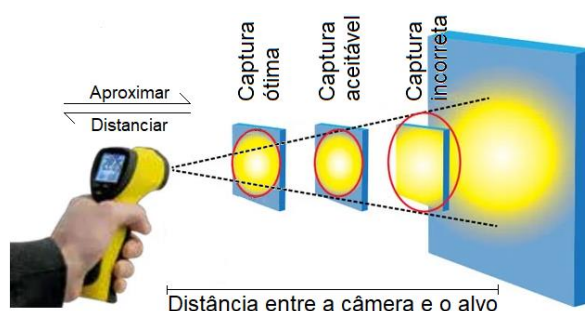


Figura 38 – Qualificação pela variação da distância entre a câmera e o objeto.

Fonte: adaptado de [www.flir.com.br](http://www.flir.com.br)

Assim, percebe-se que o resultado mais preciso de leitura da temperatura superficial do objeto da Figura 37 é o da imagem (d). A Figura 39 amplia a imagem (d) da Figura 37 e detalha esse ponto de medição, que doravante chamaremos de mira.

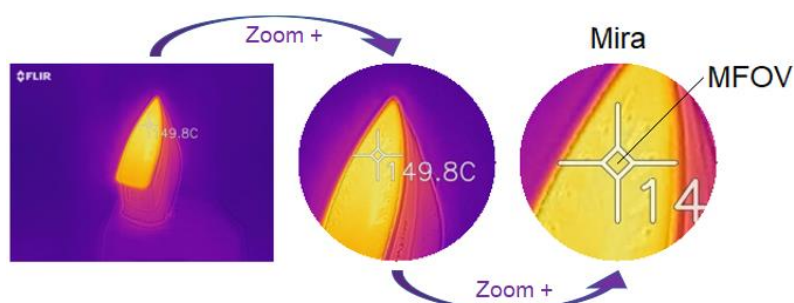


Figura 39 – Mira da câmera e resolução MFOV.  
Fonte: o autor.

A mira radiométrica da câmera termográfica também terá uma resolução espacial específica, chamada *Measurement Field of View*, ou MFOV. Esse campo de visão da medição, de igual sorte, irá variar com a distância entre a câmera e o objeto, sendo tanto maior quanto maior for essa distância. Mas ele não representa apenas 1 *pixel* espacial, como nas medições qualitativas, e sim um valor definido pelo fabricante, constante das características técnicas do equipamento, geralmente 3 ou 5. Quando o MFOV for 3 implica que o campo de visão da mira é a projeção de uma matriz de 3 x 3 *pixels* do sensor. Quando for 5, a projeção de uma matriz de 5 x 5 *pixels* do sensor (Toselli, 2020). A figura 40 ilustra a projeção dos *pixels* de sensor na mira para os valores de MFOV 3 e 5.

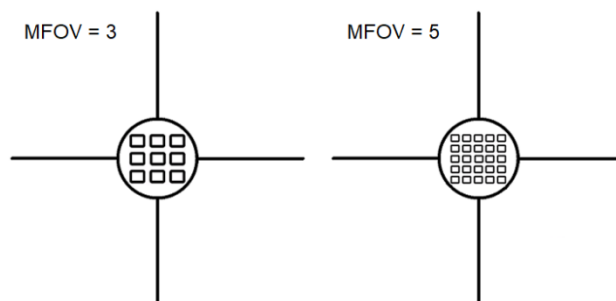


Figura 40 – Mira da câmera e representação do MFOV para os valores 3 e 5.  
Fonte: adaptado de (Toselli, 2020).

Ao utilizar a função radiométrica de uma câmera termográfica é fundamental que o alvo esteja totalmente enquadrado na mira, do contrário a matriz de sensores, segundo o MFOV, capturarão não apenas a temperatura superficial do alvo do objeto, mas também a temperatura de sua vizinhança, produzindo uma leitura imprecisa da região de interesse. O perfeito enquadramento depende da distância entre a câmera e o alvo, pois quanto maior a distância, maior será a área espacial do MFOV. O Apêndice B demonstra a aplicação do método de cálculo para verificação da máxima distância entre a câmera e o objeto que permite o perfeito enquadramento do alvo na mira da câmera. A Figura 41 ilustra as situações de enquadramento adequado e incorreto do alvo na mira da câmera.

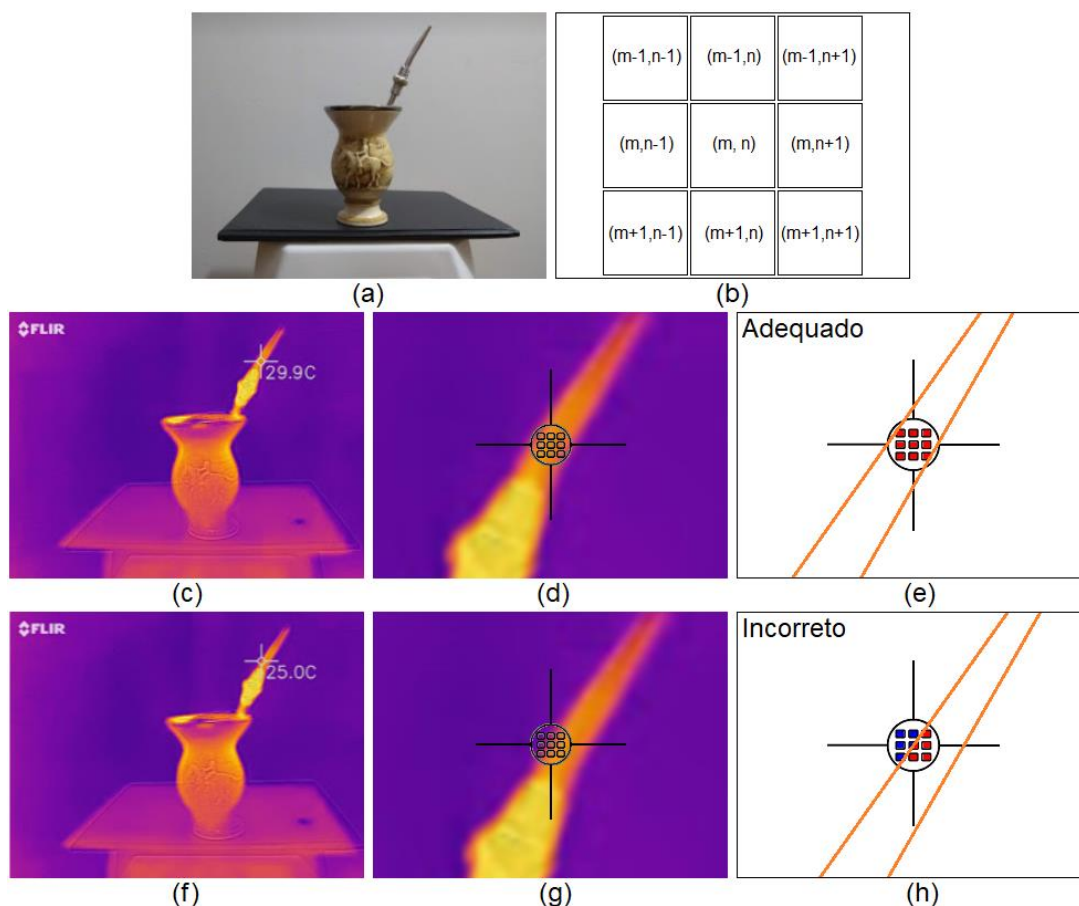


Figura 41 – Enquadramento da mira no alvo do objeto.

- (a) objeto. (b) matriz MFOV. (c) imagem quantitativa com legenda de temperatura.  
 (d) enquadramento da mira no alvo. (e) representação do enquadramento.  
 (f) imagem quantitativa com legenda de temperatura.  
 (g) enquadramento da mira no alvo. (h) representação do enquadramento.

Fonte: o autor.

Percebe-se que a leitura obtida na imagem (f) foi menor que a obtida na imagem (c), pois, como destacado em (d) e representado em (e), na primeira captura houve o perfeito enquadramento do alvo na mira da câmera. Já na imagem (f), obteve-se uma leitura imprecisa, haja vista que, como destacado em (g) e representado em (h), os *pixels* espaciais da projeção da matriz MFOV do sensor (m-1, n-1), (m-1, n), (m, n-1), (m+1, n-1) ficaram fora do alvo e (m, n) ficou parcialmente sobre o alvo.

A sensibilidade do sensor de uma câmera é especificada como Temperatura Diferencial Equivalente ao Ruído (NEDT). É uma métrica sinal-ruído que informa a diferença de temperatura necessária para produzir um sinal igual ao ruído temporal da câmera e, por extensão, a diferença mínima de temperatura que a câmera pode resolver. O NEDT é geralmente expresso em milliKelvin (mK), com números mais baixos indicando desempenho superior que números mais altos (Flir, 2016).

A sensibilidade térmica é inversamente proporcional à temperatura em que o componente está envolvido, o que significa que o sistema torna-se mais ruidoso em baixas temperaturas e a resolução de temperatura diminui (Santos, 2012). Quando a temperatura ambiente cai, câmeras com resposta espectral na faixa de MWIR, de 2,5  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ , tendem a ter sua sensibilidade mais prejudicada do que as da faixa de LWIR, de 8  $\mu\text{m}$  a 14  $\mu\text{m}$ , pois a sensibilidade NEDT é uma função da temperatura de fundo (Holst, 2000).

A diferença mínima de temperatura detectada por uma câmera termográfica depende do tipo de detector, podendo variar entre 0.020°C a 0.075°C. A gama de medição de temperatura da câmera deve ser observada na aquisição do equipamento em função da temperatura dos elementos a medir, devendo esta estar compreendida no intervalo que se pretende operar (Sousa, 2010). Algumas câmeras termográficas possuem faixas de temperatura de operação configuráveis. Nestes casos, o operador deve estar atento ao ambiente em que pretende trabalhar, a fim de obter o máximo rendimento de seu dispositivo (Flir, 2018).

Ainda sobre configurações, é de grande utilidade que a câmera permita formas variadas de captura de imagens termográficas, além da simples produção de termogramas, como a produção de vídeos, vídeos por tempo e a produção de termogramas sequenciados por intervalo de tempo pré-estabelecido. As capturas por faixa de temperatura pré-estabelecida e de pontos com temperaturas pré-selecionadas também são de grande utilidade.

Também há câmeras termográficas que interpolam imagens captadas por sensores na faixa do infravermelho com imagens captadas por outros sensores, na faixa do ultravioleta ou mesmo na faixa do visível. Essas interpolações podem ser de grande utilidade, pois agregam mais informação aos termogramas produzidos (Flir, 2017). A Figura 42 ilustra o ganho de inteligibilidade com uma imagem da faixa do infravermelho interpolada com a faixa do visível, uma funcionalidade que a Flir chama de MSX.

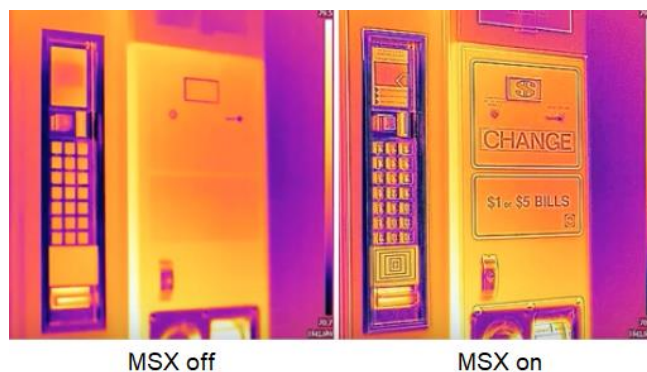


Figura 42 – Função MSX da câmera UAV Flir Duo Pro R.  
Fonte: <https://dronelife.com/2017/11/02/thermal-camera-right-flir-duopro>

Outra funcionalidade de grande utilidade nas medições de campo é a possibilidade de seleção de foco em um determinado objeto presente no campo de visão da câmera. A focagem é um dos aspectos mais importantes da termografia, uma imagem desfocada pode fornecer dados que podem resultar em diagnósticos incorretos. A Fluke chama essa funcionalidade de MultiSharp Focus, que permite a captura de imagens com foco em diversos elementos posicionados a diferentes distâncias do termovisor, criando um termograma com focos variados nos vários elementos presentes no campo de visão ao mesmo tempo (Fluke, 2013). A Figura 43 ilustra o ganho de elegibilidade com o uso da funcionalidade da seleção de foco.

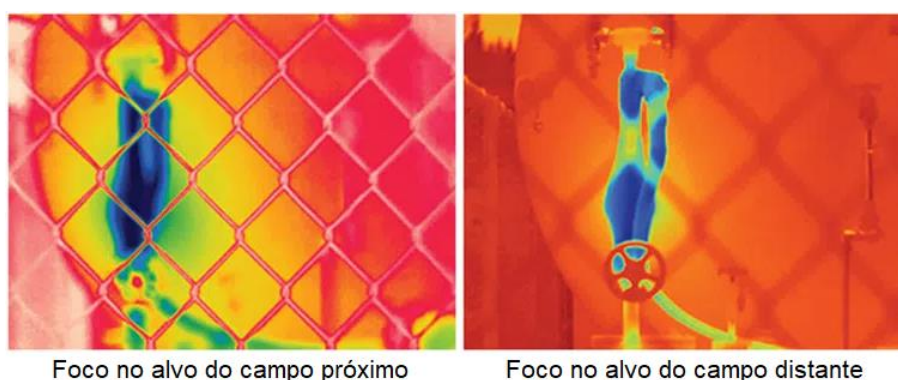


Figura 43 – Funcionalidade MultiSharp de seleção de foco.

Fonte: <https://www.midstateinstruments.com/fluke-ti480>

Atenção à autonomia da bateria e, sobretudo, à facilidade de sua substituição. Boa parte das câmeras termográficas disponíveis no mercado possuem baterias que só podem ser substituídas pela assistência técnica autorizada. O tempo de vida útil das baterias é o mesmo das baterias dos *smartphones*, ou seja, cerca de 300 a 500 ciclos, pois, em geral, também são do tipo íon-lítio. Logo, valem as mesmas recomendações de manejo para alcançar a maior vida útil possível, ou seja, não deixar descarregar completamente, evitar carregadores rápidos, não deixar carregando por tempo demasiado e evitar o uso em ambientes muito frios ou muito quentes – os limites de temperatura ambiente também são informados pelo fabricante (OlharDigital, 2018). A forma de recarga também é um aspecto a considerar, sendo vantajoso a possibilidade de uso de carregadores comuns para *smartphones*.

Um dado que costuma passar despercebido, mas pode ser de grande relevância em determinadas situações é a resistência do equipamento a golpes e altura de queda. Alguns fabricantes trazem essa informação e, dado ao alto valor de aquisição de alguns desses equipamentos, sobretudo para aqueles que podem ser utilizados embarcados em drones, essa é, sem dúvida, uma informação a considerar.

Por fim, o formato dos arquivos produzidos também deve ser uma preocupação, pois alguns formatos não são compatíveis com *softwares* de melhoramento de imagens radiométricas e produção de relatórios e laudos de inspeção, como o *FlirTools*, da Flir, e os *InsideIR* e *SmartView*, da Fluke. Embora essa dificuldade possa ser contornada com o uso de outros *softwares* de melhoramento de imagens não específicos, como o *CorelDRAW* e o *Photoshop*, tal opção costuma exigir uma curva de aprendizagem muito mais longa.

Após a aquisição das imagens, técnicas de pré-processamento são aplicadas com o objetivo de melhorar a qualidade dos termogramas. O melhoramento de imagem é obtido por meio da manipulação do contraste, segmentação e filtragem aplicadas com a finalidade de enfatizar ou realçar alguma característica de interesse ou recuperar imagens que sofreram algum tipo de degradação devido ao ruído, perda de contraste ou borramento (Oliveira, 2017).

Os arquivos digitais podem ser divididos em duas grandes categorias, as imagens compostas por *pixels* e as vetoriais. As imagens vetoriais, embora tenha a vantagem de poderem ser redimensionadas sem perder a sua qualidade, são pouco úteis à termografia justamente por não terem no *pixel* a sua unidade básica. Nas imagens compostas por *pixels*, cada um representa uma determinada temperatura por alguma tonalidade específica de cor. As imagens deste tipo podem apresentar-se em formatos sem compressão ou com compressão. A compressão dos formatos de imagem pode ser desenvolvida de duas formas, sem perda de dados ou com perda de dados. A compressão sem perda de dados é normalmente usada para formatos e utilizações onde a qualidade e a definição são importantes como na fotografia ou nos mapas. A compressão com perda de dados permite diminuir o tamanho dos ficheiros, retirando informação redundante. Até certo ponto, essa perda de dados não interfere na forma como se visualiza a imagem uma vez que o olho humano não detecta determinados pormenores, mas a informação de temperatura agregada ao *pixel* pode ser um fator nocivo no uso desse formato. Assim, são recomendados os formatos sem compressão, ou com compressão sem perda de dados (Carvalho & Rodrigues, 2013).

A maioria das câmeras termográficas existentes no mercado permitem ao operador seleccionar o formato dos arquivos digitais dos termogramas a produzir por meio das aplicações de configurações do equipamento, de modo a adequar o formato de saída à máxima qualidade e o maior número de recursos agregados em suas operações. A Tabela 10 relaciona alguns dos formatos comuns e emerge suas especificidades.

Tabela 10 – Formatos mais comuns de termogramas

Formato	F	V	R	S	C	N	Observação
.jpg (radiométrico)	x		S			x	Formato mais comum, contém informação radiométrica. São arquivos pequenos
.img	x		S				Plataforma MAC, pode ser lido no <i>Windows</i> alterando a extensão .img para .iso
.fff	x		S			x	Tipo <i>bitmap</i> . São arquivos grandes, que preservam todos os detalhes da cena
.is2	x		S			x	Formato padrão para arquivos de imagem da Fluke
.is3		x	S			x	Formato padrão para arquivos de vídeo da Fluke
.jpg (não radiométrico)	x		N			x	Formato comum, informação radiométrica não inserida. Arquivos pequenos
.bmp	x		N			x	Arquivo <i>bitmap</i> . São arquivos grandes, que preservam todos os detalhes da cena
.jpeg	x		N			x	Idem .jpg, ocorre que o <i>Windows</i> aceitava somente 3 letras pra extensão de arquivos
.tgw	x		S				Formato padrão para arquivos de imagem da Thermoteknix
.tmw	x		S				Formato padrão para arquivos de imagem da Thermoteknix
.tlw	x		S				Formato padrão para arquivos de imagem da Thermoteknix
.dib	x		N			x	Versão aprimorada do <i>bitmap</i> . Também são arquivos grandes
.png	x		N	x			Melhor que o formato .gif e também suporta animação e fundo transparente
.seq	x		S			x	Arquivos radiométricos ou não agrupados em sequência em um único arquivo
.gif	x		N	x			Suporta poucas cores, animação e fundo transparente. Bom para preto e branco
.mov		x	S				Formato padrão para arquivos de vídeo da Flir
.mpeg ou .mjpeg		x	S				Formato padrão para arquivos de vídeo da Flir
.mp4		x	S				Formato padrão para arquivos de vídeo da Flir
.tiff	x	x	S			x	Suporta fundo transparente. Arquivo preferido de designers gráficos

**Legenda:**

F – Arquivo de fotografia termográfica

V – Arquivo de vídeo termográfico

R – Radiométrico (S para sim e N para não)

S – Compressível sem perda de dados

C – Compressível com perda de dados

N – Não compressível

Fontes técnicas oficiais, citadas nas referências bibliográficas:

(Flir, 2013), (Flir, 2016), (Flir, 2017), (Flir, 2018), (Fluke, 2013), (DJI, 2016) e (Carvalho &amp; Rodrigues, 2013).

 Fontes eletrônicas, *sites* consultados em 01/08/2020:

<https://kinsta.com/pt/blog/jpg-vs-jpeg>
[www.file-extension.org/pt/extensions/fff](http://www.file-extension.org/pt/extensions/fff)
[www.infowester.com/imagens.php](http://www.infowester.com/imagens.php)
[www.reviversoft.com/pt/file-extensions/img](http://www.reviversoft.com/pt/file-extensions/img)
[www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/07/entenda-os-formatos-dos-arquivos-de-imagem.html](http://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/07/entenda-os-formatos-dos-arquivos-de-imagem.html)
[www.tecmundo.com.br/fotografia-e-design/23300-fotografia-quando-devo-usar-o-formato-raw-.htm](http://www.tecmundo.com.br/fotografia-e-design/23300-fotografia-quando-devo-usar-o-formato-raw-.htm)

### III.3 Fundamentos de captura e interpretação de imagens termográficas

Preliminarmente, é fundamental a escolha do equipamento adequado à medição. Há vários tipos de câmeras termográficas no mercado, para as mais variadas aplicações. Para o campo de estudo desta pesquisa, são elencados os seguintes aspectos a analisar para a seleção da câmera termográfica a utilizar, em complemento com o sugerido por (Toselli, 2020).

- ✓ Qual o tamanho do objeto-alvo que se deseja medir?
  - Calcular o IFOV (vide Apêndice A).
- ✓ Qual a distância adequada para medir o objeto-alvo?
  - Com base no MFOV (vide Apêndice B).
- ✓ Qual o ambiente em que a câmera irá trabalhar?
  - Verificar a faixa espectral adequada.
- ✓ Qual a restrição de acesso ao objeto-alvo?
  - Operação com câmera de mão ou câmera embarcada em drone.
- ✓ Qual *software* de melhoramento de imagens será utilizado?
  - Formatos de arquivo gerados pelo equipamento.
- ✓ Qual o tipo de leitura será necessário fazer, qualitativa ou quantitativa?
  - Câmera não radiométrica ou radiométrica.

Escolhido o equipamento, é conveniente fazer o reconhecimento prévio do local onde se encontra o objeto-alvo com um assistente qualificado, sobretudo em operações com drones. Convém ressaltar que no caso de operações EVLOS e BVLOS a presença de um assistente observador RPA é uma exigência legal, assim como a produção prévia de uma avaliação de risco operacional (Brasil, 2017).

Reconhecido o local e produzido o planejamento prévio, deve-se configurar o equipamento para as condições da medição desejada realizar. Este ajuste deve ser modificado cada vez que parâmetros como emissividade, distância do objeto, humidade do ar, temperatura ambiente ou temperatura atmosférica – para o caso de ambiente aberto, temperatura do objeto, a luz solar incidente e refletida. Deve-se evitar inspeções com velocidade do vento acima de 20 km/h, 6 m/s, e não realizar inspeções sob chuva, garoa, neblina ou na presença de fumaça ou qualquer outro material particulado excessivo. Para o caso de medição de máquinas e equipamentos elétricos, evitar inspecionar componentes que estejam operando com carga abaixo de 40% do valor histórico. Em inspeções termográficas diurnas, para não haver influências do reflexo e do carregamento solar, os melhores horários são nas primeiras horas da manhã ou ao entardecer (ABNT, 2013).

Também deve ser observada a diferença de temperatura entre a câmera e a atmosfera, sendo recomendado aguardar algum tempo ao passar de ambientes climatizados à baixa temperatura para ambientes mais quentes, a fim de evitar a presença de condensação em sensores e lentes. O uso de tripé é especialmente recomendado para câmeras com baixa frequência de operação. E, para estes casos, ao mudar a posição da câmera, deve-se aguardar alguns segundos para a estabilização da imagem na tela. O mesmo vale para as câmeras que possuem calibração automática. Mudar a posição da câmera pode ser muito útil ao termografar superfícies reflexivas, já que as reflexões se movem, mas as características térmicas do objeto se mantêm (Testo, 2009).

Antes de dar início à inspeção, é importante fazer uma observação ligeira do local, verificando a existência de pequenos obstáculos, chão em falso, depressões no piso, áreas energizadas, tampas mal colocadas, presença de óleo ou outras substâncias escorregadias, movimento de máquinas, equipamentos e pessoas, as condições de iluminação e à existência de botões de paragem de emergência, para que não sejam inadvertidamente acionados – tudo com vistas a evitar acidentes, pois, durante a inspeção é comum o termografista ficar concentrado na tela de sua câmera, portanto, absorto ao que se passa ao seu redor (Caramalho, 2012).

No caso do objeto ser prismático, em posição vertical, e havendo acesso, convém produzir leituras de 6 posições distintas, espaçadas de  $60^\circ$ , ou pelo menos a 3 posições distintas, espaçadas de  $120^\circ$ , como ilustrado na Figura 44 (Álvares, et al., 2008).



Figura 44 – Captura de imagens em várias posições.  
Fonte: o autor.

Já para o caso de o objeto ser plano, é importante dispensar atenção ao ângulo formado entre o objeto e a câmera, uma vez que nem sempre é possível posicionar a câmera termográfica perpendicularmente ao objeto, situação ideal de medição. Essa preocupação deve-se ao fato de que a quantidade de *pixels* capturados diminui com o aumento desse ângulo de observação (Aidair, et al., 2018).

Por conseguinte, essas superfícies adquirem uma emissividade aparente, que varia de ponto para ponto, apesar de não haver alteração no material. A variação da emissividade dos não metais com o ângulo de observação é praticamente nula para ângulos entre  $0^\circ$  e  $60^\circ$  em relação à perpendicular. Para ângulos superiores a  $70^\circ$  o valor da emissividade aparente decai rapidamente até zero. Nos metais, os valores da emissividade aparente são baixos e sem grandes variações para ângulos entre 0 e  $40^\circ$ , aumentando acentuadamente para ângulos maiores que  $40^\circ$  (Barreira, 2004). A Figura 45 ilustra essa variação da emissividade aparente.

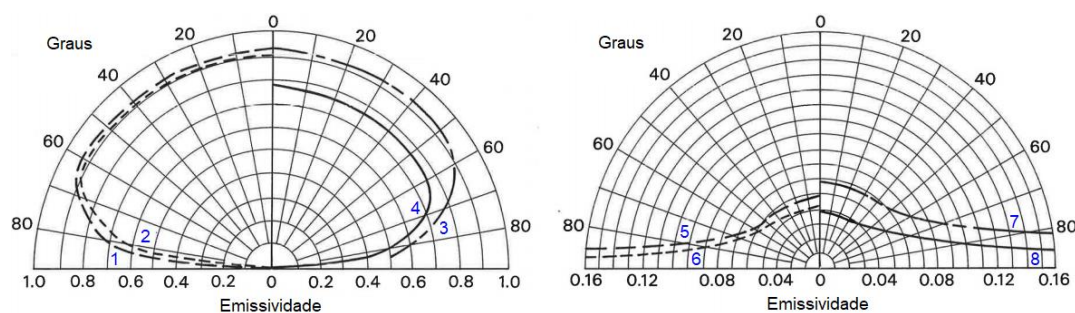
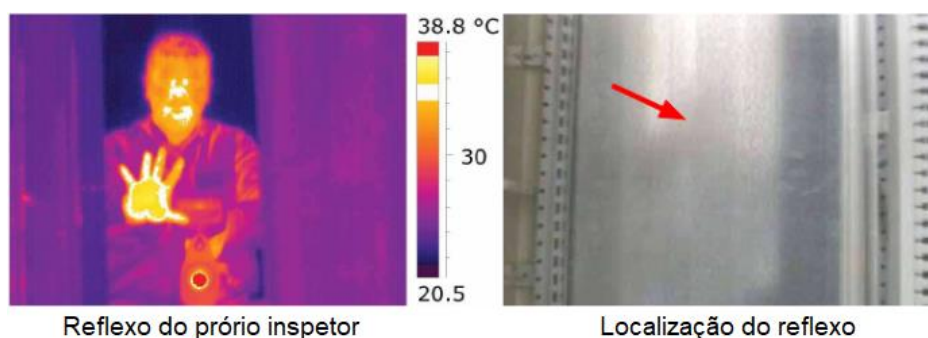


Figura 45 – Emissividade aparente em metais e não metais.  
 (1) madeira. (2) papel. (3) vidro. (4) óxido de ferro.  
 (5) níquel polido. (6) níquel manchado. (7) cromo. (8) alumínio.  
 Fonte: adaptado de (Hart, 1992).

No caso de inspeções em superfícies polidas, como azulejos brilhosos, cerâmicas vitrificadas e painéis solares, a consideração de posicionamento da câmera é antagônica, ou seja, a pior posição é a perpendicular ao objeto, dado a alta refletividade. Assim, objetos circundantes, com diferentes temperaturas, podem ser vistos claramente na imagem térmica, espelhadas. Não obstante, permanece o fenômeno físico da maior emissividade aparente com o posicionamento perpendicular da câmera, e de sua diminuição com o aumento do ângulo relativo entre a câmera e o objeto. De tal sorte, para esses casos, sugere-se o posicionamento entre  $5^\circ$  e  $60^\circ$  (MRA, 2011). A Figura 46 ilustra o quanto a superfície reflexiva de um quadro elétrico interfere na análise termográfica, com destaque para o ponto mais quente da imagem – a lente da câmera termográfica.



Reflexo do próprio inspetor  
 Localização do reflexo  
 Figura 46 – Interferência de superfícies reflexivas.  
 Fonte: (Caramalho, 2012).

Ainda, é importante estar atento à gama de temperaturas que permeiam a cena, posto que a câmera termográfica apresenta o termograma sob a forma de um gradiente de cores com base na leitura que faz da maior e da menor temperatura captada em todo o seu campo de visão e conforme faixa de máxima e mínima temperaturas selecionada nas configurações do equipamento. De tal sorte, a presença de objetos mais quentes ou mais frios que o objeto, muda completamente os tons dos *pixels* produzidos na leitura qualitativa, sem, contudo, que haja qualquer alteração na leitura quantitativa, ou seja, no resultado da medição radiométrica das temperaturas. A Figura 47 ilustra essa afirmação, destaque para a alteração nas tonalidades dos *pixels* do objeto-alvo em (d), (e) e (f).

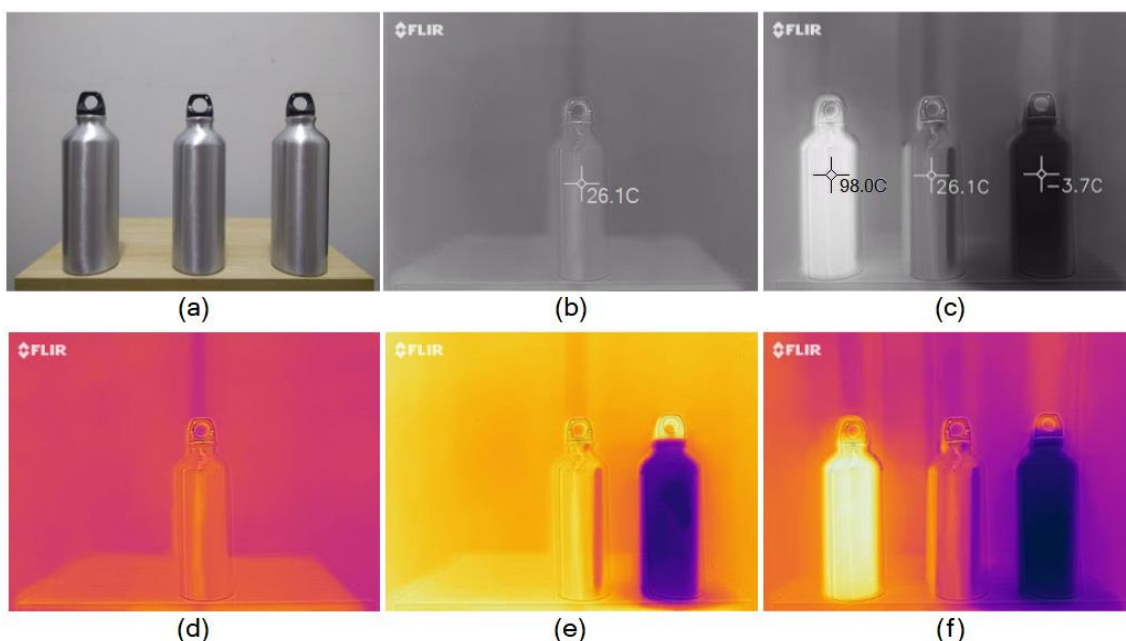


Figura 47 – Diferenças na leitura qualitativa com a alteração da cena.  
 (a) objetos. (b) imagem quantitativa do objeto-alvo com legenda de temperatura.  
 (c) imagem quantitativa de todos os objetos com legenda de temperatura.  
 (d) imagem qualitativa do objeto-alvo na cena primária.  
 (e) imagem qualitativa do objeto-alvo após introdução do objeto secundário.  
 (f) imagem qualitativa do objeto-alvo após introdução de dois objetos secundários.

Fonte: o autor.

Por vezes, pode-se obter leituras pouco inteligíveis à cerca de uma cena. Para estes casos, a simples mudança da paleta pode ser suficiente para a obtenção de uma imagem que ofereça maior grau de compreensão do fenômeno térmico estudado. Paletas são as diferentes opções da atribuição computacional de tonalidades de cores à amplitude térmica capturadas no campo de visão do sensor ou previamente selecionada pelo operador nas configurações do equipamento. A seleção das paletas, algumas vezes, pode corresponder a preferências pessoais; em outras, a imagem pode ser otimizada com a seleção de determinada paleta, aumentando o contraste ou exibindo detalhes com maior nitidez (Fluke, 2007).

Em geral, paletas monocromáticas, em tons de cinza, possuem a vantagem de enfatizar a geometria do objeto-alvo, ao passo que as paletas coloridas enfatizam o aspecto qualitativo do termograma. Outro fator importante na seleção de paletas é que nossa capacidade de distinguir e identificar diferentes cores é influenciada pelo tamanho das áreas nas quais elas estão aplicadas, mas essa distinção fica progressivamente mais difícil quando o tamanho das áreas diminui ou quando os matizes utilizados são semelhantes. Por esse motivo há uma relação entre o gradiente térmico da imagem e o gradiente de cores da paleta mais adequada em sua representação (Veratti, 2015). O Anexo B elenca algumas paletas utilizadas pela Flir. A Figura 48 ilustra a mesma cena com uso de paletas diferentes, com destaque para o fato de que no termograma apresentado com a paleta monocromática, dificilmente o operador perceberia a concentração de calor presente na parede, ao lado da instalação, vista claramente no canto inferior direito do termograma apresentado com a seleção da paleta colorida.

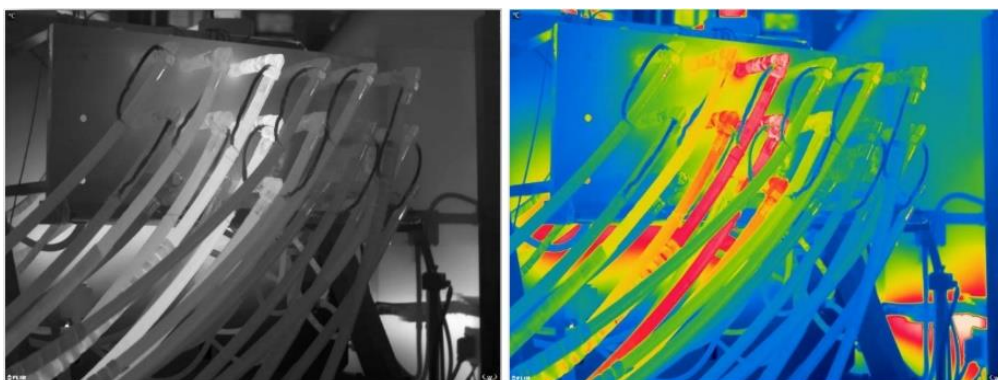


Figura 48 – Paleta monocromática e colorida.

Fonte: adaptado de (Veratti, 2015).

Mas, se mesmo a mudança nas paletas não produzir leituras satisfatórias, algumas técnicas podem melhorar o gradiente térmico diferencial entre as regiões com defeitos e sem defeitos. Uma delas é promover o aquecimento da região de interesse. Esse aquecimento pode ser natural ou artificial.

O aquecimento natural se refere ao aquecimento normal, dado pelo aumento da temperatura ambiente, decorrente da variação térmica promovida pelos movimentos do sol e da terra ou por exposição direta à irradiação solar. Doravante chamaremos de condição de baixo gradiente térmico a situação em que os corpos se aquecem e se resfriam de forma satisfatória para a produção de termogramas inteligíveis tão somente pela variação térmica ambiente; e de condição de aquecimento natural para a situação em que os corpos se aquecem por exposição ao sol. Para ambos os casos, temos a termografia passiva (Cortizo, 2007).

Nos sistemas passivos, nenhuma estimulação artificial é utilizada, devendo existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido, que frequentemente está sob temperatura mais elevada de dia e mais baixa à noite. A análise qualitativa é feita por comparação com uma situação padrão, ficando os resultados sujeitos à experiência do avaliador (Pedra, 2011).

Por conseguinte, a condição de aquecimento artificial é aquela onde o corpo é aquecido por uma fonte, como lâmpadas, jatos de ar quente, pulsos ultrassônicos, radiação infravermelha, micro-ondas e laser (Oliveira, 2013). Os métodos ativos têm a vantagem de possibilitarem um maior controle do calor envolvido sobre diferentes aspectos, como duração, intensidade, intermitência, abrangência direção e sentido, além de permitir com melhor aproveitamento de resultados a obtenção de termogramas tanto na fase de aquecimento como na fase de resfriamento. Ressalta-se que a produção de termogramas na fase de resfriamento não deve ser desprezada pelo termografista, pois, por vezes, pode produzir termogramas até melhores, apesar da exigência de um maior tempo de trabalho.

Dentre as diversas técnicas de termografia ativa, temos a termografia pulsada, que se subdivide em pulsada de pulso curto e longo. A termografia pulsada de pulso curto caracteriza-se pela modificação rápida da temperatura do corpo por um pulso térmico forte e instantâneo, permitindo a avaliação tanto dos padrões de aquecimento quanto de resfriamento. Já na termografia de pulso longo, temos um regime de aquecimento de menor intensidade e por tempo prolongado, permitindo um tempo maior na observação das mudanças dos padrões térmicos (Bauer & Pavón, 2014);

Também há a termografia modulada, ou *lock-in*. Nesta modalidade, utiliza-se um aquecimento modulado que pode ser obtido através de lâmpadas halógenas acopladas a um amplificador e um gerador de funções para obter-se uma onda senoidal. Após penetrar no material, a onda térmica pode sofrer reflexões ao encontrar discontinuidades, uma vez que as condições para a propagação mudam. As ondas refletidas, por sua vez, interferem com as ondas da superfície, resultando em um campo de temperatura oscilante em regime estacionário, que é remotamente monitorado pela câmera por conta de sua emissão infravermelha. A partir da onda térmica reconstruída, são geradas imagens de amplitude e fase para cada frequência modulada, utilizadas para obter informações sobre o material abaixo da sua superfície. Um ponto importante a ser ressaltado é que a profundidade que a onda térmica consegue atingir é inversamente proporcional à frequência modulada, de modo que menores frequências possibilitam visualizações de defeitos mais profundos (Silva, 2014).

Há, ainda, a termografia vibrada, que consiste em uma técnica onde, sob o efeito de vibrações mecânicas induzidas externamente à estrutura, ocorre a conversão direta de energia mecânica em energia térmica e o calor é liberado por fricção, precisamente em locais onde defeitos, como rachaduras e delaminações, são localizados. Ao alterar a frequência de excitação mecânica, gradientes térmicos locais aparecem ou desaparecem na frequência de ressonância específica, sendo necessário testar as frequências de excitação mais adequadas para cada material (Maldague, 2000).

Um aperfeiçoamento da termografia vibrada para uso na investigação de patologias em peças de madeira é a *Ultrasound-Excited Thermography*, ou UET, empregada por meio de um agitador ultrassônico, um sonotrodo. O sonotrodo é colocado em contato físico com uma amostra de madeira, a fim de excitar o objeto com uma onda de ultrassom. O calor é gerado localmente nas fendas e/ou outros descolamentos por atrito ultrassônico, quando uma conversão direta de onda mecânica em energia térmica ocorre. A transferência de calor iniciada resulta em emissão de calor a partir da superfície do objeto. Esse aumento local da temperatura é atingido dentro de milissegundos, e é então termografado (Hielscher, 2020).

Outras técnicas de aquecimento também são válidas, como o uso de sopradores térmicos e estufas elétricas. As estufas podem permitir a promoção de um aquecimento uniforme dos corpos, quando estes são submetidos a longos períodos de permanência no espaço confinado de aquecimento que proporcionam, vinte e quatro horas, por exemplo. Já os sopradores térmicos promovem um aquecimento mais localizado, mas que pode ser distribuído por meio de seu deslocamento manual diante do objeto. Para ambos os casos, é na fase de resfriamento que se pode obter os melhores termogramas (Caldeira, 2016).

Por fim, há duas abordagens de emprego da termografia ativa e passiva, o ciclo direto e o ciclo reverso. No ciclo direto, o aquecimento do corpo acontece pela superfície frontal, coincidindo a superfície aquecida com a termografada. Os termogramas podem ser produzidos tanto na fase de aquecimento como na de resfriamento. Neste ciclo, durante o aquecimento, o calor penetra pela superfície estudada, o que simula o momento em que a fachada recebe radiação solar e o sentido do fluxo é de fora para dentro da edificação. O ciclo reverso consiste no aquecimento das placas pela superfície traseira, ou seja, a superfície aquecida não coincide com a termografada. Neste ciclo, o calor penetra pela superfície traseira, e sai pela superfície estudada, o que simula o momento em que o calor sai da fachada, ou seja, quando o fluxo de calor vai de dentro para fora da edificação (Pávon De La Fé, 2017).

Para todos os casos, o aquecimento demasiado pode prejudicar as leituras. E, por vezes, pode não tempo para o adequado acompanhamento da fase de resfriamento. Nessas situações, uma boa técnica de termografia ativa é a promoção do arrefecimento rápido e artificial do corpo, por exemplo, com a dispersão de água na superfície. A dispersão de água superfície também é uma ótima técnica a ser empregada no levantamento de regiões de infiltração em fachadas de edifícios quando sob condições climáticas de muito baixa humidade relativa do ar ou após grandes períodos de estiagem (Nascimento, 2014).

Assim, a termografia pode ser esquematizada como ilustrado na Figura 49.

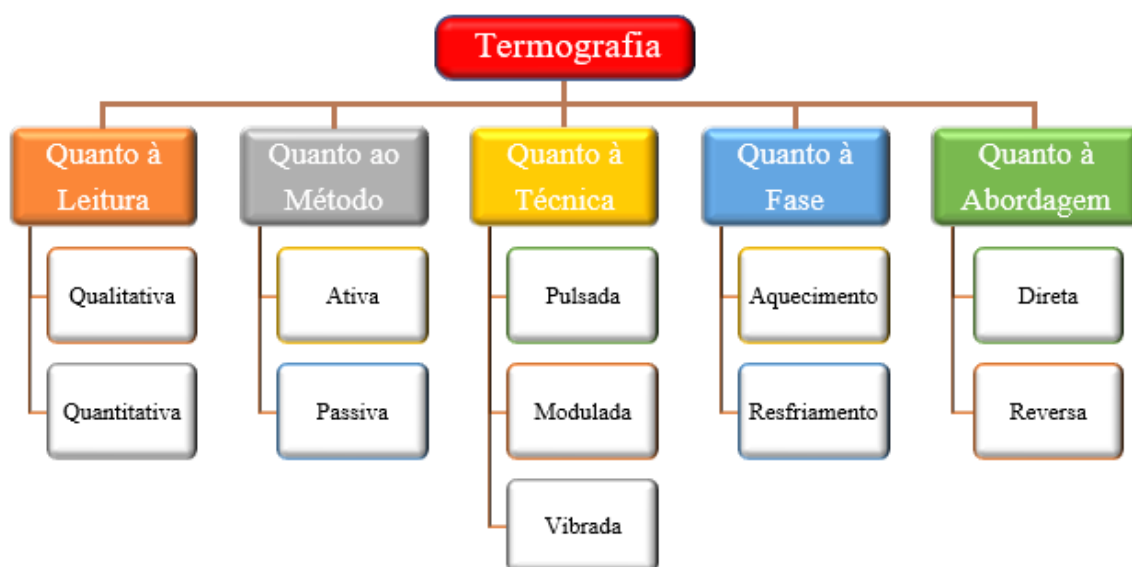


Figura 49 – Classificação da termografia.  
Fonte: o autor.

Após produzidos os termogramas, há a possibilidade de utilizar softwares de melhoramento de imagens para aumentar o contraste, a segmentação, enfatizar ou realçar algum aspecto de mais valia presente no termograma. A Figura 50 mostra o termograma original e, à direita, sua versão melhorada. Na imagem original é difícil fazer uma análise correta, mas alterando o nível da escala de temperatura e a amplitude de temperatura considerada no campo de visão para níveis de máximo e mínimo de temperatura próximos do objeto, alcança-se um resultado inteligível.

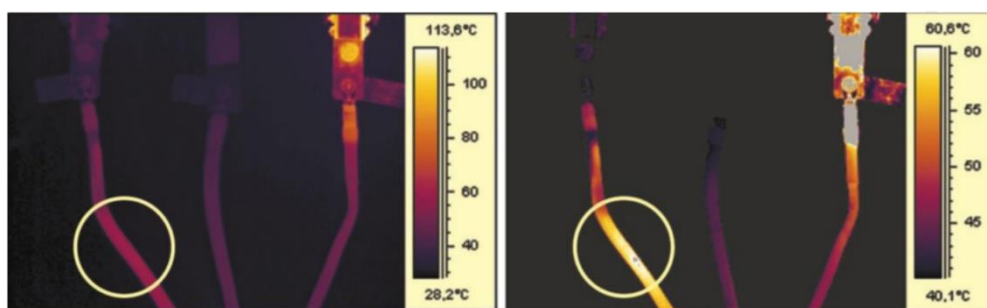


Figura 50 – Imagem melhorada por meio do *software* FlirTools.  
Fonte: (Flir, 2013).

Por fim, o relatório ou laudo deve conter o equipamento e as condições ambientais. A ABNT NBR 15572: Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos, lista os registros mínimos que deve conter o relatório de inspeção feito por termografista. Esta recomendação, vê-se no Anexo C. Ainda não há no Brasil norma semelhante dedicada para a investigação de patologias nas edificações.

#### **III.4 A formação do termografista**

Dado a complexidade técnica que permeia a termografia, os chamados ensaios não destrutivos e a toda a gama de competências e habilidades desejáveis de um prestador de serviços nesta área, há várias normatizações que designam a formação e a certificação de profissionais termografistas. Dentre as principais, pode-se citar:

- ✓ ASNT SNT-TC-1A/2020;
- ✓ ISO 18436-7/2014;
- ✓ ISO 6781-3/2015;
- ✓ ISO 9712/2012; e
- ✓ ISO/TS 11774/2011.

Dentre as citadas, a SNT-TC-1A/2020 destaca-se por fornecer diretrizes para os próprios empregadores estabelecerem programas de certificação internos para a qualificação e certificação do pessoal de END, incluindo recomendações educacionais, de experiência e de treinamento para cada método de END. Porém, há entidades que questionam que profissionais formados por esta normatização atuem fora o âmbito das empresas nas quais foram qualificados. Já a ISO 9712/2012 especifica os requisitos necessários para a qualificação e certificação de pessoas para realizar END em ambiente industrial. E a ISO 6781-3/2015 versa sobre a qualificação de operadores de equipamentos, analistas de dados e redatores de relatórios de desempenho de edifícios, detecção de irregularidades de calor, ar e humidade por métodos que empregam tecnologia de infravermelho (ABNT, s.d.).

Segundo a ISO 6781-3/2015, norma mais adequada ao escopo desta pesquisa, a formação do termografista se dá em três níveis de conhecimento, ou classes, sendo que o pessoal classificado como Classe II precisa ter todo o conhecimento e habilidades esperadas do pessoal classificados como Classe I, enquanto o pessoal classificado como Classe III precisa ter todo o conhecimento e habilidades esperado de pessoal classificado como Classe II. O Anexo D lista os conhecimentos e habilidades esperados por classe.

## Capítulo IV

# METODOLOGIA DOS ENSAIOS

### IV.1 Introdução

A fim de cumprir o objetivo de verificar experimentalmente a eficácia de câmeras termográficas no diagnóstico de algumas patologias comuns em edifícios, foram realizados diversos ensaios em ambiente controlado, a partir de muretas de ensaio. Foram introduzidas, propositalmente, patologias como a existência de deslocamentos de revestimentos de argamassa e peças cerâmicas, tanto dentro como fora das edificações, e a origem de infiltrações de água. Posteriormente, procedeu-se à verificação das capacidades e limitações de duas câmeras termográficas, sendo uma de baixa e outra de alta resolução, em identificar as patologias, para no final comparar as diferenças, vantagens e limitações desses dois equipamentos a partir dos resultados alcançados e, assim, validar ou não o conhecimento emergido no referencial teórico.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Modelos Experimentais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - LEME/UFMS. As argamassas utilizadas foram preparadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/UFMS. A utilização desses espaços foi possível graças ao protocolo de intenções celebrado com a Universidade Fernando Pessoa, com o objetivo de promover a cooperação e o intercâmbio acadêmico, científico, técnico, cultural e interuniversitário, publicado no Diário Oficial da União, Seção 3, Nr 56, de 22 de março de 2019.

As câmeras termográficas utilizadas, doravante chamadas de CTBRA e CTARA, têm as características técnicas expressas na Tabela 11, com a informação do fabricante suprimida por razões comerciais.

Tabela 11 – Características técnicas das câmeras termográficas utilizadas

Câmera	CTBRA	CTARA
Característica	Câmera termográfica de baixa resolução e baixo custo de aquisição	Câmera termográfica de alta resolução e alto custo de aquisição
Custo comparativo de aquisição	1x	9x
Resolução	160 x 120	640 x 512
Sensibilidade térmica	70 mK	50 mK
FOV (HFOV x VFOV)	55° x 43°	45° x 37°
Banda espectral	8 a 14 µm (LWIR)	7,5 a 13,5 µm (LWIR)
Resistência de queda	1,8 m	Não informado

Fonte: dados do fabricante.

Para as muretas de ensaio foram confeccionadas três estruturas, de dimensões internas 140 x 122 x 25 cm<sup>3</sup>, em chapas metálicas de 2,65 e 3 mm de espessura – uma cortesia da Sulmetal, que foi doada à UFMS ao término da pesquisa. Foram acoplados às mesmas rodízios metálicos de dimensões 6” x 2” com cobertura de poliuretano e freios mecânicos, cada um com capacidade para 500 kgf. O arranjo deu mobilidade às estruturas, permitindo a livre movimentação de cada mureta de ensaio no interior do laboratório, o que possibilitou a realização de ensaios sob diferentes condições ambientais, como a exposição ou não ao sol, ao vento e à chuva. A Figura 51 retrata as três estruturas de ensaio no dia da entrega no LEME/UFMS.



Figura 51 – Estruturas metálicas de ensaio.

Fonte: o autor.

As muretas de ensaio foram edificadas utilizando dois tipos de tijolos cerâmicos, de vedação e estrutural, cortesia da Cerâmica Volpiso; e um tipo de tijolo de betão estrutural, cortesia da Tecol Engenharia. Estes são os tipos mais comuns empregados na construção civil. As argamassas de assentamento foram produzidas no LMCC/UFMS, utilizando areia fina lavada e cimento CII-E32. A Figura 52 ilustra os tijolos utilizados.

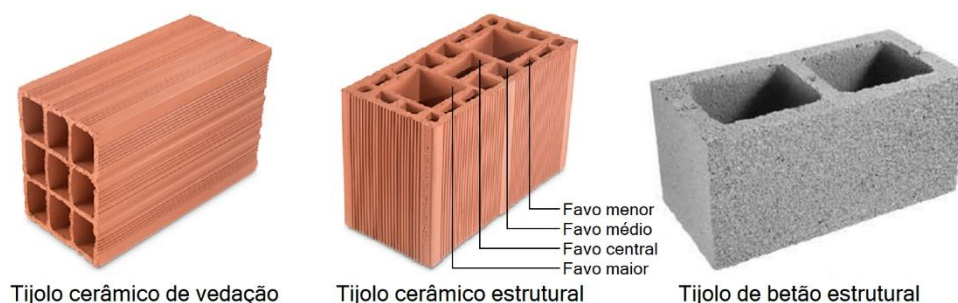


Figura 52 – Tijolos utilizados nos ensaios.

Fonte: adaptado de [www.volpiso.com.br](http://www.volpiso.com.br)

Para revestir as muretas de ensaio foram escolhidas peças cerâmicas de acabamento fosco e brilhoso; e do tipo pastilha. Estas são consideradas mais comuns em revestimentos de fachadas de edifícios. A Tabela 12 expressa as características técnicas destes materiais, com a informação do fabricante suprimida por razões comerciais.

Tabela 12 – Características dos revestimentos cerâmicos utilizados  
- Classificação segundo a ISO 13.006:1998(E), (ISO, 1998) -

Cerâmica	Acabamento fosco	Acabamento brilhoso	Pastilha brilhosa
Dimensões	32 x 45,5 cm	32,4 x 56,5 cm	4,8 x 4,8 cm
Espessura	6,6 mm	7 mm	5,7 mm
Grupo de absorção	B II <sub>b</sub>	B II <sub>b</sub>	B I <sub>a</sub>
Natureza da superfície	UGL	GL	GL
Classe tonal	V1	V1	V2
Cor	Branco	Branco	Azul
Qualidade	A	A	A
PEI	1	2	3

Fonte: dados de embalagem.

Para simular as patologias de capilaridade de água proveniente do solo, por má impermeabilização das fundações e do piso, foi engendrada uma calha de acumulação de água na base das muretas de ensaio, com capacidade para armazenar uma lâmina de água de aproximadamente 1 cm de altura. A calha foi dotada de pequenos canalículos, que permitem a comunicação necessária para a acumulação em ambos os lados da mureta, em mesmo nível piezométrico, a partir de um único ponto de abastecimento, multiplicando as possibilidades de ensaios. As vedações foram feitas com pasta de silicone. A Figura 53 retrata a calha de acumulação de água numa das muretas de ensaio.



Figura 53 – Calha de acumulação de água.  
Fonte: o autor.

O abastecimento é proveniente de uma malha hidráulica, comandada por pequenos registros, capazes de permitir o controle da vazão da água dispersada. A mesma rede também serviu para simular infiltrações e vazamentos de água em diferentes posições previamente definidas para cada mureta de ensaio. Para ensaios de infiltração, foi assumido pequena vazão; para ensaios de vazamento, foi assumido grande vazão.

A aferição da vazão era possível por meio de um ramal removível de coleta, que permitia a medição artesanal, com uso de uma proveta graduada e cronômetro. Para cada aferição foi registrada uma série histórica e tomada a média. A Figura 54 ilustra os materiais utilizados para engendrar a malha hidráulica das muretas de ensaio e a Figura 55 retrata uma parte da malha instalada numa das muretas.



Para aquecer as muretas de ensaio, a fim de produzir um maior gradiente térmico entre as partes com defeito e sem defeito, foram utilizados a exposição solar controlada e o aquecimento por lâmpadas de 3000 W. A Figura 56 ilustra o aquecedor utilizado.



Para evitar a interferência do calor absorvido pela estrutura de suporte das muretas, os quadros metálicos foram revestidos internamente por placas de isopor de 1,5 cm de espessura. Adicionalmente, após a construção das muretas, foram acrescentadas molduras de isopor de 4 cm de espessura, tal como mostra a Figura 57.



Figura 57 – Proteções térmicas das muretas de ensaio.  
Fonte: o autor.

Além das proteções térmicas de revestimento dos quadros metálicos, para minimizar a influência térmica da envolvente, sobretudo do calor emanado das paredes do laboratório, foi engendrado um cocar de isopor, com 5 cm de espessura, instalado antes de cada ensaio termográfico. A Figura 58 retrata uma das muretas de ensaio pronta para ser termografada.

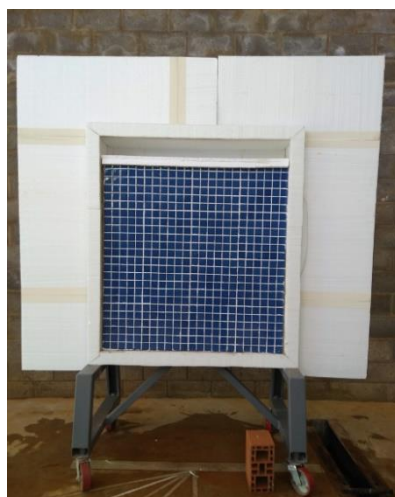


Figura 58 – Cocar de proteção térmica do entorno.  
Fonte: o autor.

A última ação, de preparação no laboratório para a realização dos ensaios, foi marcar o piso com as posições de repouso das muretas de ensaio e do tripé utilizado para dar melhor estabilidade às câmeras termográficas CTBRA e CTARA. Foram definidas as posições: perpendicular ( $0^\circ$ ),  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $75^\circ$ . A Figura 59 ilustra essas marcações.

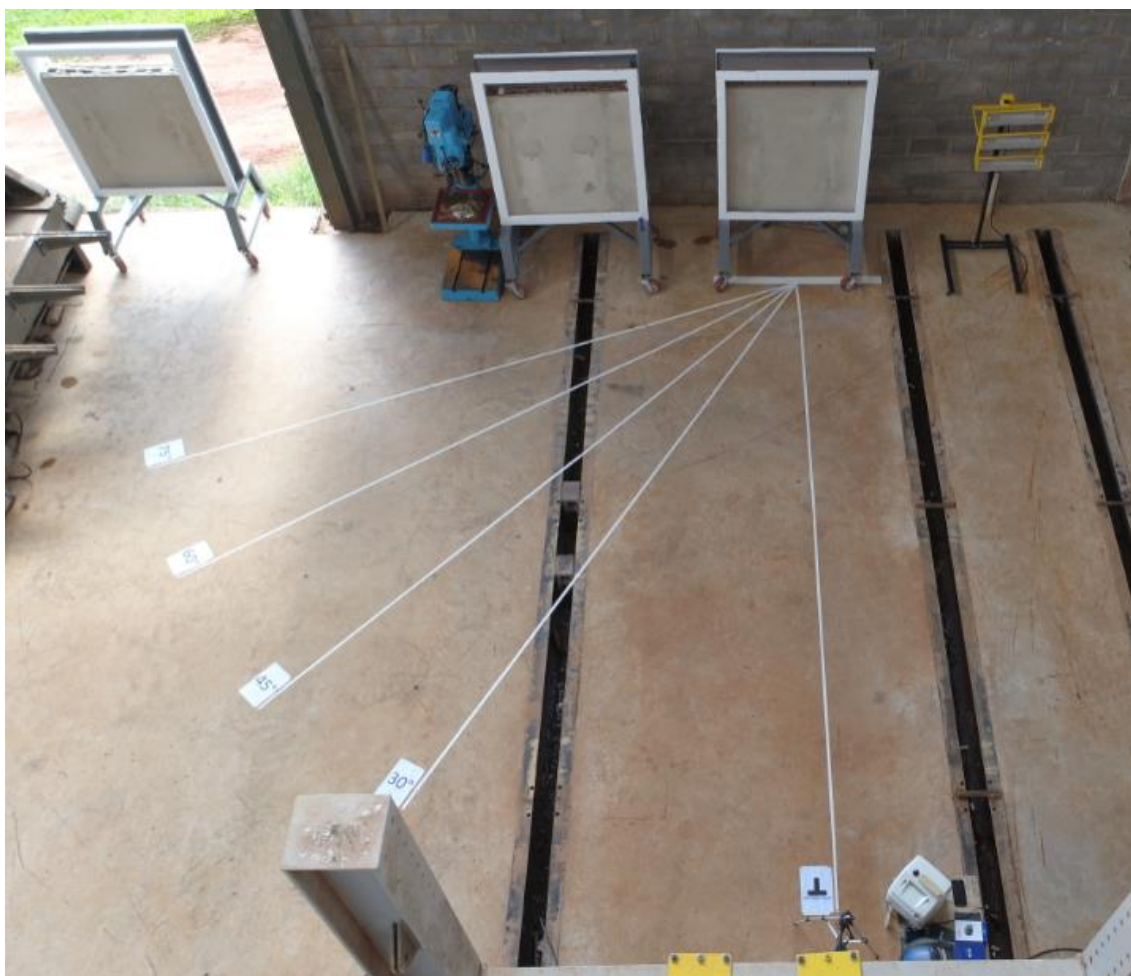


Figura 59 – Marcações de posições de captura de termogramas.  
Fonte: o autor.

As patologias simuladas foram: presença de fendas entre os blocos de paredes, deslocamento de reboco e de revestimento cerâmico, infiltrações de água por excesso de humidade ou via fissuras, capilaridade de água em paredes proveniente das fundações e vazamentos de água de tubos hidráulicos.

As fendas entre os blocos de paredes são ocasionadas pelo não preenchimento do espaço vertical, normalizado em 10 mm, entre os blocos de alvenaria ou pelo seu preenchimento parcial. Faz sentido avaliar a existência do preenchimento das juntas verticais com argamassa pois, embora sua ausência não cause prejuízos quanto a resistência aos esforços de compressão vertical, à compressão diagonal sua influência é muito mais notória (Gomes, 2008). Por outro lado, há métodos construtivos que suprimem propositalmente as juntas verticais, assentando os blocos de forma justaposta, para a racionalização do emprego de argamassas. A utilização dessas “juntas secas” também não compromete o desempenho das alvenarias de vedação frente aos esforços de compressão, mas diminui a capacidade de acomodação de deformações (Silva, 2003).

Além dos aspectos estruturais, a existência de fendas também pode favorecer o surgimento de pontes térmicas, condensação e acúmulo de humidade. Neste trabalho foram deixadas propositalmente fendas verticais e horizontais de 1 a 3 cm nas três muretas de ensaio. Para tal, foram utilizadas fitas adesivas flexíveis, tipo esparadrapo, para proteção das fendas durante a atividade de chapisco, sendo as fitas removidas durante a secagem dessa argamassa, quando ainda estava no estado fluído. Durante a atividade de reboco, procedeu-se com cuidado, a fim de preservá-las. A imagem (a) da Figura 60 retrata as fendas simuladas; e a imagem (b) documenta o uso de fita flexível para proteger as fendas e as áreas designadas para a simulação de deslocamento do reboco.

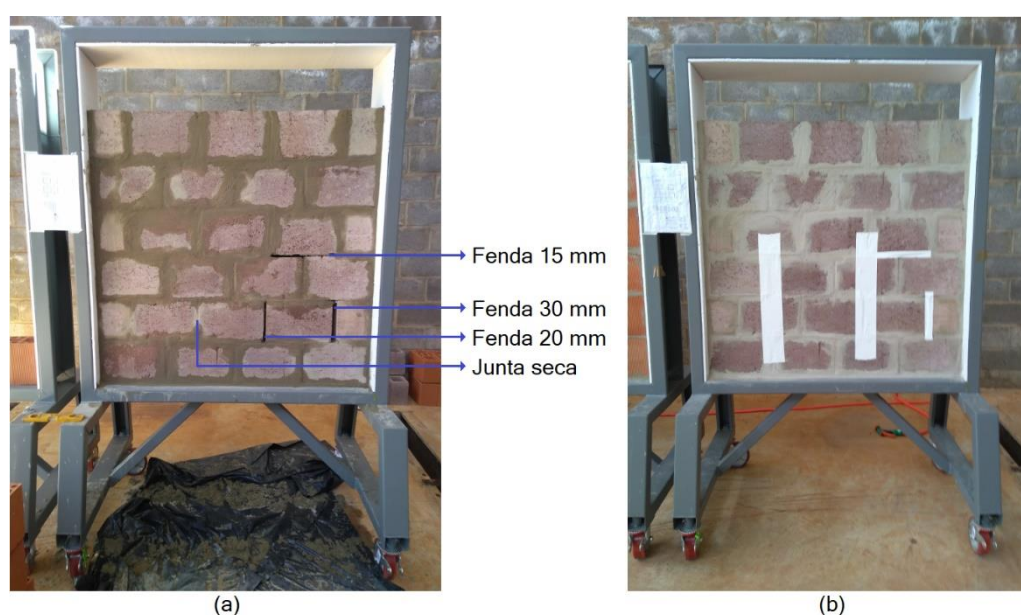


Figura 60 – Fendas vertical e horizontal.

(a) fendas verticais, horizontal e junta seca. (b) proteção das fendas com fita adesiva.

Fonte: o autor.

Para fins de registro, observe-se que o esparadrapo médico, composto de tecido 100% algodão com tratamento acrílico adesivo à base de Óxido de Zinco, borracha natural e resinas, foi a única fita adesiva em meio as várias testadas no laboratório que aderiu satisfatoriamente, tanto ao tijolo cerâmico como aos blocos de betão e à argamassa de chapisco, mesmo com a presença de impurezas superficiais. E que manteve sua aderência mesmo com o lançamento de água em abundância, para umedecer os blocos antes da execução do chapisco.

Após concluídas as alvenarias, foi respeitado o prazo de 14 dias de idade para alvenarias não armadas estruturais, alvenarias sem função estrutural de tijolos, blocos cerâmicos, blocos de betão e betão celular antes de proceder ao chapisco, em atenção ao recomendado pela NBR 7200 (ABNT, 1998).

Para chapisco foi utilizada argamassa com traço forte (1:3), sem uso de aditivos e com consistência fluída, ao ponto de melhor trabalhabilidade. A aplicação foi por lançamento manual, pelo método artesanal tradicional. A imagem da Figura 61(a) registra uma das muretas de ensaio após a aplicação do chapisco; a Figura 61(b) registra a mesma mureta, após retiradas as fitas adesivas.

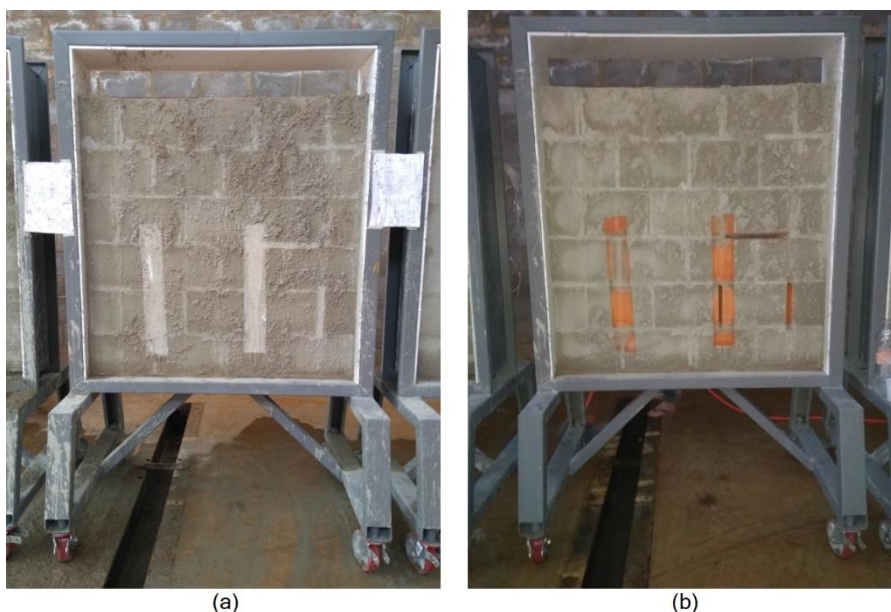


Figura 61 – Apresentação após conclusão do chapisco e retirada das fitas adesivas.  
(a) mureta de ensaio com reboco concluído. (b) mureta de ensaio sem as fitas adesivas de proteção.  
Fonte: o autor.

Após concluído o chapisco, foi respeitado o prazo de três dias de idade para aplicação do reboco, de acordo com o recomendado pela NBR 7200 (ABNT, 1998). O reboco foi executado em camada única sobre o chapisco. A argamassa foi preparada com o mesmo cimento CII-E32 do chapisco, cal hidratada CH-III e areia fina lavada, no traço 1:1:6, sem uso de aditivos e com consistência fluída, ao ponto de melhor trabalhabilidade. A aplicação foi por lançamento manual, pelo método artesanal tradicional.

A face anterior das muretas foi taliscada para a espessura de 3 cm, com o objetivo de simular o revestimento externo de paredes. A face posterior foi de 1,5 cm para simular o revestimento interno de paredes.

Para simular o deslocamento do reboco, o lançamento da argamassa se deu sobre uma antepara flexível, montada com lâmina de EVA de 2 mm de espessura, recoberta com chapa de raios-x lubrificada com óleo desmoldante. Após aguardar certo tempo de cura, as anteparas foram retiradas por deslizamento, restando o vazio. As imagens da Figura 62 ilustram o processo executivo de execução do reboco com simulação de deslocamento em duas regiões, previamente definidas.



Figura 62 – Simulação de deslocamento de reboco.

(a) antepara. (b) lançamento do reboco sobre a antepara. (c) argamassa lançada, aguardando acabamento.

(d) retirada da antepara para o acabamento final. (e) muretas de ensaio com reboco pronto e acabado.

Fonte: o autor.

Com a conclusão do reboco nas duas faces das muretas de ensaio, foi respeitado o prazo de 28 dias de idade, isto é, maior interstício de tempo recomendado pela NBR 7200 (ABNT, 1998), antes do início dos primeiros ensaios termográficos, destinados a avaliar superfícies internas e externas de edificações tendo argamassa como único revestimento. Pela dificuldade de remoção, optou-se por não pintar as muretas.

Somente após concluídos os primeiros ensaios termográficos das muretas de ensaio, em ambas as faces, foi procedido o revestimento com azulejos. Adotou-se a paginação com junta a prumo, como descrito na NBR 8214:1983 (ABNT, 1983), e seguiu-se o método de dupla colagem, em atenção às normas de assentamento NBR 13753:1996 (ABNT, 1996) e 13754:1996 (ABNT, 1996), que estipulam que placas cerâmicas com área igual ou superior a 900 cm<sup>2</sup> devem ser assentadas dessa forma, utilizando-se de desempenadeira dentada de 8 x 8 x 8 mm para distribuir a argamassa tanto nas peças cerâmicas quanto na superfície das muretas de ensaio. Para simular o deslocamento de azulejos optou-se tão somente por suprimir uma fração da cobertura de argamassa nas peças, raspando com a espátula. O mesmo procedimento foi repetido na área correspondente na face da mureta de ensaio.

Foram produzidas áreas de deslocamento de diferentes áreas, algumas menores que o tamanho das peças, afetando apenas uma região no centro do azulejo, e outras maiores que o tamanho das peças, para contemplar a situação de deslocamento com afetação da região de encontro de dois azulejos, ou seja, a área de rejunte. A Figura 63 ilustra as duas situações.



Figura 63 – Simulação de deslocamento de revestimento cerâmico.  
(a) raspagem para afetação no centro do azulejo. (b) indicação da afetação na região de rejunte.

Fonte: o autor.

Para diversificar os ensaios termográficos, duas muretas receberam o revestimento cerâmico na face com reboco de 1,5 cm de espessura, que simula paredes internas de edificações. Apenas uma mureta recebeu revestimento cerâmico na face com reboco de 3 cm de espessura, que simula paredes externas. Esta configuração permitiu verificar alguma possível interferência de deslocamento de reboco nos resultados.

Juntamente com o assentamento dos azulejos, uma nova malha hidráulica foi instalada para a realização de simulações de infiltração e vazamento de água, disposta de tal forma a permitir a vazão de água tanto nas regiões de deslocamento como nas áreas de perfeita aderência entre o azulejo e o substrato. Para tal, foram feitos sulcos no reboco antes do assentamento das peças, por raspagem, com uma chave de fenda, para acomodar as mangueiras sob as peças cerâmicas.

Com a conclusão do revestimento cerâmico das muretas de ensaio, foi respeitado o prazo de três dias de idade para o rejuntamento das peças, em atenção às normas de assentamento NBR 13753:1996 (ABNT, 1996) e 13754:1996 (ABNT, 1996). Adicionalmente, respeitou-se o prazo de 28 dias de idade, maior interstício de tempo recomendado pela NBR 7200 (ABNT, 1998), antes do início da segunda fase de ensaios, com superfícies azulejadas. A Figura 64 ilustra o esquema técnico das muretas de ensaio e a Figura 65 as retrata após o término do revestimento cerâmico e rejuntamento.

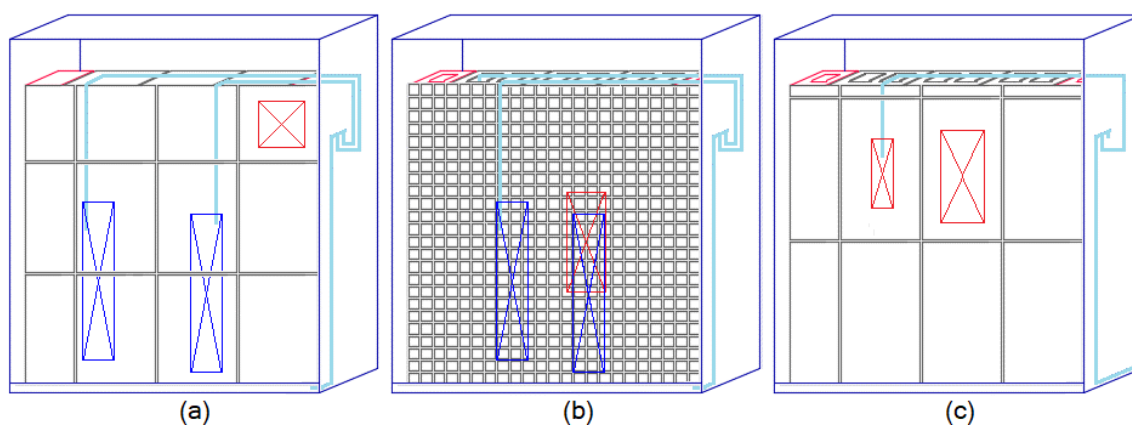


Figura 64 – Esquema técnico das muretas de ensaio.

- (a) azulejo fosco sobre reboco de 3 cm de espessura em mureta de tijolo cerâmico de vedação.
- (b) pastilha brilhosa sobre reboco de 3 cm de espessura em mureta de tijolo estrutural de cerâmica.
- (c) azulejo brilhoso sobre reboco de 1,5 cm de espessura em mureta de tijolo estrutural de betão.

Fonte: o autor.

Na Figura 64, os retângulos cortados por duas diagonais em azul simbolizam as regiões de deslocamento de reboco e os em vermelho, simbolizam as regiões com deslocamento de azulejos. Nas imagens (a) e (b) é possível observar os pontos de dispersão de água sob o reboco. Na imagem (c), o ponto de dispersão de água é sob o azulejo. Na imagem (b), destaque para instalação do ponto de dispersão no furo do tijolo.

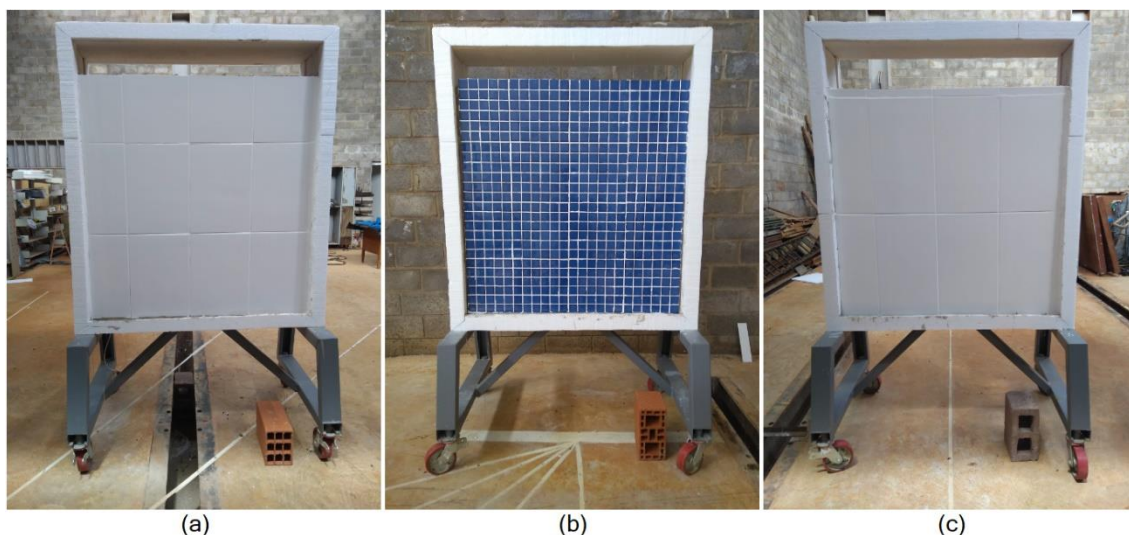


Figura 65 – Muretas de ensaio com revestimento cerâmico pronto e acabado.

- (a) azulejo fosco sobre reboco de 3 cm de espessura em mureta de tijolo cerâmico de vedação.
- (b) pastilha brilhosa sobre reboco de 3 cm de espessura em mureta de tijolo estrutural de cerâmica.
- (c) pastilha brilhosa sobre reboco de 1,5 cm de espessura em mureta de tijolo estrutural de betão.

Fonte: o autor.

As condições físicas do laboratório, os equipamentos existentes e os dados da Estação Meteorológica A702 do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020), que funciona no campus da UFMS, permitiram controlar as condições ambientais dos ensaios, tornando possível arbitrar a condição de sombreamento, de insolação e de chuva, bem como monitorar as condições de temperatura ambiente, humidade relativa do ar, índice UV, pressão atmosférica, visibilidade através do ar, velocidade do vento e a situação atmosférica.

Note-se que a cidade de Campo Grande, capital do estado do Mato Grosso do Sul, local de realização dos ensaios, está situada na faixa de transição entre o clima mesotérmico húmido sem estiagem e o tropical húmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, sendo classificado como tropical com estação seca. O período chuvoso vai de outubro a março. A média da precipitação total anual é de 1225 mm. A humidade relativa do ar apresenta valores próximos a 80% de dezembro a fevereiro. A partir de março, a humidade relativa mostra um declínio gradual, com valores médios próximos a 50% e, no mês de agosto, mínimos abaixo de 15%. A amplitude térmica é relativamente elevada devido à grande influência da continentalidade, já que Campo Grande está muito distante do oceano, mais concretamente a 1500 km do Atlântico e a 1600 km do Pacífico. A partir de agosto a humidade relativa do ar torna a elevar-se. A média de temperaturas máximas é em torno de 25°C no período que vai de outubro a março. O mês mais frio é junho, apresentando valores médios próximos a 19°C (INPE, 2020).

Como os ensaios decorreram de dezembro de 2019 a julho de 2020, pode-se dizer que foi muito variada as condições climáticas vivenciadas na janela de oportunidade, pois percorreu-se desde o início do solstício de verão em 2019, que começou em 22/12/2019, perfazendo todo o equinócio de outono, de 20/03/2020 a 19/06/2020, terminando no começo do solstício de inverno, que teve início em 20/06/2020, o que também permitiu a experimentação sob variados ângulos de incidência solar.

#### **IV.2 Descrição dos ensaios**

Os ensaios foram realizados em duas etapas, segundo as seguintes condições de acabamento das muretas:

- ✓ Acabamento em revestimento de argamassa – reboco, nas espessuras de 1,5 cm, simulando revestimento interno, e 3 cm, simulando o externo; e
- ✓ Acabamento em revestimento cerâmico – fosco, brilhoso e pastilhas.

A leitura foi principalmente qualitativa. Empregaram-se os métodos da termografia passiva, coletando-se imagens das muretas de ensaio tanto na condição de baixo gradiente térmico como após exposição à luz solar; e da termografia ativa, valendo-se da técnica do aquecimento de pulso longo, por meio de uma aquecedora elétrica dotada de um conjunto de três lâmpadas de 3000 W. Para tal, experimentou-se tanto o posicionamento da aquecedora na distância focal, ou seja, com um distanciamento tal em que o calor fosse uniformemente distribuído sobre toda a área das muretas, como o distanciamento próximo, para aquecimento concentrado em alguma área específica e de maior interesse. Explorou-se tanto a fase de aquecimento quanto a de resfriamento e a abordagem dos ensaios foi exclusivamente a direta.

#### **IV.3 Objetivos dos ensaios**

Os objetivos da realização dos ensaios foram:

- ✓ Alcançar a familiarização com as imagens termográficas obtidas para a aquisição de proficiência nas competências e habilidades de interpretação de imagens termográficas, a fim de se desenvolver perícia no discernimento de um termograma do que realmente é a representação de uma manifestação patológica ou o registro de uma anomalia térmica imprevista, capaz de induzir a um erro de interpretação, posto que os defeitos existentes eram conhecidos;

- ✓ Realizar um estudo comparativo dos resultados alcançados com câmeras termográficas de diferentes resoluções e sua análise, com vistas a evidenciar as boas práticas na produção e interpretação de termogramas, bem como elencar as condições de contorno que favorecem ou prejudicam a obtenção dos melhores resultados.

#### **IV.4 Roteiro dos ensaios**

Os ensaios seguiram o seguinte roteiro:

- ✓ Verificação das condições climatéricas ambientais e da temperatura inicial das muretas;
- ✓ Seleção, movimentação e posicionamento das muretas de ensaio para o *locus* de aquecimento natural, artificial ou de produção de termogramas;
- ✓ Para o caso de ensaios com água, realização prévia de testes de vazão, para obtenção do valor de vazão por série estatística;
- ✓ Monitoramento do aquecimento natural ou artificial e/ou preparação e configuração da malha hidráulica, para o caso de ensaios com água; e
- ✓ Coleta de termogramas, durante e após concluída a etapa de aquecimento. Para os ensaios com água, antes durante e depois da vazão.

#### **IV.5 Lista de ensaios realizados**

- ✓ Ensaio de verificação da existência de fenda horizontal e fendas verticais sob o substrato; este arranjo que também contemplou a formação de uma “junta seca”, ou seja, o assentamento de dois tijolos justapostos;
- ✓ Ensaio de verificação da conformação do substrato sob reboco;
- ✓ Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento de argamassa, simulado em duas regiões distintas, sendo uma coincidente com as fendas horizontal e verticais, e a outra sobre região sem fendas;
- ✓ Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento cerâmico, propositalmente engendrado em ambas as faces das muretas de ensaio, ou seja, sobre rebocos com espessuras de 1,5 e 3 cm, e em posições coincidentes com as regiões com e sem fendas;
- ✓ Ensaio de verificação de humidade por capilaridade;
- ✓ Ensaio de verificação de humidade por infiltração de água; e
- ✓ Ensaio de verificação de humidade por vazamento de água.

## Capítulo V

# ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### V.1 Ensaio de verificação da existência de fenda horizontal e fendas verticais

Nenhum dos ensaios realizados foram conclusivos para a identificação da existência de fendas verticais, como ilustrado na Figura 61. Foram feitas tentativas tanto pela face com revestimento de argamassa de 3 cm como na face de apenas 1,5 cm de espessura. Testou-se as três muretas, tanto com aquecimento solar como com aquecimento elétrico. Ainda, foi realizada uma tentativa com a mureta encharcada de água, mas o teste foi também inconclusivo.

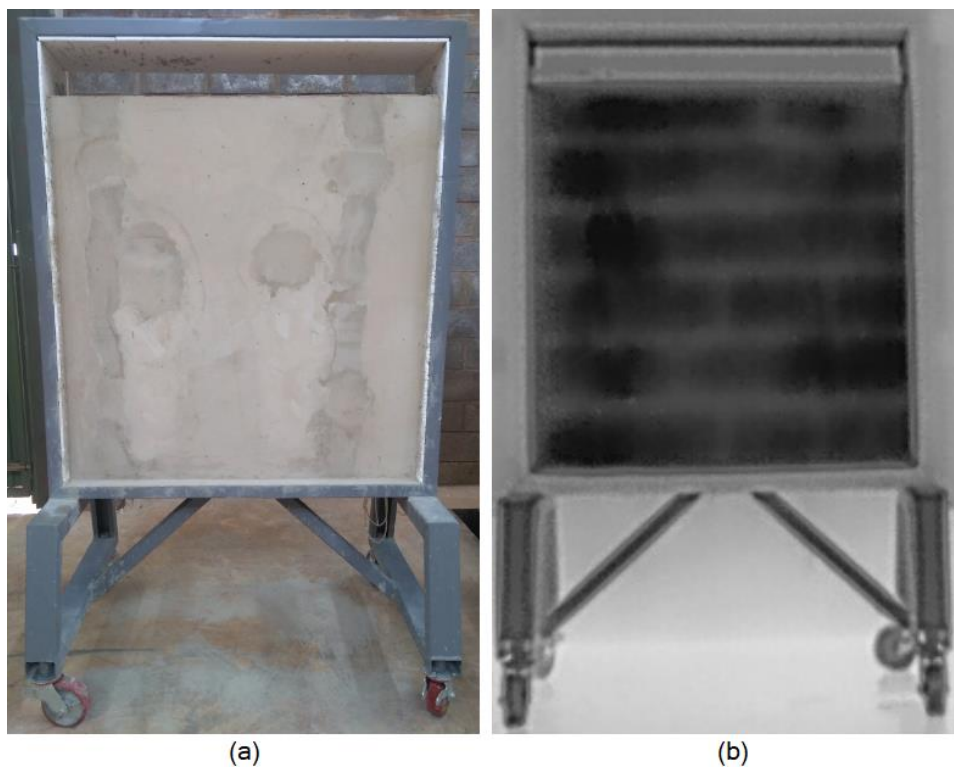
### V.2 Ensaio de verificação da conformação do substrato

O ensaio de verificação da conformação do substrato tem como objetivo utilizar-se a termografia como método não destrutivo de identificação do tipo de substrato que há sob o reboco, informação não visível que, de outra forma, não poderia ser levantada sem a remoção de parte do reboco. A Tabela 13 mostra os dados do ensaio e a Figura 66 registra as imagens coletadas.

Tabela 13 – Ensaio de verificação da conformação do substrato

Dados do ensaio	Valor
Câmera	CTARA
Paleta utilizada	<i>Black Hot</i>
Distância entre a câmera/objeto	5 m
Substrato	Tijolo de betão estrutural
Espessura do reboco	1,5 cm
Revestimento cerâmico	Não
Data do ensaio	22/07/2020
Temperatura ambiente	26,1°C
Humidade do ar	38%
Índice UV	Moderado
Pressão atmosférica	1,016 mBar
Visibilidade do ar	10 km
Velocidade do ar	7,2 km/h
Situação atmosférica	Céu claro
Temperatura inicial da mureta	22,4°C
Aquecimento	Solar
Temperatura da mureta após o aquecimento	38,5°C

Fonte: o autor.



(a) (b)  
 Figura 66 – Ensaio de verificação da conformação do substrato.  
 (a) imagem visível. (b) imagem infravermelha.

Fonte: o autor.

O resultado do ensaio foi satisfatório no sentido de evidenciar que a mureta inspecionada tem como substrato blocos de alvenaria.

### V.3 Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento de argamassa

O ensaio de verificação de deslocamento de revestimento de argamassa tem como objetivo utilizar-se da termografia como método não destrutivo de identificação da ocorrência de descolamento do reboco, sobretudo da fachada de edificações, antes que ocorra o desprendimento e queda da fração deslocada. É, portanto, um procedimento útil para inspeção preventiva e/ou preditiva, cuja importância aumenta ao longo do tempo, à medida que a edificação sofre seu envelhecimento natural, sobretudo em áreas onde há circulação de pessoas e veículos, face ao risco de danos que podem ser causados pela queda de fragmentos ou da projeção desses fragmentos após o impacto com o solo.

A verificação é favorecida pelo fato de que a camada de ar confinado que se forma entre o reboco e o substrato quando do deslocamento faz com que essa região se aqueça mais rapidamente. A Tabela 14 apresenta os dados dos ensaios realizados com câmera posicionada perpendicularmente à mureta e a Tabela 15, com posicionamento em ângulos variados.

Tabela 14 – Ensaios de verificação de deslocamento de revestimento de argamassa

Dados do ensaio	1° ensaio	2° ensaio	3° ensaio
	Ref. Figura 67 (a)	Ref. Figura 67 (b)	Ref. Figura 68
	Valor	Valor	Valor
Câmera	CTARA	CTARA	CTARA
Paleta utilizada	<i>Fusion</i>	<i>Fusion</i>	<i>Fusion</i>
Distância entre câmera/objeto	5 m	5 m	5 m
Substrato	Tijolo de betão estrutural	Tijolo de betão estrutural	Tijolo de betão estrutural
Espessura do reboco	3 cm	3 cm	3 cm
Revestimento cerâmico	Não	Não	Não
Data do ensaio	19/12/2019	09/01/2020	20/07/2020
Temperatura ambiente	28,2°C	28,5°C	29°C
Humidade do ar	67%	68%	41%
Índice UV	Alto	Moderado	Moderado
Pressão atmosférica	1,014 mBar	1,013 mBar	1,011 mBar
Visibilidade do ar	10 km	10 km	10 km
Velocidade do ar	21 km/h	24 km/h	18 km/h
Situação atmosférica	Céu nublado	Céu nublado	Céu nublado
Temperatura inicial da mureta	26,7°C	28,4°C	28,2°C
Aquecimento	Elétrico	Solar	Solar
Distância focal do aquecedor	1,5 m	-	-
Temperatura após aquecimento	34,9°C	44,8°C	37,3°C

Fonte: o autor.

Tabela 15 – Ensaios de deslocamento de reboco com variação de ângulo de captura

Dados do ensaio	4° ensaio	5° ensaio
	Ref. Figura 69	Ref. Figura 70
	Valor	Valor
Câmera	CTBRA	CTARA
Paleta utilizada	<i>Iron</i>	<i>Fusion</i>
Distância entre câmera/objeto	3 m	5 m
Substrato	Tijolo de betão estrutural	Tijolo de betão estrutural
Espessura do reboco	3 cm	3 cm
Revestimento cerâmico	Não	Não
Data do ensaio	20/07/2020	20/07/2020
Temperatura ambiente	29°C	29°C
Umidade do ar	41%	41%
Índice UV	Moderado	Moderado
Pressão atmosférica	1,011 mBar	1,011 mBar
Visibilidade do ar	10 km	10 km
Velocidade do ar	18 km/h	18 km/h
Situação atmosférica	Céu nublado	Céu nublado
Temperatura inicial da mureta	28,2°C	28,2°C
Aquecimento	Solar	Solar
Temperatura após aquecimento	37,3°C	37,3°C

Fonte: o autor.

As Figuras 67 a 70 registram as imagens coletadas. A Figura 67 apresenta os primeiros ensaios. A Figura 68 o ensaio com técnica aprimorada e as Figuras 69 e 70 correspondem aos ensaios com variação no ângulo entre a câmera e o objeto.

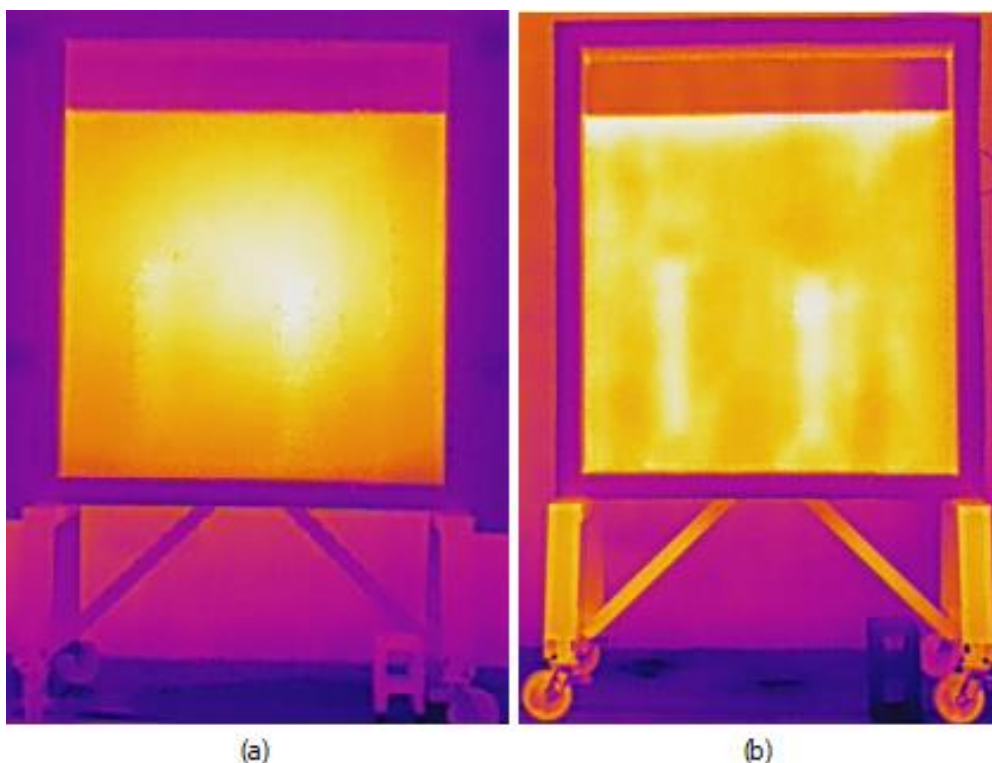


Figura 67 – Primeiros ensaios de verificação de deslocamento de reboco.  
(a) aquecimento elétrico. (b) aquecimento solar.  
Fonte: o autor.

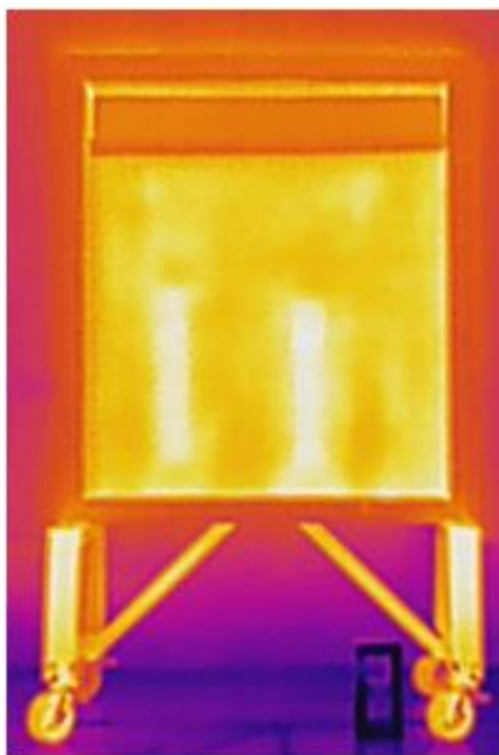


Figura 68 – Verificação de deslocamento de reboco com técnica aprimorada.  
Fonte: o autor.

Destaque para as imagens (a), (b), (c) e (d) da Figura 69, que registram termogramas realizados em diferentes ângulos de posicionamento entre a câmera CTBRA e o objeto.

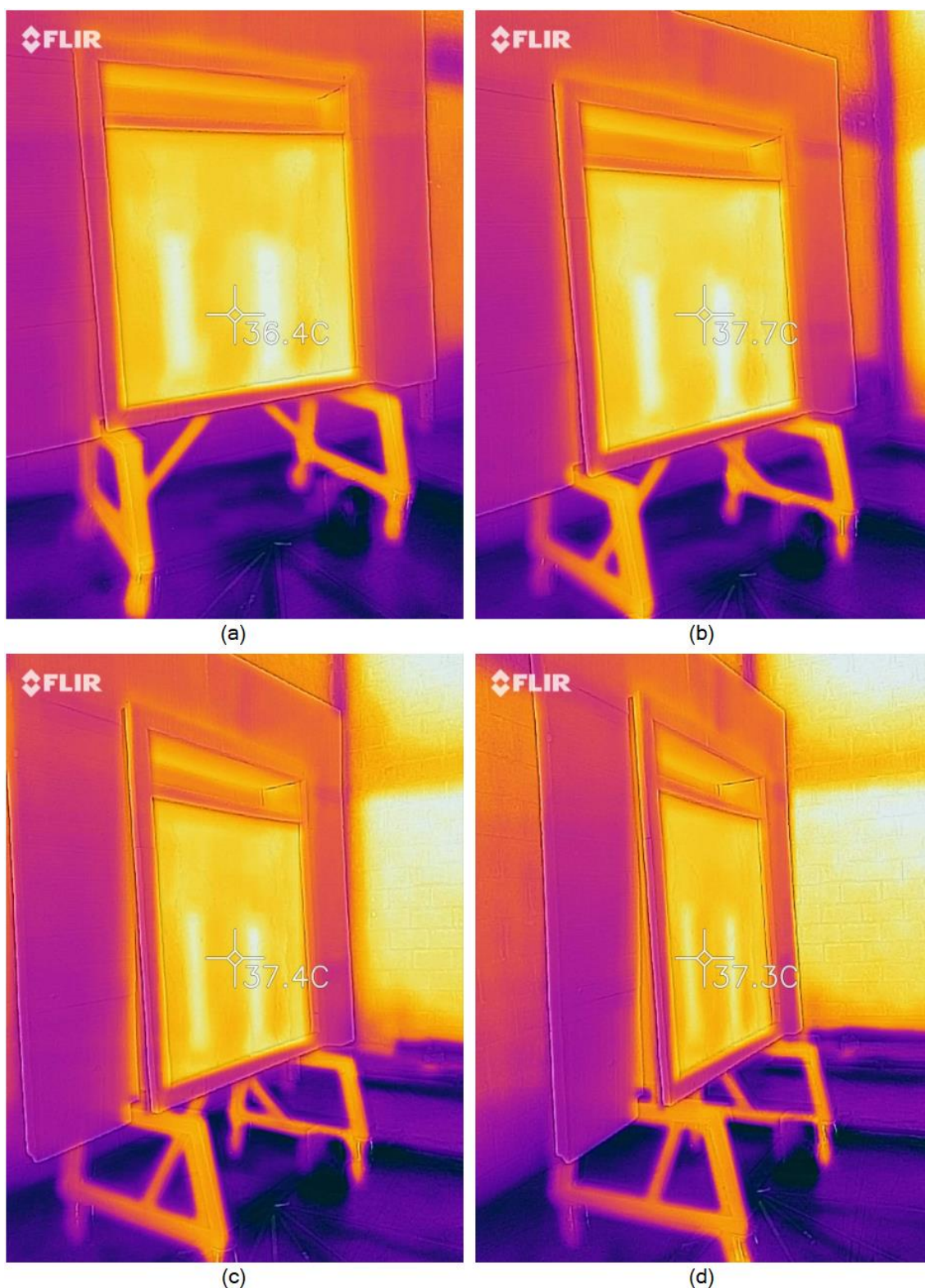


Figura 69 –Deslocamento de revestimento de argamassa em ângulos com CTBRA.  
 (a) imagem à 30°. (b) imagem à 45°. (c) imagem à 60°. (d) imagem à 75°.

Fonte: o autor.

Destaque para as imagens (a), (b), (c) e (d) da Figura 70 que registram termogramas realizados em diferentes ângulos de posicionamento entre a câmera CTARA e o objeto.

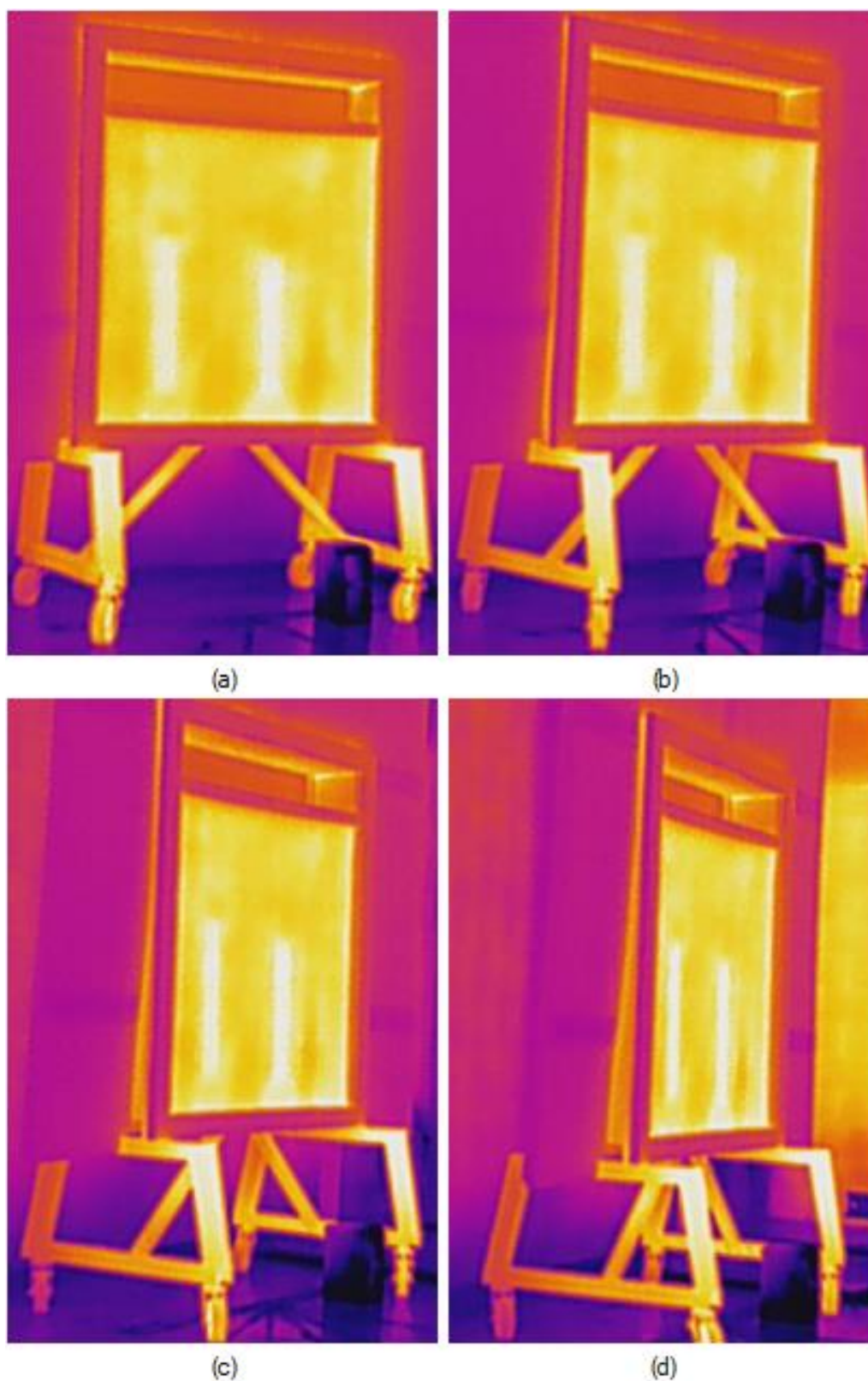


Figura 70 – Deslocamento de revestimento de argamassa em ângulos com CTARA.  
(a) imagem à 30°. (b) imagem à 45°. (c) imagem à 60°. (d) imagem à 75°.  
Fonte: o autor.

No primeiro ensaio, que se pode verificar na imagem (a) da Figura 67, o resultado foi satisfatório em tela no sentido de evidenciar as duas regiões de simulação de deslocamento do reboco, cuja temperatura, como era esperado, foi registrada no termograma como sendo ligeiramente mais alta. Na imagem impressa, contudo, há insuficiente contraste para bem perceber a patologia simulada. A concentração de calor na região central da mureta também prejudica uma análise mais precisa, mas a técnica é válida como recurso à inspeções no interior das edificações.

No segundo ensaio, que se pode ver na imagem (b) da Figura 67, o resultado foi mais satisfatório, no entanto, também foi registrado um gradiente de temperatura mais alto na faixa horizontal do limite superior da mureta, com uma conformação caracterizada por contornos assimétricos de algum tipo de calor penetrante do exterior para o interior pelo topo da mureta, o que não era esperado. Ocorre que a mureta de ensaio em questão foi construída com blocos vazados, que se alinham durante a construção, como se pode ver na Figura 52. Como a face superior da mureta restou aberta, houve um acúmulo imprevisto de calor no local, o que foi solucionado com o aprimoramento da técnica no terceiro ensaio.

No terceiro ensaio, foi providenciada uma tampa de isopor que recobriu a face superior da mureta de ensaio. Como resultado, a anomalia térmica indesejada do segundo ensaio foi eliminada, como se pode verificar na Figura 68. O procedimento, então, passo a fazer parte dos demais ensaios.

Os ensaios seguintes foram realizados em diversos ângulos de posicionamento entre a câmera e o objeto, sendo as imagens da Figura 69 referentes aos termogramas captadas com a câmera CTBRA e as da Figura 70 os da câmera CTARA. Em ambos os casos houve pleno sucesso na identificação das patologias engendradas.

#### **V.4 Ensaio de verificação de deslocamento de revestimento cerâmico**

Esta verificação também consiste em um método não destrutivo de identificação de patologias em edificações e tem como objetivo principal identificar a ocorrência de descolamento de azulejos antes que ocorra o desprendimento e queda de peças deslocadas. A ocorrência desta patologia se dá, sobretudo, na fachada de edifícios com mais de dez anos de idade e em paredes contínuas - dado a maior dificuldade de absorver e redistribuir as tensões térmicas e mecânicas, ambas situações em que a incidência deste tipo de dano se avulta, como sugere uma pesquisa realizada em Brasília (Bauer, et al., 2015).

É, portanto, um procedimento igualmente útil para inspeção preventiva e/ou preditiva, cuja importância aumenta ao longo do tempo, à medida que a edificação sofre seu envelhecimento natural, sobretudo em áreas onde há circulação de pessoas e veículos, face ao risco de danos que podem ser causados pela queda de placas ou da projeção de seus fragmentos após o impacto com o solo.

Os ensaios foram realizados sob diferentes condições, sendo elas:

- ✓ Azulejo com acabamento superficial fosco, brilhoso e em pastilha brilhosa;
- ✓ Inspeção sob condição de baixo gradiente térmico;
- ✓ Verificação com aquecimento solar;
- ✓ Condição de deslocamento de azulejo em substrato íntegro;
- ✓ Condição de deslocamento de azulejo em região coincidente com reboco deslocado, ou seja, com dupla patologia; e
- ✓ Condição de deslocamento em regiões com e sem interfaces de rejuntamento.

A Tabela 16 apresenta os dados do ensaio na condição de baixo gradiente térmico e a Tabela 17, na condição de mureta aquecida.

Tabela 16 – Ensaios de verificação de deslocamento de revestimento cerâmico na condição de baixo gradiente térmico

Dados do ensaio	1º ensaio	2º ensaio
	Referente à Figura 71	Referente à Figura 72
	Valor	Valor
Câmera	CTARA	CTBRA
Paleta utilizada	<i>White Hot</i>	<i>Rainbow HC</i>
Distância entre a câmera/objeto	5 m	3 m
Substrato	Cerâmico de vedação	Tijolo de betão estrutural
Espessura do reboco	3 cm	1,5 cm
Revestimento cerâmico	Azulejo fosco	Azulejo brilhoso
Data do ensaio	13/03/2020	06/03/2020
Temperatura ambiente	33°C	31°C
Temperatura mínima no dia	23,8°C	19,8°C
Temperatura máxima no dia	35,5°C	32,4°C
Humidade do ar	50%	38%
Índice UV	Moderado	Alto
Pressão atmosférica	1,014 mBar	1,014 mBar
Visibilidade do ar	10 km	10 km
Velocidade do ar	14 km/h	5 km/h
Situação atmosférica	Parcialmente nublado	Nublado
Temperatura da mureta	38,3°C	31,7°C
Aquecimento	Nenhum	Nenhum

Fonte: o autor.

Tabela 17 – Ensaios de verificação de deslocamento de revestimento cerâmico na condição de mureta aquecida

Dados do ensaio	1° ensaio	2° ensaio
	Ref. Figura 73 (a)	Ref. Figura 73 (b)
	Valor	Valor
Câmera	CTARA	CTARA
Paleta utilizada	<i>Black Hot</i>	<i>Ironbow</i>
Distância entre a câmera/objeto	5 m	5 m
Substrato	Cerâmico de vedação	Cerâmico estrutural
Espessura do reboco	3 cm	3 cm
Revestimento cerâmico	Azulejo fosco	Pastilha
Data do ensaio	21/07/2020	20/07/2020
Temperatura ambiente	29,4°C	29°C
Umidade do ar	38%	41%
Índice UV	Moderado	Moderado
Pressão atmosférica	1,016 mBar	1,011 mBar
Visibilidade do ar	10 km	10 km
Velocidade do ar	16,6 km/h	18 km/h
Situação atmosférica	Sol, céu claro	Céu nublado
Temperatura inicial da mureta	27,7°C	25,5°C
Aquecimento	Solar	Solar
Temperatura da mureta após o aquecimento	34,9°C	39,6°C

Fonte: o autor.

As Figuras 71 e 72 apresentam os termogramas sob condição de baixo gradiente térmico, enquanto a Figura 73 apresenta os resultados obtidos após aquecimento das muretas de ensaio.

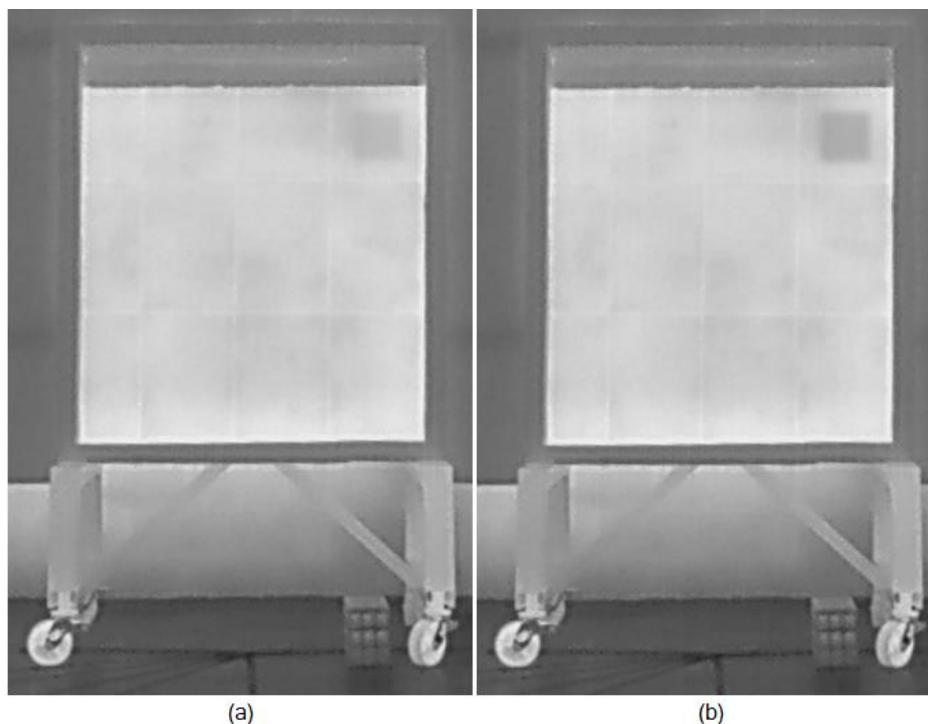


Figura 71 – Deslocamento de revestimento cerâmico fosco com CTARA. (a) imagem original. (b) imagem com melhoramento de *software*.

Fonte: o autor.



Figura 72 – Desplacamento de revestimento cerâmico brilhoso com CTBRA.  
Fonte: o autor.

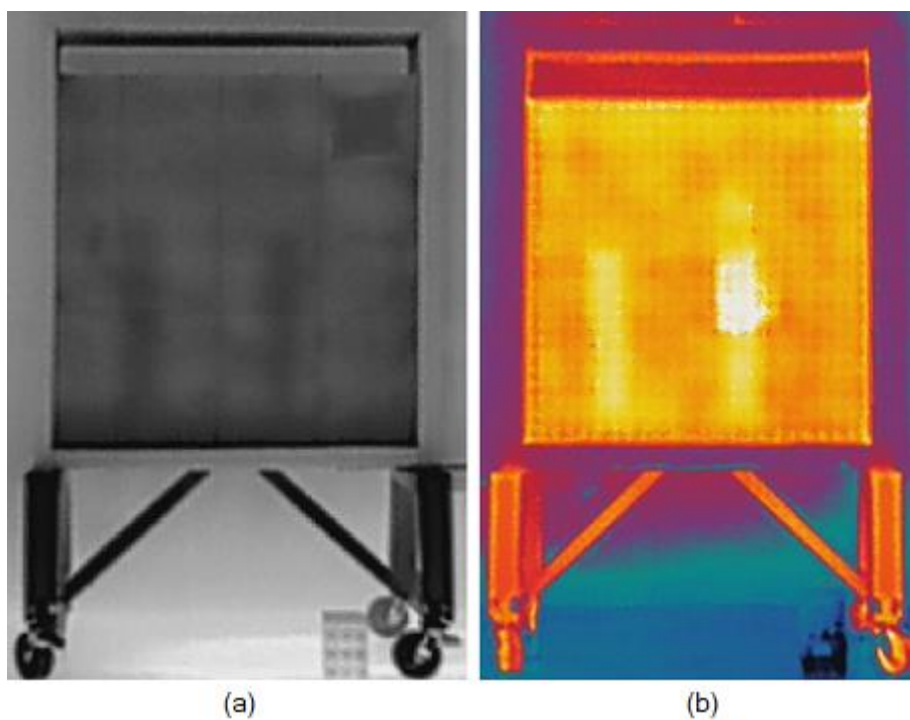


Figura 73 – Desplacamento de revestimento cerâmico brilhoso com CTARA.  
(a) azulejo fosco sobre reboco de 3 cm de espessura em mureta de tijolo cerâmico de vedação.  
(b) pastilha brilhosa sobre reboco de 3 cm de espessura em mureta de tijolo estrutural de cerâmica.  
Fonte: o autor.

Para o primeiro ensaio, no qual optou-se por termografar a mureta na condição de baixo gradiente térmico, ou seja, sem exposição prévia ao sol ou qualquer outra ação de aquecimento, valendo-se apenas e tão somente dos gradientes térmicos produzidos pela variação natural da temperatura ao longo do dia, obteve-se suficiente definição em tela da simulação de deslocamento engendrada, centro do azulejo posicionado na extremidade superior direita da mureta, porém, com baixo contraste, como pode-se ver na imagem (a) da Figura 71. Ciente de que há perda de resolução na conversão do sistema aditivo de cores, comum a qualquer tela de computador ou celular, para o sistema subtrativo de cores, utilizado pelos dispositivos de impressão, percebeu-se imediatamente a necessidade de alguma ação de melhoramento da imagem para sua apresentação neste trabalho, situação muito comum na atividade comercial de termografia, onde os resultados também são apresentados em relatórios impressos com ações de melhoramento. É o que se verifica na imagem (b) da Figura 71.

No segundo ensaio, registrado na Figura 72, vê-se situação semelhante, mas com solução distinta para a questão do problema de baixo contraste para o resultado impresso. Nela obteve-se suficiente resolução impressa apenas com mudança na paleta de cores.

Para o terceiro e quarto ensaios, realizados após exposição solar das muretas, desejava-se saber se seria possível verificar não apenas a existência das regiões de deslocamento do revestimento cerâmico, mas também as regiões de simulação de deslocamento do reboco. Para atingir este objetivo, a mureta da imagem (a) da Figura 73, que é a mesma mureta da Figura 71, foi construída com região de deslocamento de azulejo distinta da região de deslocamento do reboco e em azulejo fosco. Já para a construção da mureta da imagem (b) da Figura 73, que tem revestimento em pastilha brilhosa, optou-se por engendrar regiões coincidentes e não coincidentes entre deslocamento de reboco e revestimento cerâmico – uma solução mais feliz para a perseguição deste objetivo de ensaio. Mas os terceiro e quarto ensaios distinguem-se entre si pelo tempo de aquecimento solar.

No terceiro ensaio optou-se por um tempo curto de exposição da mureta ao sol, quarenta minutos. Inicialmente, havia se pensado em apenas trinta minutos, mas, na verificação sumária, realizada antes de proceder ao deslocamento da mureta de ensaio da posição de aquecimento solar para a posição de coleta de termogramas, percebeu-se que ainda não havia contraste nem em tela. Assim, a mureta foi termografada apenas após quarenta e cinco minutos de exposição solar.

Assim, após decorrido três quartos de hora de aquecimento solar, obteve-se suficiente resolução em tela para perceber tanto os deslocamentos do revestimento cerâmico quanto do reboco, mas com pouco contraste para impressão. Após diversos testes de impressão, a paleta *Black Hot* foi a que melhor apresentou o resultado obtido, mas ainda não satisfatório para o papel comum, como pode-se verificar na imagem (a) da Figura 73. No entanto, preferiu-se manter o registro sem qualquer melhoramento de imagem para a apresentação neste trabalho, pois, dentre os testes de impressão realizados, alcançou-se resultado satisfatório com a impressão em papel fotográfico – outra solução possível para a melhoria da resolução na apresentação de termogramas impressos.

Finalmente, no quarto ensaio, verificável na imagem (b) da Figura 73, no qual a mureta de ensaio foi deixada por uma hora em exposição solar, percebe-se com muita clareza no termograma impresso as regiões de deslocamento de reboco e, em maior nível de energia térmica, a região de coincidência de deslocamento de reboco e deslocamento de revestimento.

Contudo, não se verificou nos termogramas coletados nenhuma anomalia ou destaque nas imagens produzidas que ressaltasse alguma diferenciação térmica nas regiões de deslocamento compreendidas nos pontos de rejuntamento dos azulejos.

Por oportuno, nos termogramas realizados com a câmera CTBRA, a 3 m de distância da mureta de ensaio revestida com pastilhas brilhosas, por vezes, foi perceptível o reflexo do calor corpo deste pesquisador em tela, quando adotado o posicionamento perpendicular entre a câmera e o objeto. O problema foi contornado tão somente com uma leve inclinação da câmera da posição perfeitamente vertical para levemente inclinada. O mesmo não se verificou com a câmera CTARA, provavelmente porque esta foi posicionada sempre a 5 m do alvo. Assim, verificou-se que adotar a técnica de posicionar as câmeras levemente inclinadas para trás, coisa de uns cinco graus, é uma boa prática em termografia; e uma alternativa ao posicionamento do operador em abertura lateral angular, como exercitado nos ensaios do item V.5.3. deste trabalho.

### **V.5 Ensaio de verificação de humidade por capilaridade**

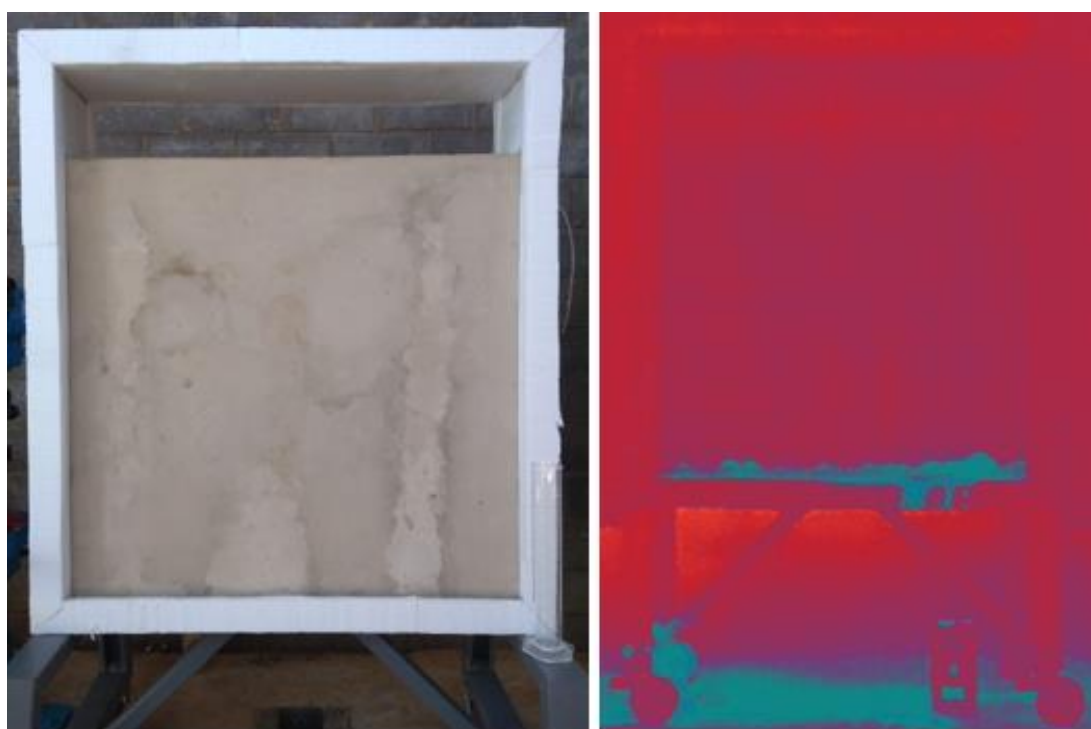
O ensaio de verificação de humidade por capilaridade teve por objetivo simular a verificação da existência de humidade proveniente do solo, devido à má impermeabilização de fundações. Para tanto, utilizou-se da calha de acumulação de água na base da mureta para provocar a capilaridade. O ensaio foi interrompido quando a humidade já se mostrava visível na parede.

A Tabela 18 apresenta os dados do ensaio realizado, enquanto a Figura 74 ilustra o termograma obtido frente à imagem retratada no espectro visível. Destaque para o fato de que, a olho nu, não se pode perceber a existência de umidade na alvenaria.

Tabela 18 – Ensaio de verificação de umidade por capilaridade

Dados do ensaio	Valor
Câmera	CTARA
Paleta utilizada	Lava
Distância entre a câmera/objeto	5 m
Substrato	Cerâmico estrutural
Espessura do reboco	3 cm
Data do ensaio	21/01/2020
Temperatura ambiente	35,9°C
Humidade do ar	49%
Índice UV	Muito alto
Pressão atmosférica	1,008 mBar
Visibilidade do ar	10 km
Velocidade do ar	16 km/h
Situação atmosférica	Parcialmente nublado
Temperatura inicial da mureta	32,9°C
Tempo de dispersão de água	16 min
Ponto de dispersão de água	Calha de acumulação de água
Vazão de água no ponto de dispersão	Máxima
Aquecimento	Nenhum

Fonte: o autor.



(a)

(b)

Figura 74 – Verificação de umidade por capilaridade.

(a) imagem visível, às 14:22:31 hrs. (b) imagem no infravermelho, às 14:22:43 hrs.

Fonte: o autor.

O resultado do ensaio foi satisfatório no sentido de evidenciar que a mureta inspecionada apresentava umidade em sua base, decorrente de capilaridade, informação que, até o instante do termograma aproveitado, não se encontrava visível. Nos instantes que se seguiram à imagem (b) da Figura 74 a umidade já era percebida visualmente.

## V.6 Ensaio de verificação de umidade por infiltração e vazamento de água

O ensaio de verificação de umidade por infiltração de água foi realizado sob duas formas distintas. Na primeira, a água foi borrifada na superfície da parede com acabamento em argamassa, deixada secar até não se tornar mais visível e, somente então, foi coletado o termograma. A técnica simula a condição de presença de umidade adquirida de fora para dentro de planos edificados com massa cimentícia e visa demonstrar a utilidade da aplicação da termografia na inspeção dos forros de cobertura dos edifícios após a chuva, para a localização de pontos de falha nos telhamentos, uma tarefa, por vezes, difícil de ser executada bem sucedida, pois, na ausência de chuva, cessa o gotejamento. Na segunda, foi utilizada a malha hidráulica da mureta com revestimento cerâmico para simular a condição de infiltração de água, com controle da vazão.

Já no ensaio de verificação de vazamento de água, aplicou-se a máxima vazão na malha. A Tabela 19 mostra os dados dos 3 ensaios realizados.

Tabela 19 – Ensaio de verificação de umidade por infiltração de água

Dados do ensaio	Infiltração de água		Vazamento de água
	Pela superfície	Pelo interior	
Câmera	CTBRA	CTBRA	CTBRA
Paleta utilizada	<i>Gray</i>	<i>Rainbow HC</i>	<i>Gray</i>
Distância câmera/objeto	3 m	3 m	3 m
Substrato	Tijolo de betão estrutural	Cerâmico estrutural	Tijolo de betão estrutural
Espessura do reboco	1,5 cm	3 cm	1,5 cm
Data do ensaio	27/01/2020	06/03/2020	06/03/2020
Temperatura ambiente	35,4°C	33,7°C	33,7°C
Umidade do ar	41%	38%	38%
Índice UV	Moderado	Alto	Alto
Pressão atmosférica	1,011 mBar	1,014 mBar	1,014 mBar
Visibilidade do ar	10 km	10 km	10 km
Velocidade do ar	18 km/h	5 km/h	5 km/h
Situação atmosférica	Nublado	Nublado	Nublado
Temperatura inicial da mureta	35,5°C	31,4°C	30,8°C
Tempo de dispersão de água	Não aferido	16 min	2 min
Ponto de dispersão de água	Na superfície	Favo vertical menor do tijolo	Entre o reboco e o azulejo
Vazão no ponto de dispersão	Por borrifamento	0,7 l/min	Máxima
Aquecimento	Nenhum	Nenhum	Nenhum

Fonte: o autor.

As Figuras 75 e 76 registram as imagens coletadas. As imagens da Figura 75 apresentam os termogramas de registro da humidade adquirida na superfície em dois instantes de tempo: o momento logo após o borrifamento de água e o instante em que a humidade já não era mais perceptível no espectro visível, mas perfeitamente visível no espectro infravermelho. As imagens da Figuras 76 apresentam o ensaio de infiltração e vazamento de água pelo interior.

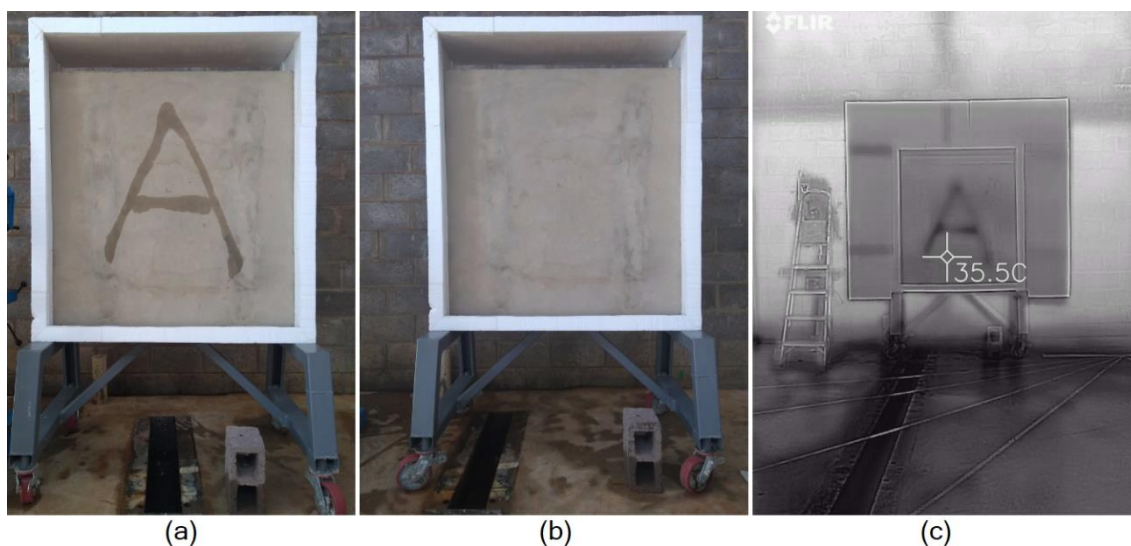


Figura 75 – Verificação de humidade superficial.  
 (a) imagem visível, às 14:22 hrs. (b) imagem visível, às 15:26 hrs. (c) termograma, às 15:26 hrs.  
 Fonte: o autor.

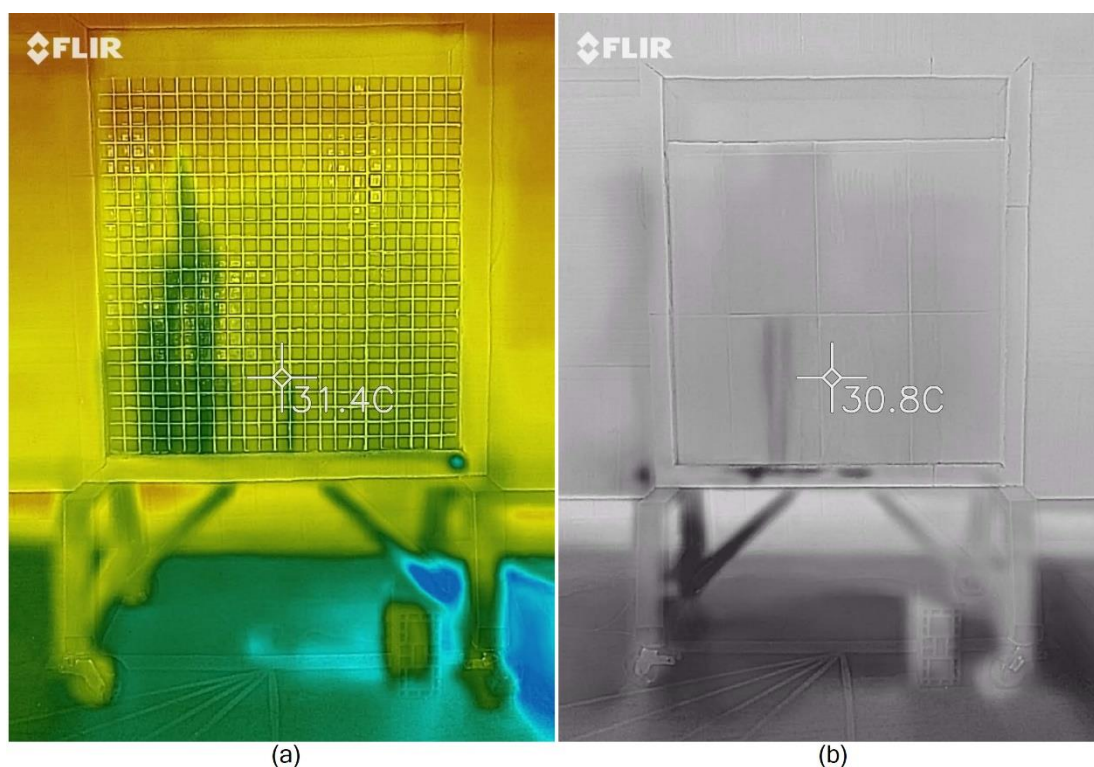


Figura 76 – Verificação de humidade por infiltração e vazamento de água.  
 (a) infiltração de água pelo interior da parede. (b) vazamento de água do interior da parede.  
 Fonte: o autor.

No ensaio de verificação de humidade por infiltração de água, por borrifamento da superfície da mureta com acabamento em argamassa, a mureta foi umedecida às 14:21 hrs e deixada secar à sombra no interior do laboratório à temperatura ambiente de 35°C, com 41% de humidade relativa do ar, perdendo completamente os sinais de humidade às 15:26 hrs, quando não havia mais manchas de água visíveis em sua superfície nem, tão pouco, percepção de humidade ao toque, momento em que foi termografada. O termograma, que se vê na imagem (c) da Figura 74, mostrou com muita nitidez a presença da humidade em todas as paletas e com ambas as câmeras, CTARA e CTBRA, evidenciando que a localização de pontos de humidade em edificações é uma das aplicações mais efetivas da termografia. E, de tal forma, restou comprovado que o uso de câmeras termográficas pode ajudar substancialmente na busca de falhas na cobertura dos edifícios, instantes após a ocorrência de chuvas, pois o gotejamento durante a chuva deixará claras evidências termais na superfície da laje sob o telhado por tempo suficiente para a realização de uma diligente e eficaz inspeção termográfica.

No ensaio de verificação de humidade por infiltração de água pelo interior, no qual se utilizou da malha hidráulica da mureta para dispersar água por dentro do simulacro de parede, promoveu-se uma vazão em cadência lenta, 0,7 l/min, aduzida no favo vertical menor do tijolo cerâmico estrutural, como ilustra a Figura 52. A partir da abertura do respectivo registro, passou-se a monitorar uma sequência de termogramas tirados em intervalos bem curtos de tempo. Em vista da cobertura cerâmica, demorou até que o vazamento se tornasse visível, momento em que o ensaio foi interrompido. A imagem (a) da Figura 75 registra o termograma aproveitado do ensaio.

Por último, no ensaio de verificação de humidade por vazamento de água foi utilizado o ponto de dispersão localizado entre o reboco e o azulejo, que se pode ver na fotografia da Figura 55 e que se encontra representado na imagem (c) da Figura 64. A técnica consistiu em promover a vazão máxima de água no ponto e observar a face da mureta de ensaio, coletando termogramas até que o vazamento se tornasse visível. Durante o ensaio, era desejado verificar o ponto de origem do vazamento. Ocorre que em vazamentos de água não é incomum que o encaminhamento do fluxo pelos poros, fissuras internas e demais vazios, que porventura possam existir, acabe por camuflar o ponto exato de origem do problema, onerando o reparo pela quebra desnecessária de peças cerâmicas. O ensaio teve pleno êxito em identificar, com exatidão, a peça cerâmica necessária destacar para realizar o reparo no ponto preciso do vazamento. A Figura 76 faz o registro.

## Capítulo VI

# CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### VI.1 Conclusões obtidas do estudo realizado

A termografia é um campo muito pouco explorado na vastidão de possibilidades de atuação de um engenheiro civil e, como ferramenta de diagnóstico de patologias nas edificações, consiste em uma aliada muito poderosa. As suas capacidades de identificação de diversos problemas muito comuns nas obras civis, como humidade, infiltrações, vazamentos de água e deslocamentos de revestimentos foram comprovadas neste estudo. Outras muitas aplicações, como a verificação de sobrecargas elétricas e a não conformidades em sistemas de climatização de ambientes, não foram exploradas.

Por outro lado, ingressar nesta frente de trabalho não é simples. O conhecimento é de difícil acesso, há poucas publicações sobre o assunto, pouquíssimos profissionais atuantes no mercado e baixa oferta de cursos de capacitação na área. No entanto, a disponibilidade de normas técnicas tem aumentado. Hoje, diferente do cenário que se verificava há pouco mais de cinco anos, não há mais a prevalência de normas direcionadas ao setor elétrico. A investigação de patologias nas edificações e a realização de ensaios não destrutivos por termografia têm cada vez mais atraído a comunidade científica.

O valor de aquisição desses equipamentos também está mais convidativo, diferentemente dos preços proibitivos de há dez anos atrás, embora ainda seja exigido um considerável investimento a depender da aplicação desejada. Neste sentido, a delimitação do campo de atuação e do emprego que se pretende dar a esses dispositivos pode, por meio do conhecimento das características técnicas dos equipamentos termográficos disponíveis no mercado, proporcionar a otimização do investimento. Particularmente para as atividades de inspeção e perícia em que o operador consegue atuar próximo ao objeto/alvo, não se exige investimento maior que o valor médio de aquisição de um computador portátil convencional. Todavia, para determinadas aplicações específicas, e naquelas em que o operador precisa trabalhar distante do objeto/alvo, como em inspeções de fachadas de edifícios e operações com uso de drones, o investimento ainda é alto.

Por outro lado, o reduzido número de profissionais atuantes nessa fatia de mercado favorece o alcance de um posicionamento de destaque e até mesmo de referência na comunidade, com fortes possibilidades de retorno financeiro em curto espaço de tempo, sobretudo nas atividades de inspeção e perícia em edificações.

Através dos ensaios realizados nesta dissertação, concluiu-se que a tecnologia é razoavelmente capaz de emergir a conformação do substrato de paredes, sem a necessidade da remoção do revestimento. É eficaz para a identificação da existência de deslocamentos de revestimento de argamassa em paredes externas, mesmo com a câmera posicionada em ângulo não perpendicular, com bons resultados para ângulos de 0° a 75°. A existência de deslocamentos de revestimento cerâmico, com superfície fosca ou brilhosa, sendo o assentamento em reboco interno ou externo, ou seja, com espessuras de 1,5 a 3 cm de argamassa é igualmente satisfatória. Os melhores resultados, porém, foram os obtidos nos ensaios de humidade por capilaridade, infiltração e vazamento de água.

No entanto, os ensaios realizados sugerem que o uso desta tecnologia sofre grande interferência do ambiente, condicionando a obtenção de bons termogramas à observância de adequadas condições ambientais e da atenção às disposições de entorno dos objetos/alvo avaliados. O porquê desta conclusão reside no fato de que as câmeras termográficas produzem tanto melhor nitidez no registro dos termogramas quanto maior o gradiente térmico entre as frações dos corpos estudados e menor a faixa de temperatura total da cena, permitindo a formação de imagens com melhor exploração da faixa de cores e tons disponíveis, segundo a resolução do equipamento.

Em função dos trabalhos executados para esta dissertação, conclui-se que o campo para pesquisa também é promissor, pois ainda há muitas aplicações carentes de estudo e comprovação de possibilidades e limitações. Os ensaios realizados evidenciaram que a termografia e a radiometria, com os meios atuais de tecnologia, embora possa emergir grande quantidade de informações na investigação das patologias dos edifícios, exige, ainda, sólida capacitação para a operação e exploração das câmeras termográficas.

## **VI.2 Sugestões e recomendações para trabalhos futuros**

Sugere-se, para pesquisas futuras, o estudo da exploração das capacidades e limitações na inspeção de fachadas de edifícios com câmeras termográficas integradas a drones, em substituição ao método tradicional de inspeção por percussão, evitando os custos e os riscos inerentes à operação com cordas – cadeirinha ou plataforma elevatória, também conhecida por balancim. Para tal, recomenda-se estudar com interesse os aspectos técnicos dos equipamentos, sobretudo a frequência de operação, o IFOV, o MFOV, a faixa espectral e o formato dos arquivos dos termogramas, tanto para a escolha do equipamento na aquisição como para sua operação; e a não negligenciar as condições ambientais e as influências do entorno do objeto/alvo durante a execução das inspeções.

## Referências Bibliográficas

ABNT, 1983. *NBR 8214:1983 - Assentamento de ajulejos*. Rio de Janeiro-RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 1996. *NBR 13753:1996 - Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento*. Rio de Janeiro-RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 1996. *NBR 13754:1996 - Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - procedimento*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 1998. *NBR 7200:1998 Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento.pdf*. Rio de Janeiro-RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2004. *NBR NM 294/2004: Vidro Float*. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2005. *NBR 15.220-2/2005: Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. s.l.: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2005. *NBR 15220-2/2005: 2005, versão corrigida: 2008. Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, 2013. *Ensaaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos*. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT, s.d. *ABNT - Catálogo: segurança, qualidade, padrão e confiança*. [Online] Available at: <https://www.abntcatalogo.com.br/> [Acesso em 03 07 2020].

ACEPE, 2019. *Caracterização do comportamento térmico dos edifícios*. [Online] Available at: <https://acepe.pt/caracterizacao-do-comportamento-termico-dos-edificios/> [Acesso em 05 05 2019].

Aidair, L. A. G., Milhomem, P. M. & Bauer, E., 2018. Análise das possíveis variações nos termogramas provocadas por alterações no ângulo de obtenção das imagens. *Anais do Congresso Brasileiro de Patologias das Construções - CBPAT*, 18 a 20 Abril.

Álvares, R. C., 2008. *Diagnóstico de Falhas em Pára-raios Utilizando Termografia*, Belo Horizonte: UFMG.

Álvares, R. C., Resende, P. d., Silvino, J. L. & Andrade, R. M., 2008. *On surge arrester fault prediction via thermograph analysis*. Belo Horizonte-MG: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

ANAC, 2017. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial: RBAC-E n° 94 - Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil, aprovados pela Resolução n° 419, de 2 de maio de 2017*. Brasília-DF: Agência Nacional de Aviação Civil.

AVANT, 2017. *Imagem 2960 x 948: Temperatura de cor*. [Online] Available at: <http://avantlux.com.br/noticias/temperatura-de-cor/> [Acesso em 2019].

Axt, R. & Brückmann, M. E., 1989. O conceito de calor nos livros de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, p. 128 a 142.

Barreira, E. S. B. M., 2004. *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*, Porto: FEUP.

Bastos, G. et al., 2019. *Mais Física: Física e Química A - Física - 11º ano de escolaridade: Subdomínio 6, Ondas Eletromagnéticas*. Livro on-line ed. Santillana del Mar: Santillana.

Bauer, E., Castro, E. K. d. & Silva, M. d. N. B. d., 2015. *Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília*. Brasília-DF: Universidade de Brasília - UnB.

Bauer, E. & Leal, F. e. C. B., 2013. Condicionantes das medições termográficas para Avaliação da Temperatura em Fachadas. *Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 10ª Edição*, 7 a 9 maio.

Bauer, E. & Pavón, E. D. L. F., 2014. *Critérios para aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias de fachadas de edifícios*. Salvador-BA: Anais do 1º Encontro luso-brasileiro de degradação em estruturas de concreto armado.

Bôas, N. V., Doca, R. H. & Biscuola, G. J., 2016. *Física Volume 2: termologia, ondulatória, óptica..* 3ª ed. São Paulo: Saraiva.

Bonjorno, J. R. et al., 2013. *Física: Termologia, Óptica, Ondulatória*. 2ª ed. São Paulo: FTD.

Brasil, 2017. *Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil - RBAC-E nº 94*. Brasília-DF: Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC-SAR/SPO.

Caldeira, M. M., 2016. *Aplicação da Termografia Infravermelha para Identificação de Danos na Aderência entre Concreto e Polímero Reforçado com Fibras*. Florianópolis: UFSC.

Canto, D., s.d. *ELGScreen*. [Online]  
Available at: [https://elgscreen.zendesk.com/hc/pt-br/articles/201863184-PIXEL-O-que-%C3%A9-um-pixel-E-um-dead-pixel-pixel-morto-?mobile\\_site=true#:~:text=Pixel%20%C3%A9%20o%20menor%20elemento,pixels%20formam%20a%20imagem%20inteira](https://elgscreen.zendesk.com/hc/pt-br/articles/201863184-PIXEL-O-que-%C3%A9-um-pixel-E-um-dead-pixel-pixel-morto-?mobile_site=true#:~:text=Pixel%20%C3%A9%20o%20menor%20elemento,pixels%20formam%20a%20imagem%20inteira).  
[Acesso em 09 07 2020].

Caramalho, A., 2012. *25 anos em termografia*. 1ª ed. Madrid, Espanha: Bubok.

Carneiro, M., s.d. *Imagem 600 x 260: Dispersão da luz visível por um prisma*, s.l.: s.n.

Carvalho, J. & Rodrigues, E., 2013. *Gestão e organização da coleção digital*. Lisboa, Portugal: Rede de Bibliotecas Escolares – Ministério da Educação e Ciência.

CAU, 2018. *Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil*, Brasília-DF: s.n.

Cheng, C.-C., Cheng, T.-M. & Chiang, C.-H., 2008. Defect detection of concrete structures using both infrared thermography. *Automation in Construction*, 14 05, pp. 87-92.

Chiarello, J. A., 2006. *Ventilação Natural por Efeito Chaminé: estudo em modelo reduzido de pavilhões industriais*, Porto Alegre: UFRGS.

Cimento.org, 2017. *Imagem 690 x 446: Consumo de Cimento no Brasil*, Brasília: O Mundo do Cimento.

CNC, 2015. *Pesquisa de Endividamento e Inadimplência do Consumidor PEIC-2015*, Brasília-DF: Confederação Nacional do Comércio de Bens, Serviços e Turismo.

CONFEA/CREA, 2018. *Conselho Federal de Engenharia e Agronomia*, Brasília-DF: s.n.

Contemp, 2017. *Tabela de Emissividades thermoMETER us.indd*. [Online] Available at: [https://contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela\\_de\\_Emissividades.pdf](https://contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf) [Acesso em 2019].

Cortizo, E. C., 2007. *Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações*. Belo Horizonte-MG: Universidade Federal de Minas Gerais.

Costa, S. S. d., 2014. *Princípios físicos do sensoriamento remoto da atmosfera: Aula 1 - 40 Slides*. Recife: XVIII CBMET - Congresso Brasileiro de Meteorologia.

Curityba, A. G. d. S., Santos, R. A. T., Alves, F. D. P. & Filho, J. d. A., 2018. Atenuação atmosférica da Radiação Infravermelha: Influência de elevados níveis higrométricos no desempenho operacional de mísseis ar-ar. *Anais do IX Simpósio de Guerra Eletrônica do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA)*.

Daum, s.d. *Imagem: Representação tridimensional do sistema calorimétrico circular do sistema de cores da CIE-Lab*, Jeju, Coréia do Sul: Kakau Corp.

Dhar, N. K., Dat, R. & Sood, A. K., 2013. *Optoeletrônica - Materiais e Dispositivos Avançados*. 2ª ed. London: IntechOpen.

Direct Industry, s.d. [Online]  
Available at: <https://www.directindustry.com/pt/prod/sorem/product-40716-1842325.html>

[Acesso em 29 MAIO 2020].

DJI, 2016. *Zenmuse Z30 Quick Start Guide*. China: DJI.

Dornelles, K. A., 2008. *Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA*. Campinas: UNICAMP.

FAPESP, 2017. Dados: Aumento Expressivo de Engenheiros. *Revista Pesquisa*, Abril.Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (254).

Farias, R. D., 2016. *Espaço de cores, morfologia matemática e extração de feições*, Recife: Universidade Federal do Recife.

Feltre, R., 2004. *Química*. 6ª ed. São Paulo: Moderna.

FGV, 2008. *Imagem 600 x 260: A supremacia da classe C*, Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas.

Flir, 2013. *Manual do utilizador FlirTools+*. Wilsonville, USA: Flir.

Flir, 2016. *Guidebook 8 things engineers should know about thermal imaging*. Wilsonville, EUA: Flir systems.

Flir, 2017. *Manual do utilizador Série Flir Cx*. s.l.:Flir.

Flir, 2018. *FLIR ONE Pro-Series: Termografia de nível profissional para su smartphone*. Wilsonville(Oregon): Flir systems.

Fluke, 2007. *Termovisores Fluke Série TiR*. Washington, USA: Fluke.

Fluke, 2013. *Manual do usuário Ti200, Ti300, Ti400, Ti450, Ti450SF6, Ti480 Thermal Imagers*. Washington, USA: Fluke.

Frota, A. B. & Schiffer, S. R., 2001. *Manual de Conforto Térmico*. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel.

Garcia, J. & Fontes, P., 2007. Termografia de Infravermelhos Aplicada a Instalações de Refrigeração. *IV Congresso Ibérico, II Congresso Iberoamericano de Ciências e Técnicas do Frio, CYTEF*, Issue 2007.

Getrotech, 2017. *Termografia*. [Online]  
Available at: <http://www.getrotech.com.br/Artigos/termografia/>  
[Acesso em 20 Abril 2019].

Getrotech, s.d. *Imagem: Inspeção termográfica através de janela de infravermelho*. [Online]  
Available at: <https://www.getrotech.com.br/loja/teste-medicao/eletrica-eletronica/janelas-de-inspecao-termografica/flk-050-clkt-janela-de-infravermelho-do-fluke-cv201-clirvur-50-mm-2-pol.html>  
[Acesso em 29 MAIO 2020].

Gomes, H. A. d. S., 2008. *Influência do não preenchimento das juntas verticais no comportamento mecânico das paredes de alvenaria*. Porto, Portugal: Universidade do Porto.

Gregio, N. d. O., 2016. *Termodinâmica, um tutorial para entendimento do conceito de entropia*, São Carlos: UFSCar.

Guimarães, T. L. B., 2016. *Determinação da cor do solo pela Carta de Munsell e por calorimetria*. Brasília: UnB.

Hart, J. M., 1992. *A practical guide to infra-red thermography for building surveys*. 2ª Reimpressão da 1ª ed. Watford, Inglaterra: BRE.

Hielscher, 2020. *Non-Destructive Crack Detection by Ultrasound-Thermography*. [Online]  
Available at: <https://www.hielscher.com/non-destructive-crack-detection-by-ultrasound-thermography.htm>

Holst, G. C., 2000. *Common Sense to Approach to Thermal Imaging*. Washington, USA : JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press.

Ibarra-Castanedo, C., Sfarra, S., Genest, M. & Maldague, X., 2015. Infrared Vision: Visual Inspection Beyond the Visible Spectrum. Em: *ntegrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection*. Basingstoke, Reino Unido: Springer, p. 41 a 58.

IBGE, 2017. *Um quarto da população vive com menos de R\$ 387 por mês*, Rio de Janeiro-RJ: Agência IBGE Notícias.

INMET, 2020. *Dados da estação meteorológica automática A702, latitude -20,447195, longitude: -54,722615, altitude: 528,47 m*. Campo Grande-MS: Instituto Nacional de Meteorologia.

INPE, 2020. *Estação de Campo Grande - Climatologia Local*. [Online] Available at: [http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/campogrande\\_clima.html](http://sonda.ccst.inpe.br/estacoes/campogrande_clima.html) [Acesso em 13 08 2020].

ISO, 1998. *International Standart ISO 13.006/1998(E) - Ceramic tiles — Definitions, classification, characteristics and marking*. Genebra, Suíça: International Organization for Standardization.

Israel, M. C., 2016. *Ensaio não destrutivo aplicados à avaliação e controle de revestimentos de argamassa*. São Paulo: Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

Knoll, G. F., 2010. *Radiation Detection and Measurement*. 4<sup>a</sup> ed. Nova Jersey: John Wiley & Sons.

Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P. & Kalogirou, S. A., 2014. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, Issue 134, p. 531 a 549.

Lamberts, R., s.d. *Desempenho Térmico de Edificações. UFSC: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações*. [Online] Available at: <http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Aula-Desempenho%20termico%20paredes%20e%20coberturas.pdf> [Acesso em 2020].

Larsen, S. F. & Hongn, M., 2012. Termografía infrarroja en la edificación: Aplicaciones cualitativas. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Volume 16, p. 25 a 32.

Lima, T. B., 2014. *Análise de Desempenho Térmico de Edificações: desenvolvimento de interface BIM para avaliações automatizadas segundo as normas ABNT NBR 15575 e ABNT NBR 15220*, Curitiba: UFPR.

Lyra, W. d. S., 2008. *Espectrometria de emissão em chama baseada em imagens digitais*. João Pessoa-PB: Universidade Federal da Paraíba.

Maldague, X., 2000. *Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation*. Quebec, Canadá: Université Laval.

Martini, G., Spinelli, W., Reis, H. C. & Sant'Anna, B., 2016. *Conexões com a Física 2: Estudo do calor, óptica geométrica e fenômenos ondulatórios*. 3ª ed. São Paulo: Moderna.

Mastelini, S. M., 2015. *Método automatizado para determinação de cor em carne de frango e normalização de efeitos de luminosidade*. Londrina-PR: Universidade Estadual de Londrina.

Mendonça, L., Amaral, M. & Catarino, P., 2013. *A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios*, Lisboa: Spy Building.

MetaLaser, 2019. *MetaLaser*. [Online] Available at: <http://pt.meta-laser.com/> [Acesso em 25 05 2019].

Mortara, B., 2015. *Processos Gráficos e a NBR 16.936-1: avaliação da consistência colorimétrica*. São Paulo: USP.

MRA, 2011. *Thermal imaging guidebook for building and renewable energy applications*. 1ª ed. Porto Salvo, Portugal: MRA Instrumentação.

MTb, 1978. *NR-12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos*. Aprovada pela Portaria MTb n° 3.214, de 8 de junho de 1978, última atualização dada pela Portaria MTb n° 1.083, de 18 de dezembro de 2018. Brasília: Diário Oficial da União.

Nascimento, M. L. M., 2014. *Utilização de drone e termografia na detecção de manifestações patológicas em edificações*. Brasília-DF: Universidade Católica de Brasília - UCB.

Nussenzveig, H. M., 2014. *Curso de Física Básica: Ótica, Relatividade e Física Quântica*. 2ª ed. São Paulo: Blucher.

OlharDigital, 2018. *Confira 8 mitos e verdades sobre a duração da bateria do smartphone*. [Online]

Available at: <https://olhardigital.com.br/noticia/confira-8-mitos-e-verdades-sobre-a-duracao-da-bateria-do-smartphone/76340>

[Acesso em 31 07 2020].

Oliveira Filho, K. d. S. & Saraiva, M. d. F. O., 2014. *Astronomia e Astrofísica*. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS.

Oliveira, G. F. P. d., 2013. *Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias associadas à umidade*. Porto: Universidade do Porto.

Oliveira, R. G. D., 2017. *Equalização e segmentação de imagens termográficas aplicadas à metodologia de inspeção de isoladores poliméricos*. Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

Oliveira, R. & Silva, A., 2014. *William Herschel, os raios invisíveis e as primeiras ideias sobre radiação infravermelha*, São Paulo: Revista Brasileira de Ensino de Física.

Pávon De La Fé, E., 2017. *Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho*, Brasília: UnB.

Pedra, S. A., 2011. *Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural*. Belo Horizonte-MG: Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG.

Pena, S. M., 2011. *Manual Prático PROCEL: Sistemas de ar condicionado*. 1ª ed. Rio de Janeiro: PROCEL.

Pencheva, T., Pulov, D., Gyoch, B. & Nenkov, M., 2006. *Imagem 266 x 339: Design of CCD Optical System for Thermal IR Spectral Region*. s.l.:s.n.

Pereira, L. B., Vale, C. P. & Venceslau, R., 2017. *Imagens Multiespectrais e Termográficas Aplicadas ao Estudo de Património Arquitectónico. Anais do Congresso da Reabilitação do Património (CREPAT/2017)*, p. 205 a 214.

Pereira, R. d. S. & Nunes, A. B., 2013. Influência da nebulosidade na atenuação atmosférica na cidade de Pelotas-RS: um estudo de caso. *Revista Ciência e Natura, revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM*, Issue Especial de Dezembro: VIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, p. 569 a 572.

Ponzoni, F. J. et al., 2015. *Calibração de sensores orbitais*. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.

Protolab, 2019. *Laboratório de Propriedades Termofísicas e Prototipação: Tabela de condutividade térmica de materiais de construção*. [Online] Available at: <http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm> [Acesso em 2019].

Ramalho Júnior, F., Ferraro, N. G. & Soares, P. A. d. T., 2007. *Os Fundamentos da Física 2*. 9ª ed. São Paulo: Moderna.

Ramalho Júnior, F., Ferraro, N. G. & Soares, P. A. d. T., 2015. *Física: Os fundamentos da Física - Parte I*. 11ª ed. São Paulo: Moderna.

Righi, C., s.d. *Carlosrighi*. [Online] Available at: <http://carlosrighi.com.br/177/PRODU%C3%87%C3%83O%20GR%C3%81FICA%20121/Textos%20de%20Apoio/Imagem%20Digital%20-%20completo.pdf> [Acesso em 09 07 2020].

Rogalski, A., 2002. Infrared Detectors: an overview. *Infrared Physics & Technology*, Issue 43, p. 187 a 210.

Sales, R. d. B. C., 2008. *Estudo de compostos de cimento portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia*. Belo Horizonte-MG: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

Sampaio, J. L. & Calçada, C. S., 2001. *Universo da Física 2*. 1 ed. São Paulo: Saraiva.

Sampaio, J. L. & Calçada, C. S., 2005. *Universo da Física 3*. 2 ed. São Paulo: Saraiva.

Santana, C. F., 2005. *Reconstrução do espaço de cores em pacientes com discromatopsia adquirida: diabéticos tipo 2 e intoxicados por vapor de mercúrio*. São Paulo: USP.

Santos, E. I. d., 2013. *Comparação de métodos para medição de absorvância solar em elementos opacos*. Florianópolis-SC: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Santos, L. d., 2006. *Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas*. Itajubá-MG: Universidade Federal de Itajubá.

Santos, L. d., 2012. *Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados*. Itajubá-MG: Universidade Federal de Itajubá.

Santos, M. A., 2019. *Transparentes, Translúcidos e Opacos*, Goiânia: Brasil Escola.

SI T-IR, 2005. *Termografia - Janelas Infravermelhas - Média Tensão: Precauções e orientação aos efeitos de escolher a janela adequada*. [Online] Available at: [http://www.termografia.com/imagenes\\_br/img\\_janelas\\_infravermelhas/Transmissao\\_Janelas\\_Infravermelhas.pdf](http://www.termografia.com/imagenes_br/img_janelas_infravermelhas/Transmissao_Janelas_Infravermelhas.pdf) [Acesso em 2019].

Silva, C. X. d. & Filho, B. B., 2016. *Física aula por aula: Termologia, Óptica e Ondulatória 2*. 3ª ed. São Paulo: FTD.

Silva, L. G. T., 2016. *Reprodução do Experimento de Herschel para Detecção de Infravermelho*, Florianópolis: UFSC.

Silva, M. A. V., 2005. *Meteorologia e climatologia*. 3ª Edição (versão digital) ed. Recife: INMET.

Silva, M. F. F. d., 2007. Esclarecendo o significado de "cor" em física. *Física na Escola*, 8(1), pp. 25-26.

Silva, M. M. d. A., 2003. *Diretrizes para o projeto de alvenaria de vedação..* São Paulo-SP: Universidade de São Paulo.

Silva, V. M. d. A., 2014. *Termografia ativa pulsada aplicada a juntas compósitas laminadas*. Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

Smith, A. R., 1978. Color Gamut Transform Pairs. *SIGGRAPH*, 19 12.

Soares, T. C. R., 2014. *Termografia na avaliação do desempenho higrotérmico de edifícios - análises de sensibilidade*, Viseu: Instituto Politécnico de Viseu.

Sousa, L. F. R. d., 2010. *Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios*. Aveiro: Universidade de Aveiro.

Stefenon, S. F., 2015. *Estudo das Técnicas de Inspeção de Redes de Distribuição para Identificação e Classificação de Defeitos em Isoladores Através do Uso do Ultrassom*, Blumenau: FURB.

Teixeira, G. G. D., 2012. *Confiabilidade metrológica em termografia aplicada em sistemas elétricos*. Belo Horizonte, MG: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

Testo, 2009. *Guia de bolso Testo para termografia: teoria, aplicação, prática, dicas e truques*. 1ª ed. Campinas-SP: Testo.

Toselli, J. E., 2020. *Vídeo: O que é MFOV? Como calcular o MFOV e sua importância na Termografia Industrial*. [Online]  
Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=KtAii3MpN98&t=51s>

UFRGS, s.d. *Centro de referência para o ensino de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*. [Online]  
Available at: <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=se-as-cores-basicas-sao-azul-amarelo-e-vermelho-por-que-as-tvs-utilizam-o-verde>  
[Acesso em 21 6 2020].

Usamentiaga, R. et al., 2014. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing. *Sensors*, 10 Julho.

USP, 2015. *Relatório Engenhariadata 2015: Formação e Mercado de Trabalho em Engenharias no Brasil*, São Paulo-SP: Observatório da Inovação e Competitividade - Núcleo de Apoio à Pesquisa da USP.

USP, 2019. *Princípios físicos do sensoriamento remoto. Disciplina PMI 3331, Geomática aplicada à Engenharia de Petróleo - 41 Slides*. São Paulo: Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.

Vavilov, V., 2014. Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing. *NDT & E International*, 23 01, Volume 61, pp. 16-23.

Veratti, A. B., 2015. *As paletas e a interpretação visual de termogramas*. São Paulo-SP: Termonautas.

Walker, H. R., 2006. *Fundamentos de Física 2 - Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. 7<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC.

## **APÊNDICES**

**Apêndice A: método de cálculo do IFOV**

Deseja-se saber o valor IFOV de uma câmera termográfica na operação a 3 m de distância do objeto, cujas características técnicas, dadas pelo fabricante, são:

Resolução (*pixels*): 320 x 240

FOV (em graus): 45 x 34

Cálculo:

$$IFOV = \frac{FOV}{Pixel} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \frac{0,0174533}{1000} = 2,45 \text{ mRad}$$

$$HFOV = L \cdot \tan\left(FOV_H \frac{\pi}{180^\circ}\right) = 3 \cdot \tan\left(45 \frac{\pi}{180^\circ}\right) = 3 \text{ m}$$

$$VFOV = L \cdot \tan\left(FOV_V \frac{\pi}{180^\circ}\right) = 3 \cdot \tan\left(34 \frac{\pi}{180^\circ}\right) = 2,02 \text{ m}$$

*Calculadora em radianos*

Como resultado, verifica-se que a uma distância de 3 m do objeto/alvo o ângulo de abertura do campo de visão do sensor será de 2,45 mRad, o que permite enquadrar objetos com dimensões de até 3 m de largura por 2 m de altura. A Figura 77 ilustra o calculado.

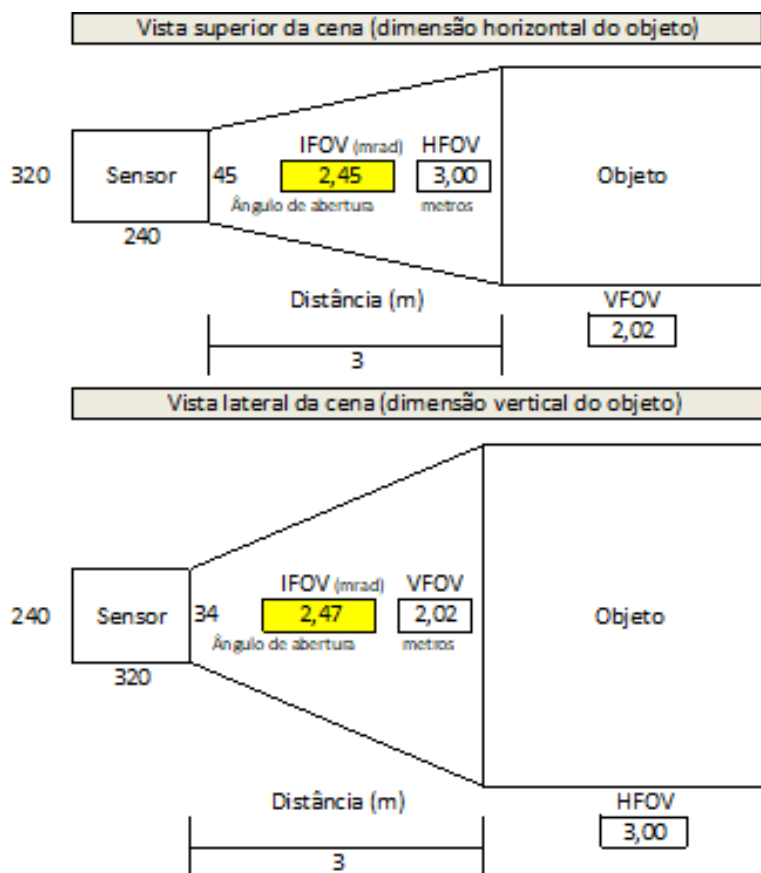


Figura 77 – Cálculo do IFOV e da máxima dimensão do objeto.  
Fonte: o autor.

**Apêndice B: método de cálculo da máxima distância câmera/objeto**

Deseja-se saber a máxima distância entre a câmera e o objeto que permite o perfeito enquadramento na mira da câmera de um alvo existente nesse objeto de dimensões 2,2 x 2,2 cm. As características técnicas da câmera, dadas pelo fabricante, são:

Resolução (*pixels*): 320 x 240

FOV (em graus): 45 x 34

MFOV: 3

Cálculo:

$$L = \frac{\frac{H_{Alvo} \cdot 10}{MFOV}}{1000 \cdot \tan\left(\frac{FOV_H \frac{\pi}{180^\circ}}{Pixel}\right)} = \frac{\frac{2,2 \cdot 10}{3}}{1000 \cdot \tan\left(\frac{45 \frac{\pi}{180^\circ}}{320}\right)} = 3 \text{ m}$$

$$MPixel = L \cdot 1000 \cdot \tan\left(\frac{FOV_H \frac{\pi}{180^\circ}}{Pixel}\right) = 3 \cdot 1000 \cdot \tan\left(\frac{45 \frac{\pi}{180^\circ}}{320}\right) = 7,4 \text{ mm}$$

*Calculadora em radianos*

Como resultado, verifica-se que para enquadrar um alvo de 2,2 x 2,2 cm na mira radiométrica da câmera termográfica do exemplo, a máxima distância entre a câmera e o objeto deve ser de 3 m e a projeção de cada pixel da matriz MFOV do sensor no alvo ocupa uma área de 7,4 x 7,4 mm. A Figura 78 ilustra o calculado.

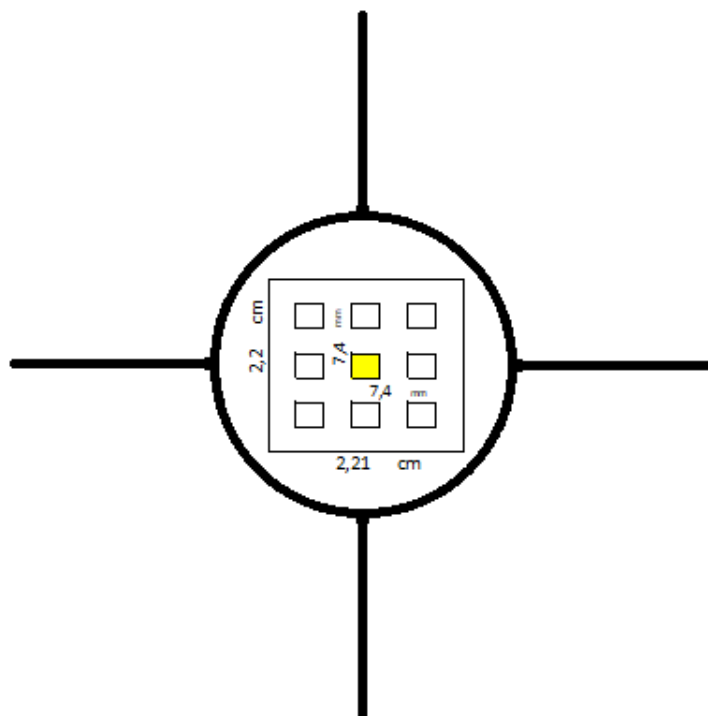


Figura 78 – Cálculo da máxima distância entre a câmera e o alvo no objeto.  
Fonte: o autor.

## **ANEXOS**

## **Anexo A: Principais normas técnicas do emprego da termografia**

Todas as normas técnicas listadas nesta seção foram pesquisadas no site ABNTCatálogo: Segurança, Qualidade, Padrão e Confiança, disponível na URL <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>, acessado em 03 JUL 2020. ABNT – Catálogo é um serviço *on-line* permanente da Associação de Normas Técnicas Brasileiras para consulta pública de normas técnicas, em vigor, substituídas e canceladas, de autoria da própria ABNT e das seguintes entidades irmãs:

- ✓ ISO – *Organização Internacional de Normalização*, Genebra, Suíça;
- ✓ IEC – *International Electrotechnical Commission*, Genebra, Suíça;
- ✓ DIN – *Deutsches Institut für Normung*, Berlim, Alemanha;
- ✓ BSI – *British Standard Institution*, Londres, Reino Unido;
- ✓ AFNOR – *Association Française de Normalisation*, Paris, França;
- ✓ AENOR – *Asociación Española de Normalización y Certificación*, Madrid, Espanha;
- ✓ AMN – Associação Mercosul de Normalização, São Paulo, Brasil;
- ✓ JIS – Normas industriais japonesas, Tóquio, Japão;
- ✓ ASTM – *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, Estados Unidos;
- ✓ ASME – *American Society of Mechanical Engineers*, Nova York, Estados Unidos;
- ✓ API – *American Petroleum Institute*, Washington, Estados Unidos;
- ✓ IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*, Piscataway, Estados Unidos; e
- ✓ NFPA – *National Fire Protection Association*, Quincy, Estados Unidos.

### **A.1 Relação das principais normas técnicas brasileiras:**

1. ABNT NBR 15424/2016 Ensaios não destrutivos — Termografia — Terminologia;
2. ABNT NBR 15572/2013 Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos;
3. ABNT NBR 15718/2009 Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para verificação de termovisores;

4. ABNT NBR 15763/2009 Ensaaios não destrutivos — Termografia — Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência;
5. ABNT NBR 15866/2010 Ensaaios não destrutivos — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos;
6. ABNT NBR 16292/2014 Ensaaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas;
7. ABNT NBR 16485/2016 Ensaaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da emissividade utilizando câmeras termográficas ou radiômetros;
8. ABNT NBR 16554/2016 Ensaaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da transmitância de um meio atenuante utilizando câmeras termográficas; e
9. ABNT NBR 16818/2020 Ensaaios não destrutivos — Termografia infravermelha — Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha.

## **A.2 Relação de normas técnicas estadunidenses:**

1. ASNT SNT-TC-1A/2020 *Standard Topical Outlines for Qualification of Nondestructive Testing Personnel* (Prática padrão de tópicos gerais para qualificação do pessoal de teste não destrutivo);
2. ASTM C1046:2009/2013 *Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components*. (Prática padrão para medição *in situ* do fluxo de calor e temperatura na construção de componentes de envelopes);
3. ASTM C1060:11a/2015 *Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings*. (Prática padrão para inspeção termográfica de instalações de isolamento em cavidades de envelopes de estruturas);
4. ASTM C1153:10/2015 *Standard practice for locating wet insulation in roofing systems using infrared images*. (Prática padrão para localização de

- isolamento úmido em sistemas de coberturas usando imagens de infravermelho);
5. ASTM D4788/2013 *Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography*. (Método de Teste Padrão para Detecção de Delaminações em Decks de Ponte Usando Termografia Infravermelha);
  6. ASTM E1933:14/2018 *Standard practice for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers*. (Prática padrão para medir e compensar a emissividade usando radiômetros de imagem infravermelha);
  7. ASTM E1934:99a/2018 *Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography*. (Guia padrão para o exame de equipamentos elétricos e mecânicos com termografia infravermelha);
  8. ASTM E2533:17e1/2017 *Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications*. (Guia padrão para testes não destrutivos de compósitos de matriz polimérica usados em aplicações aeroespaciais);
  9. ASTM E2582/2019 *Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications*. (Prática padrão para termografia por *flash* infravermelho de painéis compostos e remendos de reparo usados em aplicações aeroespaciais); e
  10. ASTM E3045/2016 *Standard Practice for Crack Detection Using Vibroacoustic Thermography*. (Prática padrão para detecção de trincas usando termografia vibroacústica).

### **A.3 Relação das principais normas técnicas europeias:**

1. EN 13187/1999 *Thermal performance of buildings — Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes — Infrared method (ISO 6781/1983, modified)*. (Desempenho térmico de edifícios — Detecção qualitativa de irregularidades térmicas em envelopes de edifícios — Método infravermelho (ISO 6781/1983, modificado));

2. EN 16714-1/2017 *Non-destructive tests — Thermographic tests — Part 1: General principles*. (Ensaio não destrutivo — Ensaio termográfico — Parte 1: Princípios gerais);
3. EN 16714-2/2017 *Non-destructive tests — Thermographic tests — Part 2: Equipment*. (Ensaio não destrutivo — Ensaio termográfico — Parte 2: Equipamento);
4. EN 16714-3/2017 *Non-destructive tests — Thermographic tests — Part 3: Terms and definitions*. (Ensaio não destrutivo — Ensaio termográfico — Parte 3: Termos e definições);
5. EN 17119/2019 *Non-destructive tests — Thermographic tests — Active thermography*. (Ensaio não destrutivo — Ensaio termográfico — Termografia ativa);
6. EN 1767/1999 *Products and systems for protection and repair of concrete structures — Test methods — Infrared analysis*. (Produtos e sistemas para proteção e reparo de estruturas de concreto — Métodos de teste — Análise infravermelha);
7. IEC/TS 62446-3/2017 *Photovoltaic (PV) systems — Requirements for testing, documentation and maintenance — Part 3: Photovoltaic modules and plants — Outdoor infrared thermography*. (Sistemas fotovoltaicos (PV) — Requisitos para testes, documentação e manutenção — Parte 3: Módulos e instalações fotovoltaicas — Termografia por infravermelho ao ar livre);
8. ISO 10878/2013 *Non-destructive testing — Infrared thermography — Vocabulary*. (Ensaio não destrutivo — Termografia por infravermelho — Vocabulário);
9. ISO 18251-1/2017 *Non-destructive testing — Infrared thermography — Part 1: Characteristics of system and equipment*. (Ensaio não destrutivo — Termografia por infravermelho — Parte 1: Características do sistema e equipamento);
10. ISO 18434-1/2008 *Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures*. (Monitoramento de condições e diagnóstico de máquinas — Termografia — Parte 1: Procedimentos gerais);
11. ISO 18434-2/2019 *Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Thermography — Part 2: Image interpretation and diagnostics*.

- (Monitoramento e diagnóstico de condições de sistemas de máquinas — Termografia — Parte 2: Interpretação e diagnóstico de imagens);
12. ISO 18436-7/2014 *Condition monitoring and diagnostics of machines — Requirements for qualification and assessment of personnel — Part 7: Thermography*. (Monitoramento de condições e diagnóstico de máquinas — Requisitos para qualificação e avaliação de pessoal — Parte 7: Termografia);
  13. ISO 6781/1983 *Thermal insulation — Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes — Infrared method*. (Isolamento térmico — Detecção qualitativa de irregularidades térmicas em envelopes de edifícios — Método infravermelho);
  14. ISO 6781-3/2015 *Performance of buildings — Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods — Part 3: Qualifications of equipment operators, data analysts and report writers*. (Desempenho de edifícios — Detecção de irregularidades de calor, ar e humidade em edifícios por métodos de infravermelho — Parte 3: Qualificações de operadores de equipamentos, analistas de dados e redatores de relatórios);
  15. ISO 9712/2012 *Non-destructive testing — Qualification and certification of NDT personnel*. (Ensaios não destrutivos — Qualificação e certificação do pessoal de END);
  16. ISO 9869-1/2014 *Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method*. (Isolamento térmico — Elementos do edifício — Medição *in situ* da resistência térmica e da transmitância térmica — Parte 1: Método do medidor de fluxo de calor); e
  17. ISO/TS 11774/2011 *Non-destructive testing — Performance-based qualification*. (Ensaios não destrutivos — Qualificação baseada no desempenho).

## Anexo B: Exemplos de paletas de cores utilizadas pela Flir

Na paleta *White Hot*, que em alguns dispositivos recebe o nome de *Gray*, os pontos claros são os mais quentes, os pontos escuros são os mais frios. É útil quando há uma ampla variação de temperatura no mesmo ambiente. A Figura B1 ilustra esta paleta.

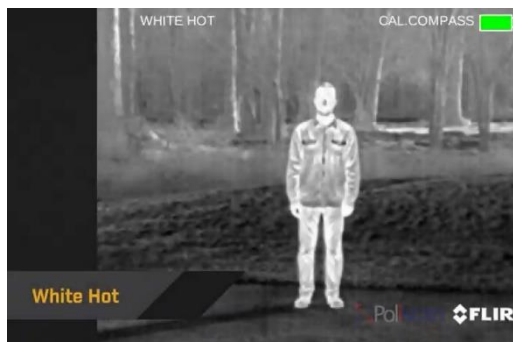


Figura 79 – Paleta *White Hot*.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=3ceSfF27L7I&feature=youtu.be>

Na paleta *Black Hot* os pontos escuros são os mais quentes, os pontos claros são os mais frios. É útil para detalhar formas com realismo, especialmente no período da noite. A Figura B2 ilustra esta paleta.



Figura 80 – Paleta *Black Hot*.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=3ceSfF27L7I&feature=youtu.be>

A paleta *Rainbow High Contrast* usa múltiplas cores para exibir diferenças minuciosas de temperatura. É indicada para inspeções onde se busca grande nível de detalhamento. A Figura B3 ilustra esta paleta.



Figura 81 – Paleta *Rainbow High Contrast*.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=3ceSfF27L7I&feature=youtu.be>

A paleta *Ironbow* também usa múltiplas cores para exibir o gradiente de temperatura, mas enfatiza o brilho como forma de enfatizar os pontos de calor mais intenso nos objetos. De tal forma, o contraste permite perceber com rapidez pontos mais quentes, sobretudo em um cenário com fundo frio. A Figura B4 ilustra esta paleta.

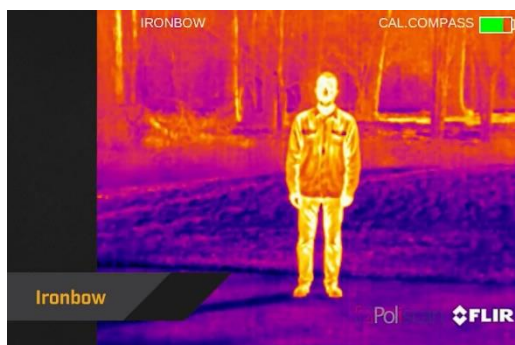


Figura 82 – Paleta *Ironbow*.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=3ceSfF27L7I&feature=youtu.be>

Na paleta *Sepia* os pontos amarelos são os mais quentes, os pontos escuros são os mais frios. É mais suave aos olhos, o que ajuda em processos longos de monitoramento. A Figura B5 ilustra esta paleta.



Figura 83 – Paleta *Sepia*.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=3ceSfF27L7I&feature=youtu.be>

Na paleta *Arctic* os pontos alaranjados, com bordas bem definidas, são os mais quentes, os pontos azulados são os mais frios. A Figura B6 ilustra esta paleta.



Figura 84 – Paleta *Arctic*.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=3ceSfF27L7I&feature=youtu.be>

A paleta *Outdoor Alert* é uma paleta mais seletiva, ela destaca em laranja apenas os pontos que apresentem os 10% maiores gradientes de temperatura do campo de visão da câmera, o restante é apresentado em tons de cinza. É indicada para inspeções em que se deseja verificar apenas os pontos mais quentes da cena. A Figura B7 ilustra esta paleta.



Figura 85 – Paleta *Outdoor Alert*.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=3ceSfF27L7I&feature=youtu.be>

### **Anexo C: Registros mínimos para relatórios de inspeções termográficas**

A ABNT NBR 15572: Ensaios não destrutivos – Termografia – Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos, lista os seguintes registros mínimos que deve conter o relatório de inspeção feito por termografista:

- ✓ identificação do equipamento e componente inspecionado;
- ✓ condições operacionais do equipamento;
- ✓ especificação do termovisor utilizado (fabricante e modelo do termovisor, com suas características essenciais e data de calibração);
- ✓ modelo e data de calibração do termo-higroanemômetro e demais instrumentos auxiliares porventura utilizados;
- ✓ descrição dos parâmetros de ensaio utilizados (emissividade, temperaturas ambiente, atmosférica e refletida, velocidade do vento, humidade relativa do ar);
- ✓ registro de qualquer meio atenuante, como janelas infravermelhas, filtros ou quaisquer outros;
- ✓ data e horário de início e fim da inspeção;
- ✓ nome e identificação dos executantes da inspeção;
- ✓ nome e identificação do usuário final;
- ✓ número da ordem de serviço e/ou permissão de trabalho;
- ✓ registro dos resultados, contendo os termogramas com a indicação das anomalias e correspondente registro fotográfico;
- ✓ diferença entre a temperatura da anomalia e a temperatura de uma referência;
- ✓ motivo da não inspeção de um determinado equipamento (por exemplo, não inspecionado/desligado, não inspecionado/sem carga, não inspecionado/em reparo, não inspecionado/manobra não realizada pela operação etc.); e
- ✓ recomendação das ações corretivas ou ensaios complementares.

## **Anexo D: Conhecimento e habilidades esperadas do termografista**

A ISO 6781-3/2015, norma de qualificações de operadores de equipamentos, analistas de dados e redatores de relatórios, classifica o pessoal de termografia em três classes, segundo os conhecimentos e habilidades esperadas, a seguir relacionadas.

### **D.1 Termografista Classe I**

- ✓ Aplicar uma técnica específica de medição termográfica;
- ✓ Ter conhecimento, configurar e operar o equipamento de imagem térmica para obter dados termográficos seguros;
- ✓ Impedir, minimizar ou controlar dados ruins e fontes de erro;
- ✓ Realizar detecção básica de falhas, avaliação da gravidade e diagnóstico de acordo com as normatizações;
- ✓ Realizar pós-processamento básico de imagens (ferramentas de medição, ajustes de emissividade, amplitude térmica e escalas de temperaturas);
- ✓ Manter um banco de dados de resultados e tendências;
- ✓ Verificar a calibração dos sistemas de medição termográfica;
- ✓ De acordo com os critérios estabelecidos, avaliar e relatar os resultados dos testes e destacar áreas de preocupação; e
- ✓ Ser capaz de reconhecer e prevenir ou controlar fatores que resultam na aquisição de dados de baixa qualidade (fontes de erro de dados).

### **D.2 Termografista Classe II**

- ✓ Selecionar a técnica apropriada de termografia por infravermelho e entender suas limitações;
- ✓ Aplicar teoria e técnicas da termografia, incluindo medição e interpretação dos resultados da pesquisa;
- ✓ Especificar *hardware* e *software* apropriados;
- ✓ Realizar diagnósticos avançados de irregularidades encontradas durante as investigações termográficas;
- ✓ De acordo com práticas, padrões, regulamentos e estatutos aceitos pelo setor, recomendar ações corretivas apropriadas;
- ✓ Realizar pós-processamento avançado de imagens (imagem, tendência, montagem, subtração, sobreposição e análise estatística de falhas);

- ✓ Usar técnicas avançadas reconhecidas para termografia infravermelha de edifícios e diagnóstico de irregularidades de acordo com procedimentos estabelecidos;
- ✓ Preparar relatórios sobre as condições de construção encontradas, falhas, irregularidades e diagnósticos e recomendar ações corretivas para reparo e correção;
- ✓ Estar ciente do uso de tecnologias alternativas ou suplementares que suportem ou aprimorem a eficácia das investigações termográficas de edifícios; e
- ✓ Orientar e supervisionar o pessoal da Classe I.

### **D.3 Termografista Classe III**

- ✓ Desenvolver e estabelecer programas, procedimentos e instruções termográficas, incluindo a determinação de regimes para monitoramento periódico e contínuo, frequência de testes e uso de técnicas avançadas;
- ✓ Determinar critérios de avaliação e aceitação da severidade para edifícios novos, existentes e reformados;
- ✓ Ser capaz de interpretar e avaliar códigos, normas, especificações técnicas e procedimentos;
- ✓ Designar os métodos, procedimentos, equipamentos e instruções de teste específicos a serem utilizados;
- ✓ Realizar prognósticos para detectar irregularidades de calor, movimento do ar e humidade;
- ✓ Recomendar os métodos apropriados para ações corretivas baseadas em boas práticas da tecnologia da construção;
- ✓ Recomendar o uso de tecnologias alternativas ou suplementares para detecção de calor, ar e irregularidades de humidade nos edifícios por métodos de infravermelho; e
- ✓ Orientar e supervisionar o pessoal da Classes I e da Classe II.

## ÍNDICE REMISSIVO

*- Precursores da termografia moderna –*

Antoine Laurent de Lavoisier	9
Benjamin Thompson	9
Daniel Bernoulli	9
Galileu Galilei	9
Gustav Robert Kirchoff	24, 26, 30
Johannes Kepler	9
Jozef Stefan	24, 26, 27, 28
Ludwig Boltzmann	24, 26, 27, 28
Max Karl Ernst Ludwig Planck	13, 24, 26, 27, 28
Roger Bacon	9
Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien	24, 26, 28
William Herschel	10, 11