

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

HUBERT BRAUN HEMESATH

MODELAGEM TERMOGRÁFICA:

**Uso de fotogrametria em imagens termográficas de edificações para
visualização tridimensional de manifestações patológicas**

São Leopoldo

2022

HUBERT BRAUN HEMESATH

MODELAGEM TERMOGRÁFICA:

**Uso de fotogrametria em imagens termográficas de edificações para
visualização tridimensional de manifestações patológicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Pacheco

São Leopoldo

2022

H488m

Hemesath, Hubert Braun.

Modelagem termográfica: uso de fotogrametria em imagens termográficas de edificações para visualização tridimensional de manifestações patológicas / por Hubert Braun Hemesath. -- São Leopoldo, 2022.

111 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian;

Coorientação: Prof^a. Dr^a. Fernanda Pacheco, Escola Politécnica.

1.Construção civil. 2.Construção civil – Detalhes. 3.Construção de concreto – Deterioração. 4.Edifícios – Manutenção. 5.Radiação infravermelha. 6.Termografia. 7.Fotogrametria. I.Tutikian, Bernardo Fonseca. II.Pacheco, Fernanda. III.Título.

CDU 69

69.059:772.96

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

HUBERT BRAUN HEMESATH

MODELAGEM TERMOGRÁFICA:

**Uso de fotogrametria em imagens termográficas de edificações para
visualização tridimensional de manifestações patológicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 22 / 08 / 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian (orientador) - UNISINOS

Prof^a. Dr^a. Fernanda Pacheco (coorientadora) - UNISINOS

Prof^a. Dr^a. Andrea Parisi Kern (membro) - UNISINOS

Prof. Dr. Reginaldo Macedônio da Silva (membro) - UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo e de todos, a Deus, pela oportunidade e capacidade de realizar este trabalho.

A meus pais e amigos, pelo apoio moral e pela compreensão nos períodos de ausência.

A empresa Destac Serviços, pelo empréstimo do VANT com sensor térmico utilizado neste trabalho, fator decisivo para conclusão do mesmo.

Agradeço também a professora Fernanda Pacheco, pela coorientação neste trabalho.

Por último e igualmente importante, a meu orientador, Bernardo Tutikian, por despertar, ainda na graduação, a paixão pela área de patologia das construções.

Este trabalho também é de vocês.

RESUMO

Há muito se sabe da existência de manifestações patológicas que não podem ser identificadas visivelmente de maneira precoce, como descolamentos de revestimentos cerâmicos de fachadas, quando na parte externa das edificações, e infiltrações, quando na parte interna delas. Essas manifestações interferem, normalmente, no coeficiente térmico dos elementos que compõe a edificação, causando uma discrepância na emissão de radiação infravermelha, podendo ser mensurada em um termograma. Com o objetivo de melhor visualizar e compreender o conjunto de manifestações patológicas, no que tange à temperatura, um ortomosaico composto por diversas imagens termográficas sobrepostas resulta em uma imagem tridimensional em escala termal, que facilita a identificação e mensuração dos defeitos analisados. Através dela, é possível navegar por toda superfície modelada, percebendo as variações colorimétricas de forma isolada ou sistêmica. Para este fim, nesse estudo foram capturadas imagens através de câmeras com sensor infravermelho, de forma ortogonal em relação à superfície registrada, para que pudessem ser processadas no Agisoft Photoscan, *software* de fotogrametria, possibilitando a comparação entre os dados obtidos em campo com o modelo digital de superfície em escala real da edificação a ser estudada. A captura ocorreu com duas câmeras termográficas, FLIR C5 e FLIR A325 e com dois VANTs, DJI Phantom 4 Advanced e DJI Mavic 2 Enterprise Advanced. Após o processamento das imagens, foi obtido um modelo tridimensional da edificação, mantendo as propriedades dimensionais em escala de temperatura, permitindo assim uma fácil leitura e compreensão dos dados para realizar a busca por manifestações patológicas. Os resultados obtidos na comparação entre as medidas das fachadas da edificação deste estudo, adquiridos sobre o projeto e sobre os ortomosaicos IR e RGB, indicam que o processamento fotogramétrico sobre imagens termográficas foi possível, resultando em um modelo com precisão de escala suficiente para realizar medições de distâncias e áreas de manifestações patológicas, com acurácia média de 97,37% no centro do ortomosaico IR e 98,46% no centro do ortomosaico RGB.

Palavras-chave: termografia; radiação infravermelho; patologia das construções; fotogrametria; ensaio não destrutivo.

ABSTRACT

It has long been known about the existence of buildings defects that cannot be visibly identified early, such as detachment of ceramic cladding on facades, when on the outside of buildings, and infiltrations, when on the inside of them. These manifestations usually interfere with the thermal coefficient of the elements that make up the building, causing a discrepancy in the emission of infrared radiation, which can be measured in a thermogram. In order to better visualize and understand the set of pathological manifestations, with regard to temperature, an orthomosaic composed of several superimposed thermographic images results in a three-dimensional image on a thermal scale, which facilitates the identification and measurement of the analyzed defects. Through it, it is possible to navigate throughout the modeled surface, perceiving the colorimetric variations in an isolated or systemic way. For this purpose, in this study, images were captured through cameras with an infrared sensor, orthogonally to the recorded surface, so that they could be processed in Agisoft Photoscan, a photogrammetry software, allowing the comparison between the data obtained in the field with the model full-scale digital surface of the building to be studied. The capture took place with two thermal imaging cameras, FLIR C5 and FLIR A325 and with two UAVs, DJI Phantom 4 Advanced and DJI Mavic 2 Enterprise Advanced. After processing the images, a three-dimensional model of the building was obtained, keeping the dimensional properties in temperature scale, thus allowing an easy reading and understanding of the data to carry out the search for buildings defects. The results obtained in the comparison between the measurements of the facades of the building in this study, acquired on the project and on the IR and RGB orthomosaics, indicate that photogrammetric processing on thermographic images was possible, resulting in a model with sufficient scale accuracy to perform measurements of distances and areas of defects, with an average accuracy of 97.37% in the center of the orthomosaic IR and 98.46% in the center of the orthomosaic RGB.

Key-words: *thermography; infrared radiation; building defects; photogrammetry; non-destructive rehearsal*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escala de comparação de diferentes comprimentos de onda em metros	17
Figura 2 – Onda eletromagnética	18
Figura 3 – Esquema de técnicas da termografia infravermelha	20
Figura 4 – Espectro eletromagnético.....	25
Figura 5 – Correlação entre FOV, IFOV e Distância	27
Figura 6 – Identificação de oxidação da armadura por termografia de IR	29
Figura 7 – Termografia de fachada	30
Figura 8 – Termografia de descolamentos em revestimentos cerâmicos	30
Figura 9 – Fachada de edificação histórica após terremoto	31
Figura 10 – Fissuras identificadas com termografia em prédio histórico após terremoto.	31
Figura 11 – Fissuras mapeadas avaliadas com termografia.	32
Figura 12 – Identificação de vigotas por meio de termografia	33
Figura 13 – Identificação de terças através de termografia.....	33
Figura 14 – Identificação de placas de gesso acartonado e seus suportes por termografia	34
Figura 15 – Identificação de alvenaria com auxílio de termografia.....	34
Figura 16 – Identificação de pilar e viga sobre termografia	34
Figura 17 – Identificação de vigas e pilaretes da platibanda.....	35
Figura 18 – Comparação entre termogramas registrados em diferentes distâncias .	36
Figura 19 – Correlação entre tempo de exposição ao sol com temperatura absorvida para diferentes profundidades da superfície do objeto	37
Figura 20 – Interferências em ensaios termográficos causadas pela potência de radiação emitida pela atmosfera.....	39
Figura 21 – Tipos de interpolação	41
Figura 22 – Obtenção da imagem por laser scanner	43
Figura 23 – Junção das técnicas de laser scanner e termografia IR.....	44
Figura 24 – Geração de imagens.....	45
Figura 25 – Fluxograma metodológico	46
Figura 26 – Edificação A	48
Figura 27 – Edificação B	49
Figura 28 – FLIR A325	50

Figura 29 – FLIR C5.....	51
Figura 30 – Sensor Mavic 2 enterprise advanced	52
Figura 31 – Nuvem de pontos IR resultante do levantamento com a FLIR C5.....	58
Figura 32 – Nuvem de pontos IR resultante do levantamento com a FLIR A325.....	59
Figura 33 – Modelo 3D texturizado parcial.....	59
Figura 34 – Nuvem de pontos IR resultante do levantamento com o M2EA	60
Figura 35 – Nuvem de pontos RGB resultante do levantamento com o M2EA.....	61
Figura 36 – Modelo 3D com textura IR resultante do levantamento com o M2EA	61
Figura 37 – Modelo 3D com textura RGB resultante do levantamento com o M2EA	62
Figura 38 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da cobertura	63
Figura 39 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Oeste	63
Figura 40 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Norte.....	64
Figura 41 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Sul	65
Figura 42 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Leste.....	65
Figura 43 – Sensoriamento remoto no Palácio do Itamaraty	66
Figura 44 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Norte	67
Figura 45 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Norte	67
Figura 46 – Medida de projeto da fachada Norte	68
Figura 47 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Sul.....	68
Figura 48 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Sul.....	69
Figura 49 – Medida de projeto da fachada Sul.....	69
Figura 50 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Leste	70
Figura 51 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Leste	70
Figura 52 – Medida de projeto da fachada Leste	71
Figura 53 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Oeste	71
Figura 54 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Oeste	72
Figura 55 – Medida de projeto da fachada Oeste	72
Figura 56 – Termograma (a) Modelo tridimensional IR(b)	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das edificações estudadas	48
Tabela 2 – Propriedades da câmera utilizada- FLIR A325.....	50
Tabela 3 – Propriedades da câmera utilizada- FLIR C5.....	51
Tabela 4 – Informações sensor	52
Tabela 5 – Condições climáticas do dia 05/04/2022 às 11h	54
Tabela 6 – Condições climáticas do dia 17/04/2022 às 15h	54
Tabela 7 – Identificação dos danos.....	55
Tabela 8 – Resumo das distâncias medidas.....	72
Tabela 9 – Comparativo percentual da diferença de distâncias entre ortomosaicos e projeto	73
Tabela 10 – Identificação de manifestações patológicas sobre termogramas	75
Tabela 11 – Identificação de manifestações patológicas sobre o modelo 3D	76
Tabela 12 – Grau de risco ou danos aos usuários e à edificação	77

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ΔT	Variação de temperatura
3D	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIM	<i>Building Information Modeling</i> (Modelagem de informações da construção)
FOV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão)
GLONASS	<i>Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya Sistema</i> (Sistema de Navegação Global por Satélite)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i> (Campo de Visão Instantâneo)
IFOVm	<i>Measuring Instantaneous Field of View</i>
IR	<i>Infra Red</i> (Infra Vermelho)
IRT	<i>Infra Red Thermography</i> (Termografia Infra Vermelho)
IV	Infra Vermelho
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i> (Detecção e Alcance de Luz)
M2EA	Mavic 2 Enterprise Advanced
MDS	Modelo Digital de Superfície
MIVOV	<i>Measuring Instantaneous Field of View</i>
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
RGB	<i>Red, Green & Blue</i> (Vermelho, Verde e Azul)
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i> (Aeronave Remotamente Pilotada)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 TEMA	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3 PROBLEMA	13
1.4 OBJETIVOS	13
1.4.1 Objetivo Geral	14
1.4.2 Objetivos Específicos	14
1.5 JUSTIFICATIVA	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA	16
2.2 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA (IRT).....	19
2.2.1 Termografia qualitativa e quantitativa	21
2.2.2 Termografia passiva e ativa	22
2.3 CÂMERAS TERMOGRÁFICAS	24
2.3.1 Ajuste de amplitude térmica	28
2.4 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS IDENTIFICÁVEIS POR TERMOGRAFIA ..	29
2.5 ERROS DE MEDIÇÃO	36
2.6 FOTOGRAMETRIA	39
2.6.1 Modelagem de informações da construção – BIM	40
2.6.2 Interpolação de imagens	41
2.6.3 Aerofotogrametria	42
2.7 ESTUDOS COM A CRIAÇÃO DE MODELOS 3D.....	43
3 METODOLOGIA	46
3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	47
3.1.1 Estudo de caso	47
3.2 LEVANTAMENTO TERMOGRÁFICO	49
3.2.1 Dados do levantamento	53
3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS FOTOGRAMÉTRICOS.....	54
3.4 ANÁLISE DO MODELO TERMOGRÁFICO	55
3.4.1 TRATAMENTO DOS DADOS EM SOFTWARE	55
3.5 ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS PATOLÓGICOS	55

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	57
4.1 OBTENÇÃO DOS MODELOS.....	57
4.1.1 FLIR C5.....	57
4.1.2 FLIR A325.....	59
4.1.3 Mavic 2 Enterprise Advanced.....	60
4.1.4 ANÁLISE COMPARATIVA.....	66
4.2 IDENTIFICAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	73
4.2.1 Manifestações patológicas na edificação A.....	74
4.2.2 Manifestações patológicas na edificação B.....	76
4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS	77
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
REFERÊNCIAS.....	82
APÊNDICE A – IMAGENS TERMOGRÁFICAS REGISTRADAS POR VANT M2EA	88
APÊNDICE B – IMAGENS TERMOGRÁFICAS OBTIDAS POR CÂMERA TERMOGRÁFICA FLIR A325.....	98
APÊNDICE C – IMAGENS TERMOGRÁFICAS OBTIDAS POR CÂMERA TERMOGRÁFICA FLIR C5.....	102
APÊNDICE D – ACESSO A TODOS OS ARQUIVOS.....	109
ANEXO A – PLANTA DE PAVIMENTOS DIVERSOS E DETALHES	110
ANEXO B – PLANTA DE SITUAÇÃO, CAIXA DE ÁGUA E COBERTURA	111

1 INTRODUÇÃO

A patologia das construções é a área da engenharia responsável por estudar falhas em edificações que não apresentaram desempenho satisfatório quando confrontadas com os parâmetros previstos em projeto (SOUZA; RIPPER, 1998). Algumas destas manifestações não podem ser diagnosticadas a olho nu, como descolamentos de revestimentos cerâmicos de fachadas e infiltrações, problemas que podem acarretar danos físicos e materiais, para isso, o diagnóstico precoce é fundamental, agregando valor e segurança à edificação (SOUSA et al., 2021).

Uma forma objetiva de se analisar o problema sistematicamente é enxergar a edificação e suas manifestações como um todo, tanto interna quanto externamente, como em um modelo tridimensional. *Softwares* de fotogrametria são recursos disponíveis para unir diversas imagens em um único mosaico que, segundo Hemesath (2019), mantém as características dimensionais e colorimétricas da superfície registrada, permitindo uma análise dimensional das manifestações identificadas.

Segundo Faria (2015), todos os materiais podem emitir calor, que pode ser captado por câmeras sensíveis ao espectro infravermelho de radiação eletromagnética. Esta característica facilita a identificação de manifestações patológicas não visíveis a olho nu, tendo em vista que o próprio defeito poderá interferir na emissividade de calor do substrato alterado. A autora menciona a identificação de fissuras internas, fissuras externas e umidade, como problemas identificáveis com este tipo de equipamento.

No presente estudo, utilizou-se *software* de fotogrametria em imagens termográficas, a fim de criar um modelo tridimensional e diversos ortomosaicos, capazes de reproduzir fiduciarmente a edificação, no espectro de luz infravermelha, assim como em cores visíveis do objeto em estudo, como em processo convencional de fotogrametria, onde são usadas apenas as informações de câmeras RGB. Sobre o levantamento termoaerofotogramétrico, foi avaliada a viabilidade de identificar e mensurar manifestações patológicas com as características supracitadas.

1.1 TEMA

Utilização de termografia associada com fotogrametria de imagens IR para visualização tridimensional da sistemática de manifestações patológicas em edificações.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se pelo levantamento de dados termográficos em campo, processamento das termografias para obter modelo tridimensional da superfície do objeto a ser analisado e avaliação da viabilidade de identificação de manifestações patológicas.

Segundo Júnior (2021), a inspeção predial é um método que, quando executado por profissionais qualificados, atesta ou não a qualidade da edificação avaliada, garantindo o conforto e a segurança dos usuários. A inspeção, no entanto, pode se somar a diferentes ensaios e técnicas de análise, tais como a termografia, visando maior precisão e confiabilidade no processo.

Yastikli & Guler (2013) validaram a utilização de um modelo tridimensional com câmeras termográficas, afirmando que foi possível após calibração e utilização do método que pudessem ser identificadas manifestações patológicas ocorridas na fachada e demais elementos.

1.3 PROBLEMA

Percebe-se a dificuldade de identificar determinadas manifestações patológicas sem a utilização de equipamentos de imageamento, bem como a não compreensão visual do sistema causador do defeito, quando analisado de forma isolada do conjunto da edificação. Assim, questiona-se: é possível o emprego de ferramentas termográficas somadas à criação de modelos tridimensionais como um auxílio no diagnóstico de danos patológicos nas edificações?

1.4 OBJETIVOS

Esse tópico é destinado à descrição dos objetivos desta dissertação, que se dividem em objetivo geral e objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo Geral

Verificar a eficácia da identificação e mensuração de manifestações patológicas através de modelos digitais de superfície processados sobre imagens termográficas de espectro infravermelho.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Coletar dados termográficos em campo no exterior de uma edificação;
- b) Obter dois modelos digitais de superfície através de imagens termográficas com dois diferentes equipamentos;
- c) Comprovar a acurácia da escala kelvin comparando os dois modelos gerados;
- d) Comprovar a acurácia dimensional do modelo 3D, por análise comparativa;
- e) Identificar e classificar os danos patológicos presentes na fachada da edificação analisada.

1.5 JUSTIFICATIVA

Costanzo et al. (2015) citam os benefícios de emprego da técnica de termografia em edificações, citando que diante de tal mecanismo é possível garantir um diagnóstico com maior precisão e confiabilidade, exemplificando que seu uso é pertinente, por exemplo, em edificações históricas.

Não apenas em tais tipos de edificações, mas também em danos presentes nas fachadas, é pertinente. Bauer et al. (2016) apontam, por exemplo, a identificação de fissuras em fachadas como uma possibilidade em tal cenário, tornando clara a identificação de danos muitas vezes não perceptíveis a olho nu.

Considerando o cenário das fachadas, pode-se afirmar que diversos danos patológicos resultam de problemas de aderência entre os materiais, danos decorrentes da presença da umidade e de agentes patológicos, sendo assim, tal elemento pode ter seu diagnóstico mais preciso mediante técnicas de imageamento que possam identificar falhas e a presença de umidade.

Percebe-se assim, uma vasta oportunidade de aplicação desse ferramental. Assim sendo, de posse do apresentado, o presente trabalho se justifica ao identificar

satisfatoriamente as manifestações patológicas das edificações estudadas, exacerbadamente se possível a correta mensuração de temperatura e distância, agregando agilidade no processo de vistoria predial e reduzindo custos, diminuindo tempo e mão de obra para realização dela.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na construção civil, os ensaios não destrutivos podem ser utilizados para o monitoramento do desgaste de pontes, rodovias, aeroportos, portos, edificações habitacionais, industriais, dentre outros. Dentre as diversas aplicações da termografia, destaca-se a identificação de manifestações patológicas, quando estas afetam diretamente a transmitância térmica dos elementos analisados, que segundo de Sena et al. (2020) podem surgir durante o uso da edificação ou terem suas origens nas fases de projeto ou execução.

A termografia infravermelha, ou Infrared Thermography (IRT) segundo de Sena et al. (2020), possui aplicação em diversos materiais e tem seu campo de atuação, na construção civil, voltado para identificação de anomalias ocultas, mensuração da temperatura de elementos, identificação de umidade e outros.

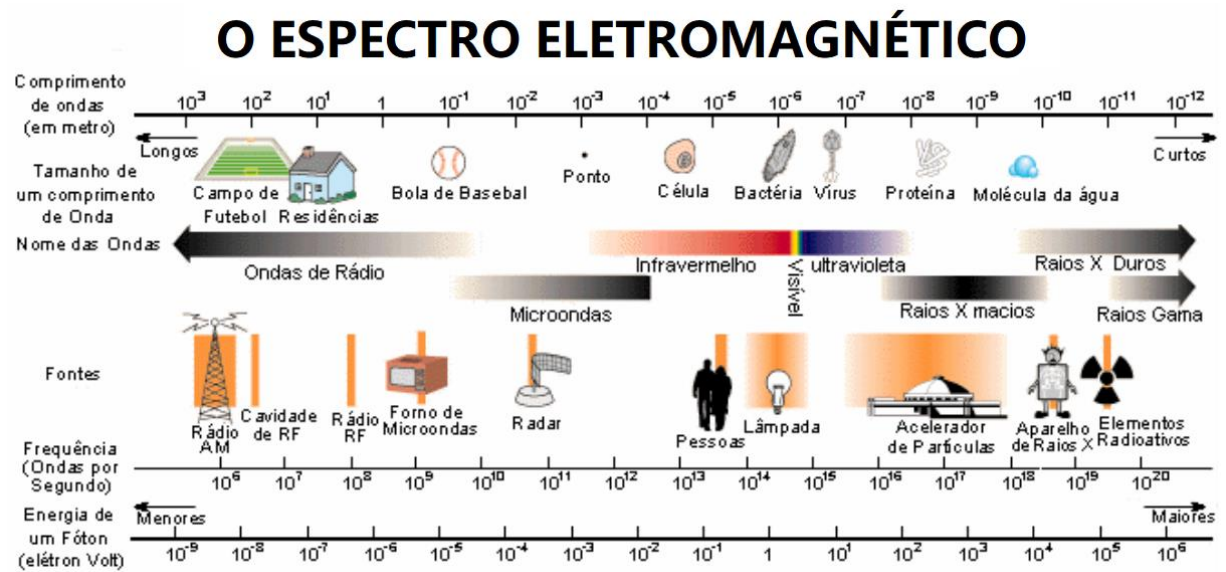
O ensaio termográfico de uma estrutura permite coletar informações sobre elementos elétricos, formas, características físicas dos materiais e o estado de decomposição. Diferentes tipos de defeitos que afetam as estruturas dos edifícios podem ser detectados pela análise da temperatura da superfície, submetida a condições de contorno particulares, como temperatura atmosférica, umidade relativa do ar e emissividade dos materiais (ALBA et al., 2011).

2.1 RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

As vibrações de campos elétricos e de campos magnéticos que se propagam no espaço simultaneamente na velocidade da luz, dão origem às ondas eletromagnéticas. E o conjunto de ondas eletromagnéticas de todas as frequências forma o espectro eletromagnético (CALLISTER, 1999).

A energia infravermelha é um espectro de luz não visível, pois possui comprimento de onda muito longo para ser detectado pelos olhos humanos. Quanto mais alta a temperatura de um objeto, maior é a radiação infravermelha emitida e identificada por aparelhos de mensuração. Assim como a luz visível e as ondas de rádio, a radiação Infravermelha também é causada por uma oscilação de campo eletromagnético, porém, com frequência e comprimento de onda diferente, como exemplificado na Figura 1, oriunda de Castro (2003).

Figura 1 – Escala de comparação de diferentes comprimentos de onda em metros



Fonte: Adaptado de Castro (2003, p. 8)

Como se percebe na Figura 1, o comprimento de onda abrange uma ampla gama do espectro eletromagnético, desde menores frequências e maiores comprimentos de ondas, como as ondas de rádio, passando pelos espectros de IR e de luz visível até frequências mais elevadas e com menores comprimentos de onda, com raios x e raios gama.

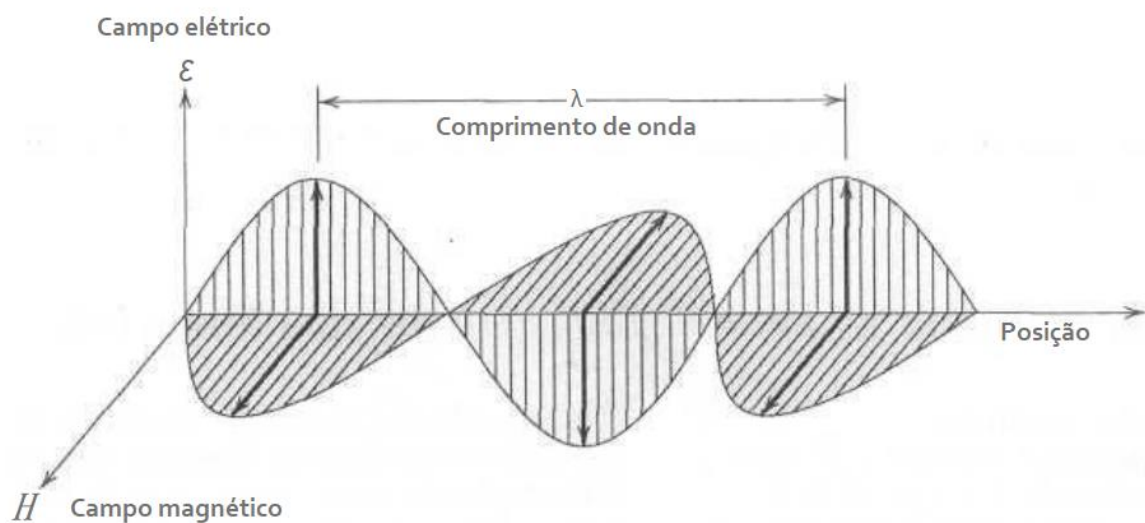
A operação das câmeras infravermelhas é baseada na teoria da radiação térmica. Todo o espectro eletromagnético é dividido em intervalos de comprimento de onda, denominados bandas espectrais, tendo valores de comprimento de onda distintos. Conforme aponta Coutinho (2021), é com base na medição infravermelha que os equipamentos termográficos efetuam seu registro para análise de superfícies e fachadas.

O termo radiação descreve uma ampla gama de comprimentos de onda do espectro eletromagnético, enquanto a *Infrared Thermography* (IRT) limita a sua aplicação para a radiação térmica, que cobre apenas a radiação emitida como resultado da temperatura de um objeto. Existe um corpo que é teoricamente capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele, independente da direção ou do comprimento de onda, sendo denominado de corpo negro (HOWELL; MENGÜÇ; SIEGEL, 2016 apud SILVA, 2017).

Todos os corpos emitem radiação infravermelha, mesmo aqueles que parecem estar frios, como o gelo, variando apenas a intensidade e o comprimento de onda, que dependem de sua temperatura (DE CASTRO, 2003).

A radiação eletromagnética é normalmente descrita como uma junção de campo magnético com campo elétrico, podendo propagar-se no vácuo, transportando energia, como se observa na Figura 2 (CALLISTER, 1999).

Figura 2 – Onda eletromagnética



Fonte: Adaptado de Callister (1999, p. 515)

As ondas eletromagnéticas têm a capacidade de carga energética, levando a energia no sentido oposto ao de sua fonte. Quanto mais energia tiver, maior será sua frequência. Outra característica é a não interferência entre ondas, ou seja, ondas eletromagnéticas com frequências diferentes não interagem entre si (PEDRA, 2011).

Como todas as ondas se deslocam na velocidade da luz, há uma relação fixa entre frequência e comprimento de onda, o que faz com que os gráficos normalmente mostrem as frequências crescentes e os comprimentos de onda decrescentes, correspondentes em um mesmo eixo. O conjunto de todas as frequências das ondas eletromagnéticas é chamado de espectro eletromagnético (CALLISTER, 1999)

A função de um detector de infravermelho é converter a radiação incidente sobre ele num outro tipo de sinal, sendo o elétrico o mais comum deles. Segundo Coutinho (2021), esses sinais elétricos podem ser utilizados como imagens. Além

disso, podem ser posteriormente amplificados, filtrados e processados, conforme destinação que se deseja.

Sendo assim, há detectores que funcionam para vários comprimentos de onda (banda larga) ou que estão limitados a uma estreita faixa espectral (banda estreita). Todos eles têm aplicações e modos de operação específicos.

2.2 TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA (IRT)

A termografia trata-se de uma técnica simples que consiste no princípio da capacidade de todos os materiais emitirem energia, sob a forma de calor, na zona de radiação infravermelha do espectro eletromagnético.

O conceito de emissividade é apresentado pela NBR 15424 (ABNT, 2016), norma referente à termografia que a conceitua como: “Razão da radiação emitida por um corpo real pela que seria emitida por um corpo negro, à mesma temperatura. A emissividade pode variar entre 0 (refletor perfeito) e 1 (corpo negro)”.

Segundo Caldeira (2016), a emissividade hemisférica total é definida em termos da energia de radiação emitida em todos os comprimentos de onda em todas as direções como:

$$\epsilon_t = \frac{E(t)}{E_b(T)} \quad (1)$$

A autora também apresenta as características de Absortividade, Refletividade e Transmissividade, afirmando que ao considerar radiação térmica incidente, deve atentar-se para os três fenômenos que podem ocorrer, sendo:

α : parte absorvida nas camadas anteriores

ρ : parte da radiação refletida para longe do meio

τ : componente transmitida através do corpo

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2)$$

Os sensores infravermelhos identificam a radiação e a transformam em um sinal elétrico. Este sinal, por sua vez, é o responsável por gerar um termograma, que representa a distribuição das temperaturas emitidas pelo corpo, sendo que cada cor ou tom corresponde a uma determinada temperatura.

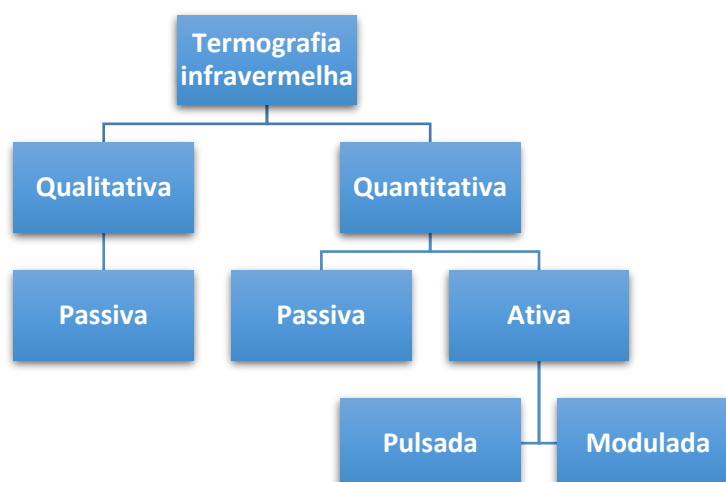
A termografia infravermelha (IRT) se tornou uma ferramenta de monitoramento de condição não destrutiva amplamente utilizada, permitindo que a temperatura seja medida em tempo real, sem contato com o equipamento (Bagavathiappan et al., 2013). Os autores citados destacam ainda a importância das técnicas de ensaios não destrutivos para o monitoramento de máquinas, entre elas a termografia.

Os dispositivos de medição infravermelha captam a radiação infravermelha emitida por um objeto e a transforma em um sinal eletrônico. A energia térmica medida pelo sensor de temperatura da câmara de infravermelhos é a energia emitida pelo próprio alvo mais a energia refletida pelo ambiente através da superfície do objeto (KYLILI et al., 2014).

A termografia infravermelha classifica-se, dependendo do tipo de análise e interpretação das imagens térmicas, em termografia qualitativa ou termografia quantitativa e, dependendo do tipo de estimulação utilizada, subdivide-se em termografia passiva ou ativa, podendo ser esta última com aquecimento contínuo ou intermitente (MILHOMEM, 2019).

Na Figura 3 observa-se um esquema simplificado da abordagem das inspeções termográficas de acordo com a sua classificação.

Figura 3 – Esquema de técnicas da termografia infravermelha



Fonte: Adaptado de Kylili et al. (2014, p. 15)

Como é possível perceber, existem as mensurações qualitativas e quantitativas. No cenário das quantitativas, há ainda ramificações entre passiva e a ativa que se divide entre pulsada e modulada.

Segundo Bagavathiappan et al. (2013), os tipos de análises estão diretamente relacionados com a forma de estimulação utilizada e a seleção de ambos vai depender do problema estudado e do objetivo procurado com a inspeção termográfica.

Finalizando, a norma supracitada apresenta ainda o conceito de inspeção termográfica:

“Inspeção não destrutiva e não intrusiva, realizada com a utilização de câmeras termográficas, para a medição de temperaturas e visualização de distribuições térmicas, que fornece informações relativas à condição operacional de um componente, equipamento ou processo. ”

(ABNT, 2016)

2.2.1 Termografia qualitativa e quantitativa

Quando se trata da termografia qualitativa, esta baseia-se em uma análise considerada simples de identificação de pontos quentes e pontos frios da imagem térmica, através da diferença de cores, ou seja, é uma análise visual do termograma. Neste contexto, a simplicidade da termografia qualitativa é relativa e dependerá da experiência de quem desenvolve o ensaio e interpreta os resultados.

A análise qualitativa é realizada por comparação com uma situação padrão, levando em consideração apenas a diferença local da temperatura superficial, através da variação de cores no termograma, indicando a existência ou não de uma anomalia (ALAM et al., 2016).

A técnica da termografia qualitativa oportuniza o acompanhamento metódico de condições normais de trabalho e permite a investigação periódica para reconhecer e identificar possíveis irregularidades invisíveis ao olho (PEDRA, 2011). Bauer et al. (2016) citam que através dessa técnica possibilitou-se uma abordagem baseada no mapeamento das áreas danificadas, assim como, a percepção da gravidade do dano, podendo ser realizadas periodicamente para acompanhamento da edificação.

Verifica-se que, em investigações de sistemas nos quais existe uma determinada tipologia de curso térmico constante, em que a detecção de um ponto ou região com temperaturas fora da faixa de trabalho indica uma anomalia, a termografia pode assumir um padrão qualitativo (CERDEIRA et al., 2011).

Observa-se que o objetivo é descobrir se existe uma anomalia e onde ela está localizada, por analogia de padrões de falha que dependem do sistema em estudo. Neste tipo de análise, são poucas as preocupações com as correções e os ajustes dos parâmetros de aquisição da imagem.

Já a termografia quantitativa, é usada para classificar a gravidade de uma anomalia, fazendo-se necessário haver maior precisão possível nas temperaturas obtidas no termograma e conseguir os ajustes e medições dos parâmetros termográficos de medição, como emissividade, distância, temperatura refletida, e outros (BAUER et al., 2015). Sendo assim, se faz necessário o estabelecimento de critérios associativos às anomalias e manifestações patológicas.

Neste contexto, as variações de temperatura na imagem térmica são quantificadas, podendo-se detectar e avaliar anomalias. Este tipo de análise requer maiores cuidados na introdução de parâmetros para a obtenção dos termogramas.

Normalmente, os resultados da análise não são avaliados *in situ*, as imagens são gravadas e depois tratadas em um *software* e programas específicos para serem interpretadas (REBELO, 2017).

Cabe destacar que, sem o conhecimento dos valores da emissividade dos materiais, não é possível obter leituras corretas da temperatura e resultados quantitativos. Como já citado, a emissividade é um percentual caracterizado pela diferença entre a energia emitida por um objeto e a energia emitida por um corpo negro nas mesmas condições climáticas. Os valores de emissividade estão compreendidos entre 0 (espelho / refletor) e 1 (emissor perfeito / corpo negro), conforme referido anteriormente e apontado por norma nacional.

Como resultado, a emissividade tem um papel importante na termografia e é dependente da temperatura, comprimento de onda e condições da superfície, como a rugosidade. Aliás, não existe equipamento termográfico que realize medições sem que antes tenha sido informada a condição de contorno referente à emissividade (PITARMA et al., 2015).

2.2.2 Termografia passiva e ativa

Quando se trata do método passivo, nenhum aquecimento artificial é utilizado, devendo existir uma diferença significativa de temperatura, de forma natural, entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido. Em suma, na termografia passiva,

as diferenças de temperatura que revelam anomalias, têm origem nos fluxos de calor gerados pelas condições de exposição natural dos elementos.

Em fachadas, as temperaturas não são constantes ao longo do dia, e dependem de grande amplitude térmica do ambiente, do aquecimento pelo sol e das condições de resfriamento da fachada para um correto levantamento passivo. Terão influência ainda das condições climáticas dos dias que antecedem o registro de imagens.

A análise pelo método citado conta com as condições naturais da estrutura estudada e do seu entorno, sendo a incidência do sol um fator determinante (BAUER et al., 2015).

Em relação à termografia ativa, se faz necessário um estímulo artificial e externo ao sistema estudado para gerar diferenças relevantes de temperatura. Em geral, a sua aplicação se dá em casos em que se desejem resultados quantitativos. Estes estímulos, usados na termografia ativa, podem ser de diferentes naturezas. Segundo Pedra (2011), os mais usados são os chamados pulsado, na qual a superfície estudada é aquecida ou resfriada por curtos períodos de tempo, variando de acordo com as características de condutibilidade térmica e espessura do objeto, e modulado ou *lock-in*, onde o material é aquecido ou resfriado em frequências específicas, na qual se busca capturar a resposta à variação térmica com os sensores termográficos.

De maneira mais específica, na termografia pulsada modifica-se rapidamente a temperatura do material pelo pulso térmico instantâneo, durando poucos segundos, avaliando-se o comportamento térmico da superfície. Na termografia de pulso longo, o regime de aquecimento é contínuo e prolongado com o objetivo de observar em um tempo maior as alterações na superfície do material. Estuda-se tanto a etapa de aquecimento quanto a etapa de arrefecimento (BAUER et al., 2015).

Já na termografia modulada, aplica-se um perfil de aquecimento modulado senoidal, baseado em ondas térmicas geradas no interior da amostra, enquanto na termografia vibrada são induzidas vibrações mecânicas para avaliar as mudanças de temperatura, resultantes do calor liberado pelo atrito nas áreas com defeitos.

Cada atividade tem suas características e limitações próprias e a escolha do tipo de estímulo térmico dependerá do objeto em estudo e de suas propriedades (PEDRA, 2011).

Considerando a aplicação em fachadas, o mais corriqueiro pela aplicabilidade é que seja empregada a termografia passiva, dado a dificuldade de se ativar termicamente uma fachada por completo. É muito importante que o levantamento IRT seja executado em período de grande variação térmica do ambiente, gerando assim uma alteração na temperatura no local e na profundidade em que se deseja verificar o possível dano.

2.3 CÂMERAS TERMOGRÁFICAS

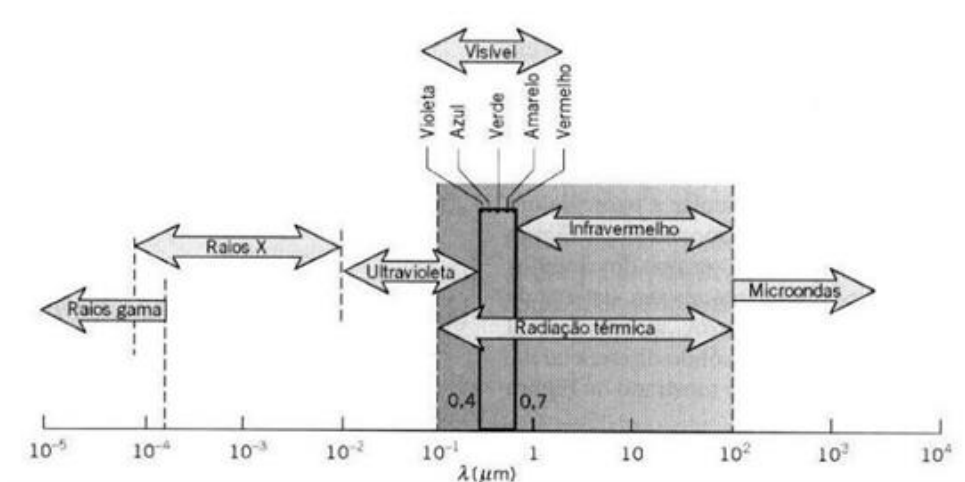
As câmeras termográficas são aparelhos de imageamento semelhantes às câmeras convencionais, porém, com sensores sensíveis à radiação Infravermelha, e não mais somente ao espectro de luz visível.

Os sensores são considerados transdutores, elementos capazes de transformar sinais físicos, térmicos, mecânicos ou ópticos, em outro, por exemplo, um detector de fumaça, que converte um aspecto químico da fumaça em um sinal sonoro, mais facilmente detectável pelo ser humano (DE CASTRO, 2003). Desta maneira, conclui-se que os sensores infravermelhos trabalham da mesma forma, convertendo sinais de luz não visível em escala gráfica de luz visível.

As imagens adquiridas, usando câmeras de termografia infravermelha, são convertidas em imagens visíveis através da atribuição de uma cor para cada nível de energia infravermelha e o resultado é uma imagem em escala Kelvin de cores chamada de termograma (USAMENTIAGA et al., 2014). Toda conclusão obtida de um estudo termográfico vai ser resultado do processamento e análise do termograma.

Pode-se observar na Figura 4 que os termovisores de IR, por operarem dentro da banda espectral de infravermelhos, são englobados pelo espectro da radiação térmica, isso ocorre pois objetos com elevadas temperaturas podem, além de emitir radiação infravermelha, emitirem também luz visível e até mesmo radiação ultravioleta (CALLISTER, 1999).

Figura 4 – Espectro eletromagnético



Fonte: Fé (2017, p. 34)

Outro importante parâmetro das câmeras termográficas é o IFOV, que versa sobre o tamanho do alvo que será analisado em relação à distância da câmera. Essa taxa é a razão entre a distância do alvo e o seu tamanho (D/S). Dessa maneira pode-se escolher a melhor câmera a ser utilizada em uma determinada medição ou a máxima distância que determinado equipamento é capaz de capturar um objeto com dimensões conhecidas. (ABNT, 2016)

Costanzo et al. (2015) afirmam que embora tais sensores tenham tido seu uso difundido nos últimos anos, considerando sua vasta aplicabilidade e custo acessível, muitos deles captam pequenos retângulos presentes na fachada, restringindo-se assim à pequenas áreas de análise, o que pode dificultar na obtenção de dados gerais sobre a fachada ou o ambiente monitorado.

Como já mencionado, existem dois importantes parâmetros óticos das lentes e sensores térmicos, que são o campo de visão e o campo de visão Instantâneo.

Segundo Caldeira (2016), o campo de visão (FOV) dos equipamentos de termografia pode ser descrito como a maior área possível de ser registrada em uma determinada distância; em outras palavras, é uma relação diretamente proporcional entre o tamanho da imagem e o tamanho do objeto em estudo possível de ser capturado em uma determinada distância entre a câmera e a superfície, sendo normalmente descrito em graus, tanto na vertical quanto na horizontal.

De forma similar, o campo de visão instantâneo (IFOV) dos termógrafos é a maior área de um objeto a ser analisado dentro do termograma, respeitando a mesma

distância daquela calculada no FOV. Desta forma é possível calcular diversos parâmetros, de acordo com as equações 3 e 4.

$$Dist = \frac{d}{IFOV} \quad (3)$$

(CALDEIRA, 2016)

Sendo:

Dist: distância máxima que um objeto de tamanho *d* pode ser detectado
[m]

d: tamanho do objeto sob inspeção [mm]

IFOV: campo de visão instantâneo [rad]

$$IFOV = \frac{FOV}{pix} \quad (4)$$

(CALDEIRA, 2016)

Sendo:

IFOV: campo de visão instantâneo [rad]

FOV: campo de visão total [rad]

Pix: número de pixels

Com base nas equações 3 e 4, o FOV pode ser calculado de acordo com a equação 5:

$$FOV = pix \frac{d}{Dist} \quad (5)$$

Onde:

FOV: campo de visão total [rad]

Pix: número de pixels

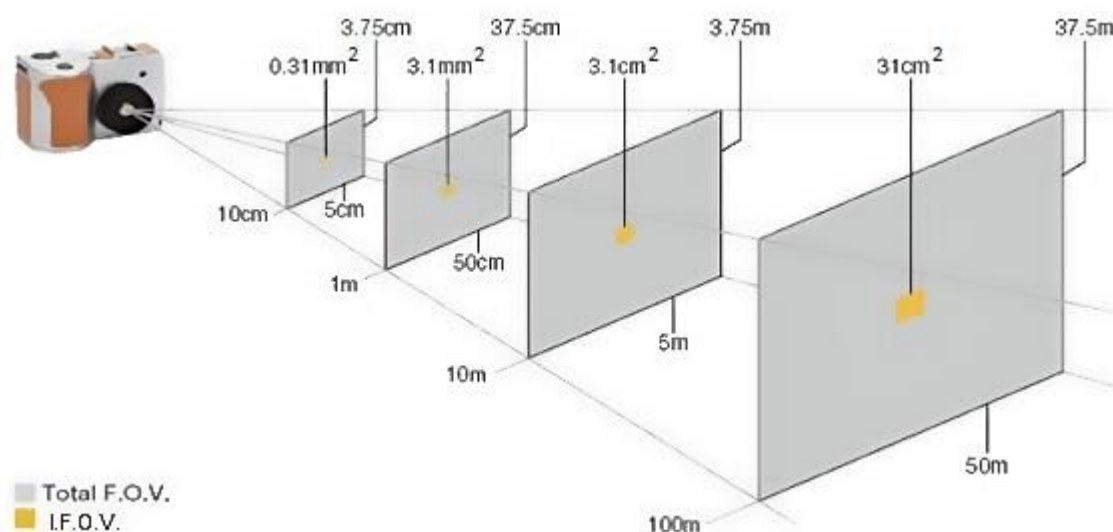
d: tamanho do objeto sob inspeção [mm]

Dist: distância máxima que um objeto de tamanho *d* pode ser detectado
[m]

Ilustra-se na Figura 5 os parâmetros óticos de uma câmera, com as seguintes características, em relação à distância do objeto estudado:

- 160 x 120 pixels
- IFOV de 3,1 mrad
- FOV horizontal de 28°
- FOV vertical de 21°

Figura 5 – Correlação entre FOV, IFOV e Distância



Fonte: Caldeira (2016, p. 58)

Verifica-se que o campo de visão instantâneo é determinante na localização de uma anomalia, portanto é vital ao ensaio que haja a verificação antecipada da distância entre o observador e o alvo, bem como dos parâmetros supracitados referentes às características óticas. Logicamente, essas condições serão afetadas pelas condições do entorno da edificação e da possibilidade de acesso.

Calado (2013) apresenta que a essa variável define “a menor área em que a temperatura pode ser identificada à mesma distância d ”, indicando o autor, que é dessa forma que se definem os equipamentos e parâmetros para uma análise termográfica.

Lentes específicas podem ser utilizadas caso seja necessário melhorar a resolução do termograma, porém, existe a desvantagem da diminuição do campo de visão. Isso significa que a ação de chegar mais próximo ao alvo é o mesmo que a utilização de lente de zoom. A utilização deste tipo de lente se justifica em situações

em que não é possível se aproximar do objeto de estudo, como em locais de difícil acesso, em ensaios de situação de incêndio, devido à alta temperatura, dentre outros.

Outro fator importante na análise do termograma é a detecção de temperatura, para isso deve ser verificada a sensibilidade térmica do equipamento. Sakamoto & Fioriti (2017) pontuam que por mais simples, prática e aplicável que a termografia seja, o que a torna de amplo alcance e uso, deve ser feita uma análise com cada equipamento ou conjunto de equipamentos, indicando seu potencial de aplicação.

Há um parâmetro que define o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão com relação a uma determinada distância, podendo ser definido como a resolução térmica dos equipamentos, sendo esta conhecida como “campo de visão instantâneo de medida”, MIFOV (*Measuring Instantaneous Field of View*) ou ainda IFOVm.

Existem três fatores que por dependerem da lente utilizada, independentemente de serem fixas ou escamoteáveis, devem ser analisados em conjunto e não separadamente, que são o IFOV, foco e ângulo de visão.

Quanto maiores forem estes parâmetros, menor será a resolução dos termogramas e a precisão do estudo, sendo que cada pixel analisado na imagem vai corresponder a uma área maior.

Bauer et al. (2015) compararam duas câmeras infravermelhas de igual resolução, porém de diferentes IFOVs (FLIR T 400 e NEC TH9100), e obtiveram diferenças nos valores de temperatura das áreas com e sem manifestações patológicas. No entanto, os valores de ΔT ficaram praticamente iguais durante todo o período de estudo.

2.3.1 Ajuste de amplitude térmica

Para facilitar a leitura da escala kelvin, a amplitude térmica, também chamada de *span*, pode ser ampliada ou reduzida, a fim de gerar maior contraste de cores na imagem, pois delimita um intervalo confinado entre a maior e menor temperatura de escala desejada (ABNT, 2016).

Este recurso é de suma importância para o processamento das imagens, tendo em vista que o *software* de fotogrametria utiliza as cores de milhares de pixels de cada imagem para correlacionar com as próximas imagens que formarão o mosaico. Sabendo disso, uma distorção na escala colorimétrica de temperatura afetaria

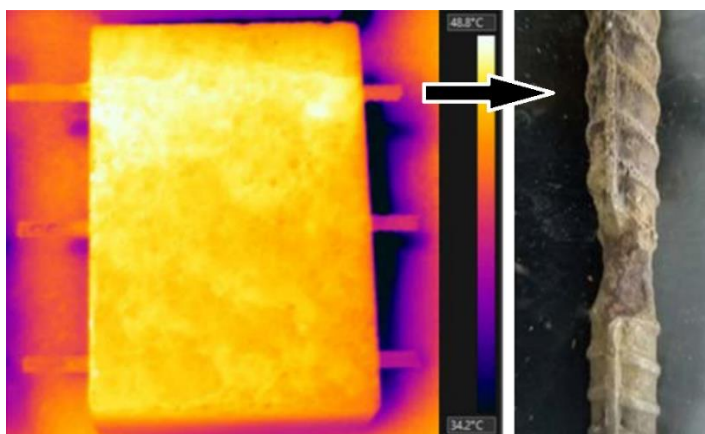
diretamente na precisão das ligações entre imagens ou até mesmo inviabilizaria o processo.

2.4 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS IDENTIFICÁVEIS POR TERMOGRAFIA

Existe uma variada gama de manifestações patológicas que podem ser identificadas através da termografia por infravermelho, como deslocamentos de argamassa e peças cerâmicas, infiltrações e falta de isolamento térmico, como sugerem Taylor et al. (2013) em seu estudo sobre eficiência energética de edificações residenciais.

A identificação de corrosão da armadura em peças de concreto armado também é possível com o uso da termografia em condições propícias ao ensaio. Rocha e Póvoas (2019) constataram com ensaios acelerados de oxidação que, em elementos metálicos com perda de seção maior que 10% e com cobrimento igual ou inferior a 2,5cm, o fato de haver espaços vazios, característicos do processo oxirredutivo, afeta a capacidade do sistema de transmitir calor, sendo visível em termogramas de IR, como na Figura 6.

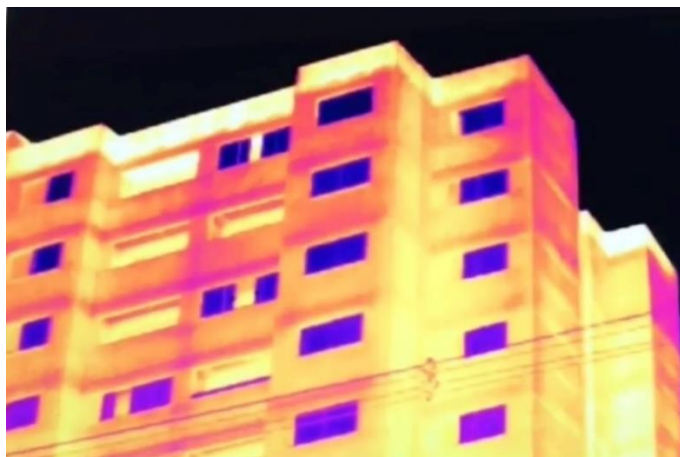
Figura 6 – Identificação de oxidação da armadura por termografia de IR



Fonte: Rocha & Póvoas (2019, p. 11)

Outra possibilidade é identificar o agente causador de manifestações patológicas, como exemplificado por de Sena et al. (2020), ao perceber a amplitude térmica de 4 °C entre a platibanda e a estrutura, ilustradas pela Figura 7, podendo esta ser a causadora de fissuras entre ambos elementos.

Figura 7 – Termografia de fachada

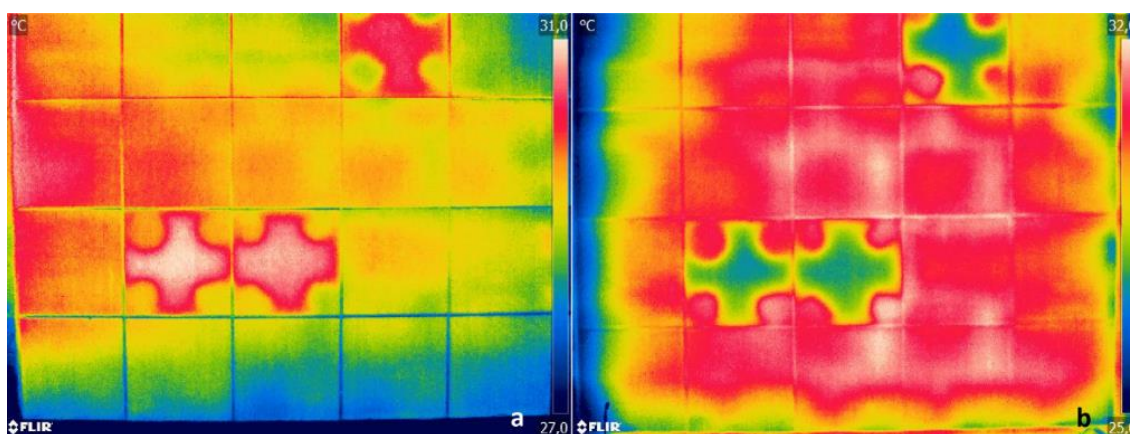


Fonte: De Sena et al. (2020, p.128)

Como pesquisado por Taylor et al. (2013), vazamentos de ar, insuficiências ou descontinuidades do isolamento e falhas no sistema de calefação são problemas que prejudicam a eficiência energética das edificações, mas que podem facilmente ser detectadas através das câmeras térmicas e corrigidas durante as etapas construtivas dos edifícios, denotando a sua possibilidade de aplicação em sistemas de revestimento externos e fachadas.

Lourenço et al. (2017) detectaram descolamentos em placas de porcelanato nas cores branca e preta. Durante o dia, os descolamentos apareceram como áreas mais quentes nos termogramas, como na Figura 8 (lado esquerdo), e à noite como, áreas mais frias, como na Figura 8 (lado direito). Neste estudo, os autores comprovaram a dificuldade de avaliar estes descolamentos com a presença de umidade.

Figura 8 – Termografia de descolamentos em revestimentos cerâmicos



Fonte: Lourenço et al. (2017, p. 424)

Paoletti et al. (2013) verificaram a presença de fissuras na fachada de um prédio histórico de alvenaria de pedra, Figura 9, através da inspeção termográfica. Os autores concluíram que a extensão e alcance das fissuras foram determinadas somente através de uma análise precisa das imagens térmicas capturadas, antes mesmo de poder ser diagnosticada a olho nu.

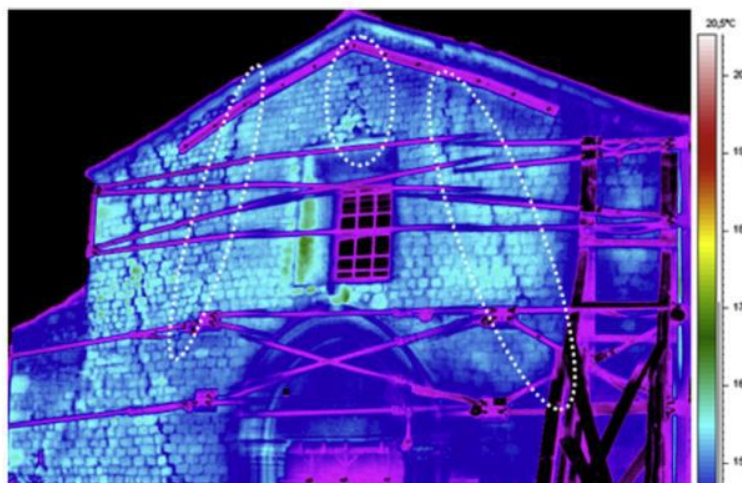
Figura 9 – Fachada de edificação histórica após terremoto



Fonte: Paoletti et al. (2013, p. 119)

Na situação da Figura 10, as imagens térmicas foram realizadas durante o dia e as fissuras apareceram nos termogramas como áreas mais frias quando comparadas com as regiões vizinhas próximas a elas.

Figura 10 – Fissuras identificadas com termografia em prédio histórico após terremoto.

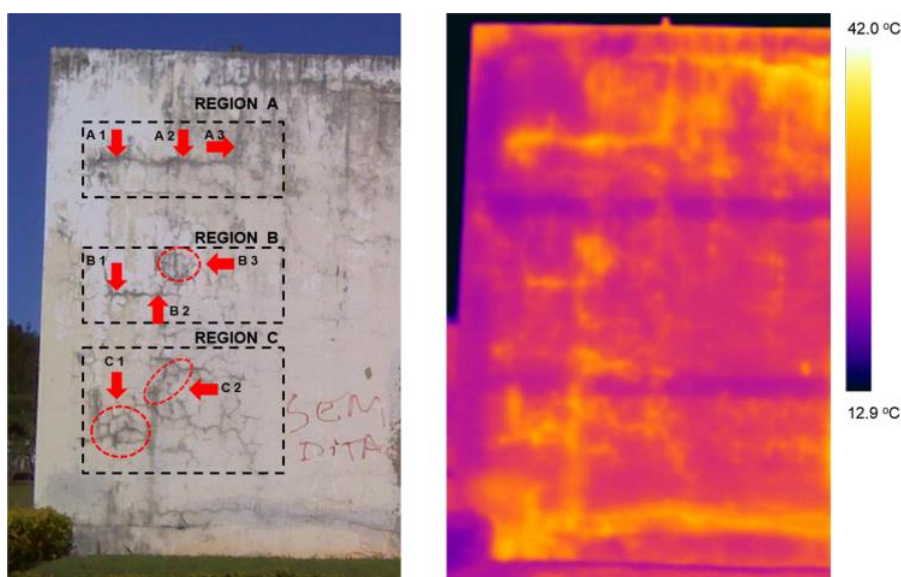


Fonte: Paoletti et al, (2013, p. 120)

Altoé e Filho (2012) vistoriaram uma edificação utilizando a termografia infravermelha para detectar defeitos construtivos e identificar detalhes relacionados às características térmicas da construção, com o objetivo de definir ações de manutenção da estrutura e medidas de conservação de energia da edificação.

Bauer et al. (2016) avaliaram uma fachada em alvenaria com revestimento argamassado com alta concentração de fissuras mapeadas e na Figura 11 aparecem marcadas as fissuras observadas. Os resultados também mostraram valores de ΔT durante todo o dia, que podem ser atribuídos à cor mais escura das regiões com fissuras ou por possíveis descolamentos associados às fissuras, que poderiam justificar também as temperaturas mais elevadas das regiões fissuradas.

Figura 11 – Fissuras mapeadas avaliadas com termografia.



Fonte: Bauer et al. (2016, p. 3)

Solla et al. (2013) utilizaram a termografia infravermelha para detectar problemas de umidade em uma ponte de alvenaria. A partir de um modelo termográfico tridimensional detectaram a presença de umidade pela redução da temperatura na área afetada por causa da evaporação.

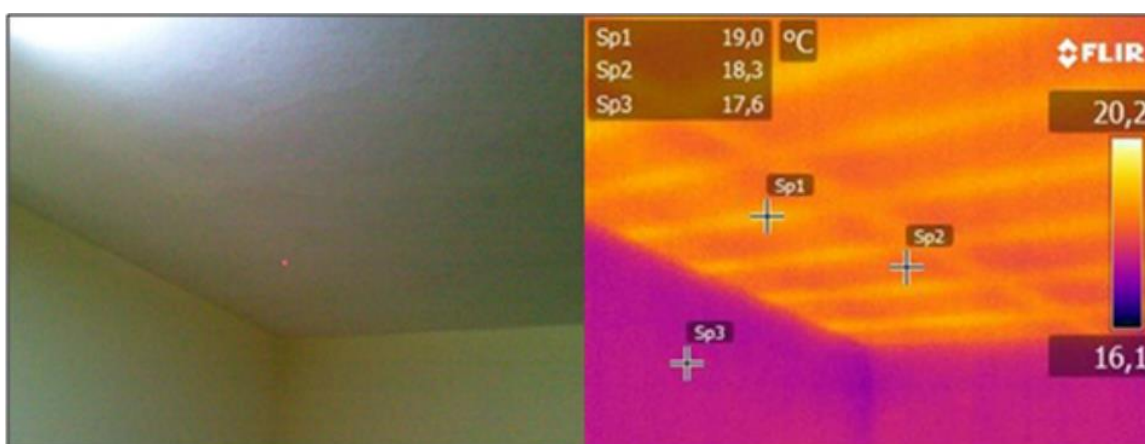
Edis et al. (2014) avaliaram problemas de umidade de uma fachada a partir da utilização de perfis de temperatura. Concluíram que, em fachadas com revestimento cerâmico vidrado, as variações de umidade podem ser detectadas através de inspeção termográfica passiva com base no ganho de calor solar da fachada.

Outra aplicação da termografia na construção é a identificação de vazios, materiais ou elementos ocultos, como vigas e pilares. A elevada resistência térmica

do ar e as diferenças nas propriedades térmicas dos materiais de construção fazem com que, no termograma, dependendo da direção e intensidade do fluxo de calor, seja possível identificar a presença de vazios e elementos ocultos, estejam eles inseridos ou situados por trás do elemento estudado.

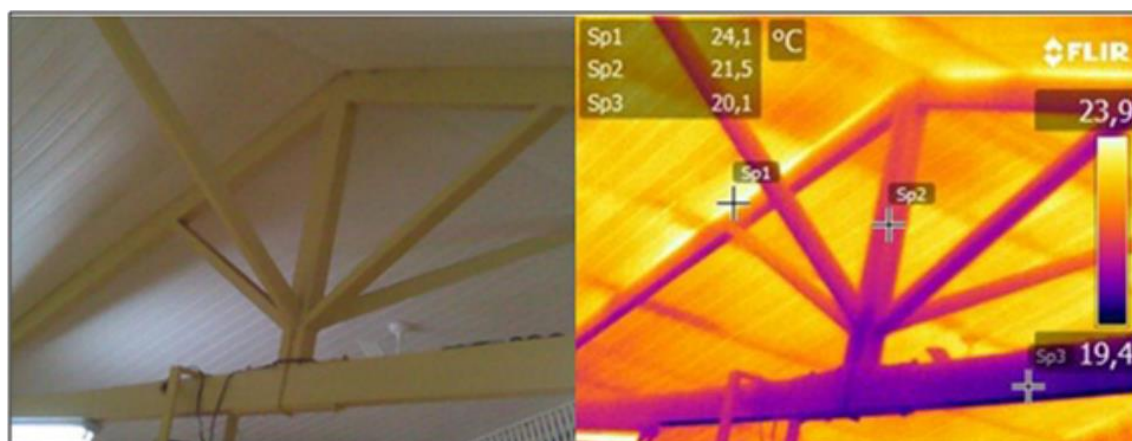
Em relação à identificação de materiais e elementos ocultos, tem sido possível identificar a estrutura interna de paredes e tetos de construções, com estudos que comprovam a viabilidade da termografia nesta aplicação, com o objetivo de identificar a configuração estrutural do prédio, ou para ajudar no caso de modificações estruturais. São exemplos dessas aplicações, as Figuras 12 a 17.

Figura 12 – Identificação de vigotas por meio de termografia



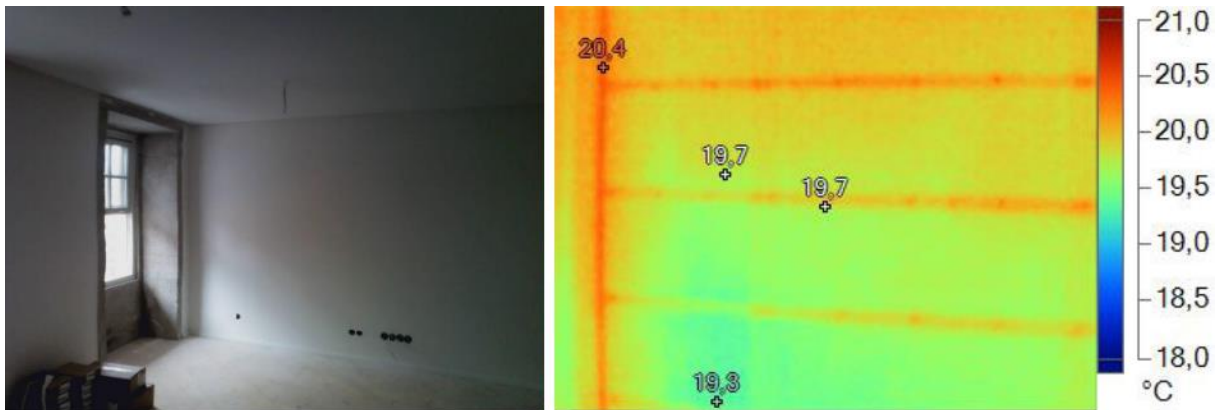
Fonte: Altoé & Oliveira Filho, (2012, p. 58)

Figura 13 – Identificação de terças através de termografia



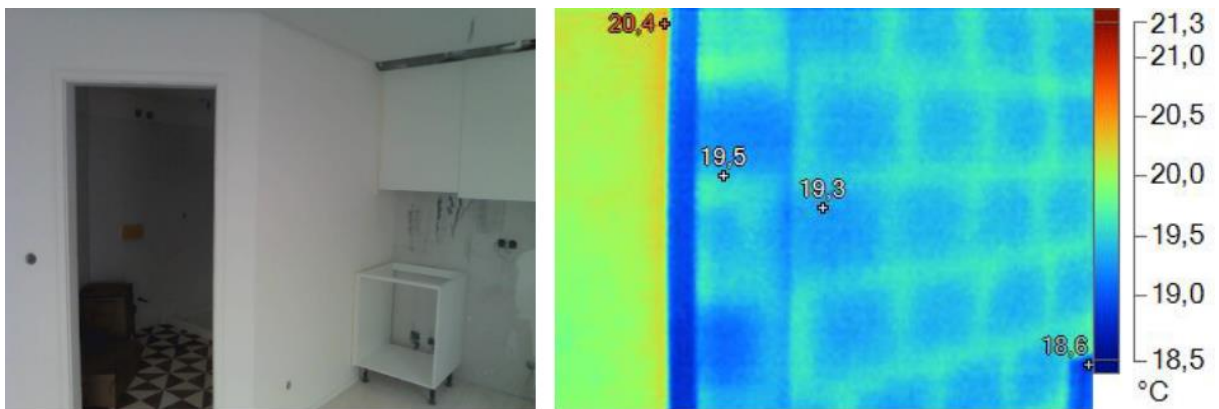
Fonte: Altoé & Oliveira Filho, (2012, p. 59)

Figura 14 – Identificação de placas de gesso acartonado e seus suportes por termografia



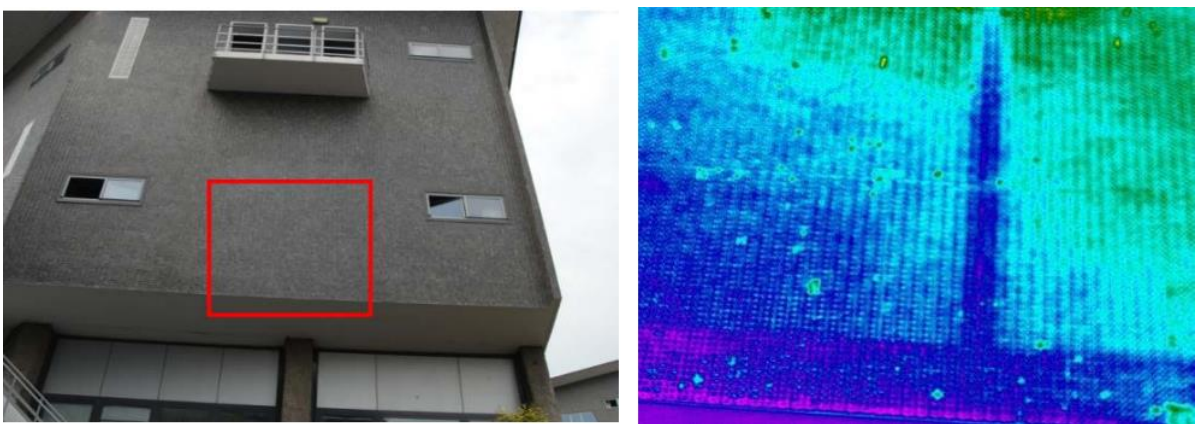
Fonte: Pereira et al. (2017, p. 212)

Figura 15 – Identificação de alvenaria com auxílio de termografia



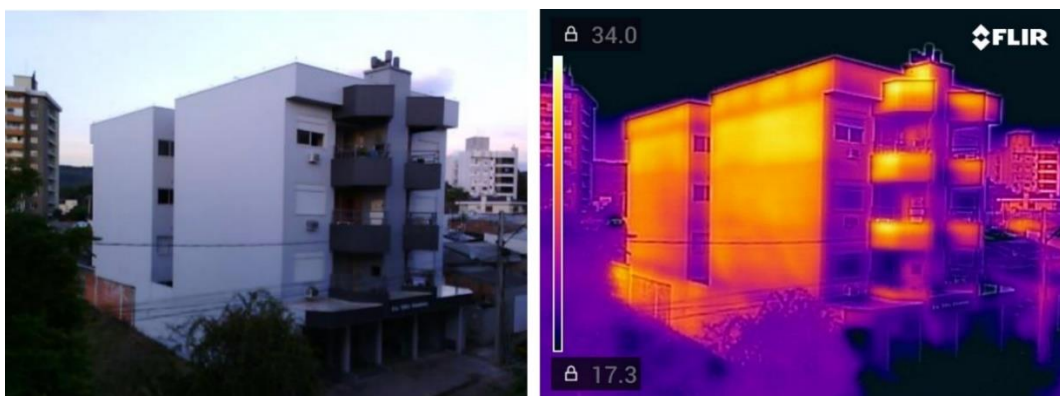
Fonte: Pereira et al. (2017, p. 213)

Figura 16 – Identificação de pilar e viga sobre termografia



Fonte: Adaptado de Alba et al. (2011, p. 1861)

Figura 17 – Identificação de vigas e pilaretes da platibanda



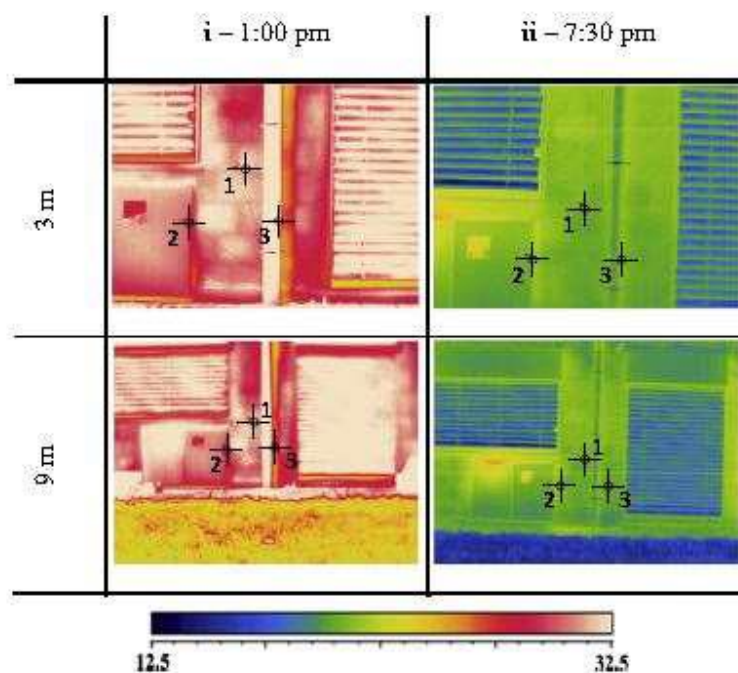
Fonte: Do autor

Em pesquisas realizadas por Bauer et al. (2015) e Bauer et al. (2016) foi possível observar também a presença das estruturas de concreto participando da alvenaria, nestes casos os elementos de concreto apareceram como áreas mais frias nos termogramas, como já analisado na Figura 11.

Para Barreira et al. (2016), as características da superfície são fator importante na obtenção dos termogramas, com melhores resultados para alta emissividade e baixa refletância.

Os autores complementam afirmando que a distância da câmera ao alvo não influenciou nos resultados obtidos, e sim na clareza e nitidez da imagem, ou seja, mesmo com o acréscimo de distância, ainda foi possível identificar corretamente a umidade do substrato, conforme observa-se na Figura 18.

Figura 18 – Comparação entre termogramas registrados em diferentes distâncias



Fonte: Barreira et al. (2016, p 258)

Os estudos citados nesse capítulo até aqui, utilizaram da técnica da obtenção de imagens para análise de dados patológicos, sem envolver a criação de um modelo 3D para identificação dos danos, conforme relata o capítulo 2.7.

2.5 ERROS DE MEDIÇÃO

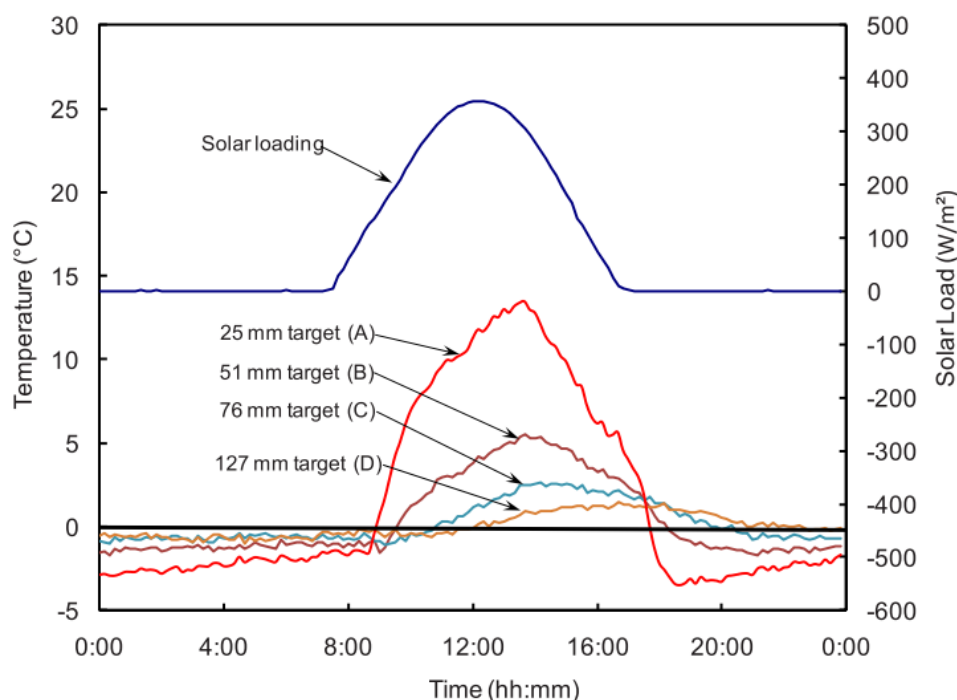
Erros em termografias podem estar associados à reflexão de radiação infravermelha pela superfície do objeto analisado ou por fontes únicas de calor, como o sol ou uma lâmpada (ABNT, 2014). Dessa maneira, o resultado pode se desviar de um padrão esperado, resultando em uma anomalia térmica (ABNT, 2016).

A taxa de absorção de radiação de um elemento é determinada pela razão entre a radiação absorvida pela radiação que incide sobre o corpo, e é chamada de Absortividade, podendo variar entre 0 e 1, caracterizando respectivamente um refletor perfeito, onde não há parcela de radiação absorvida, e corpo negro, onde a radiação é absorvida em sua plenitude (ABNT, 2016).

Em termos de tempo de coleta de dados para melhor identificação de manifestações patológicas, Washer et al. (2010) recomendam medições durante as fases de aquecimento ou resfriamento do ambiente, sendo que devem ser analisadas as

derivadas da curva de aquecimento solar dos materiais, como na Figura 19, dando preferência aos períodos correspondentes às maiores taxas de ganho de temperatura.

Figura 19 – Correlação entre tempo de exposição ao sol com temperatura absorvida para diferentes profundidades da superfície do objeto



Fonte: Washer et al. (2010, p. 387)

Kee et al. (2012) concluíram que nenhuma manifestação foi encontrada a partir de Imagens infravermelhas obtidas em até 3 horas e 45 minutos após o nascer do sol, por mais rasas que fossem as delaminações. Isso se deve, pois, os valores de carga térmica dos elementos se igualaram, não mais aparentando amplitude térmica na Imagem de IR, enquanto os melhores resultados foram alcançados durante o ciclo de resfriamento, em que delaminações de até 15,24 cm de profundidade puderam ser detectadas.

Matsumoto et al. (2013) e Watase et al. (2015) propuseram um momento favorável para inspeção de peças de pontes, sendo o início e o final da tarde os horários mais favoráveis para inspeções termográficas.

Por meio de um experimento de laboratório, de campo e de modelagem de elementos finitos, Hiasa et al. (2017) concluíram que o melhor período para aplicar IRT para inspeção de ponte de concreto é durante o efeito de resfriamento noturno, após o pôr do sol, a fim de reduzir a possibilidade de detecção incorreta devido à luz

solar, mesmo que as áreas delaminadas também tenham sido observadas claramente durante o período de aquecimento diurno.

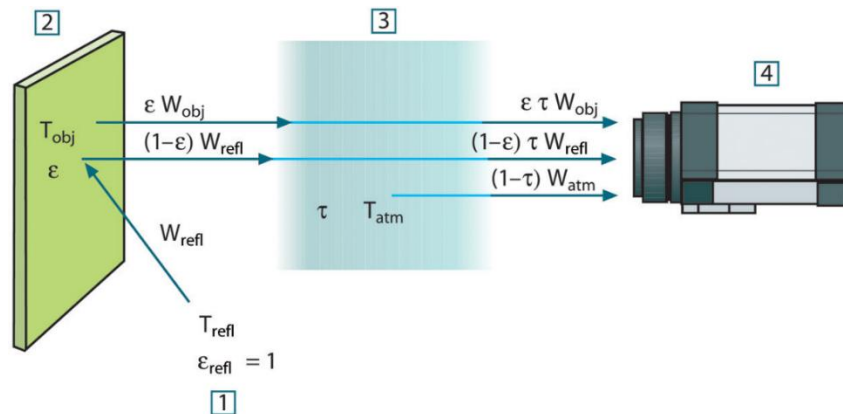
De Freitas et al. (2014) alertam que em um termograma, irregularidades na temperatura superficial podem não apenas serem advindas de danos no objeto inspecionado, mas também resultantes de fatores externos, tais como:

- Condições térmicas do objeto e do meio em que se encontra, antes e durante o ensaio;
- Presença de fontes externas, tais como: sombra, reflexão, superfícies com diferentes acabamentos, entre outros aspectos;
- Condições de medição, por exemplo a emissividade empregada, a temperatura e a umidade do ambiente, a distância entre câmera e objeto, as definições do equipamento, a experiência do operador, dentre outras condições.

Esses fatores podem influenciar resultados de temperaturas apresentadas no termovisor diferentes das temperaturas reais, já que a formação da imagem está associada à captura da radiação infravermelha que atinge sensor IR da câmera e não em uma simples medição direta da temperatura.

Ao ser apontada a um objeto, a câmera recebe radiações emitidas pela superfície do próprio objeto bem como de outras fontes presentes no meio em que o mesmo está inserido. Ambas as radiações sofrem atenuações e adições parciais por parte da atmosfera, como ilustrado pela Figura 20, na qual o sensor termográfico, identificado pelo número 4, capta a radiação do objeto 2, somada à radiação emitida pela atmosfera, identificada pelo número 3, assim como a radiação emitida pelo elemento 1 e refletida pelo objeto 2.

Figura 20 – Interferências em ensaios termográficos causadas pela potência de radiação emitida pela atmosfera.



Fonte: FLIR (2012)

A configuração da Figura 20 pode ser descrita de acordo com a Equação abaixo.

$$W_{tot} = \epsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (6)$$

(CALDEIRA, 2016)

Sendo:

W_{obj} : potência da radiação emitida pelo objeto

W_{refl} : potência da radiação emitida pelo meio adjacente

W_{atm} : potência da radiação emitida pela atmosfera

ϵ : emitância do objeto

τ : transmitância da atmosfera

Ou seja, é a resultante dessas radiações que atinge o sensor IR que geram o sinal de saída, que é processado e transformado em imagens RGB (CALDEIRA, 2016)

2.6 FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria é uma técnica de visualização tridimensional do espaço, utilizando imagens bidimensionais. Para que o levantamento seja corretamente executado, é fundamental que as imagens utilizadas sejam perfeitamente ortogonais ao plano estudado e que elas possuam sobreposições laterais e frontais, podendo-se observar as três dimensões, que são características do processo (altura, largura e profundidade).

Segundo Franco Júnior (2019), fotogrametria pode ser definida como uma ferramenta de auxílio para obtenção de dados de objetos ou de estruturas já existentes e, a partir dessa, obter uma série de recursos, como modelos digitais, nuvem de pontos e imagens ortoretificadas, que podem ser aplicadas em plataformas BIM.

Dependendo do método utilizado para aquisição dos dados, correções de possíveis inclinações podem ser necessárias. Para facilitar o processo de mosaicagem, existem *softwares* de fotogrametria, que são capazes de identificar e corrigir inclinações, rotações e distorções de lentes, eliminando a necessidade da utilização de câmeras métricas e diminuindo a quantidade de equipamentos necessários para obtenção destes dados.

2.6.1 Modelagem de informações da construção – *BIM*

O *Building Information Modeling* é um sistema abrangente de conhecimento voltado para as áreas da arquitetura, da engenharia, da construção e da operação, que vem se apresentando como uma nova tecnologia com a promessa de mudança de procedimentos da indústria (SUCCAR, 2009).

Cho et al. (2015) e Ham & Golparvar-Fard (2015) desenvolveram uma metodologia de modelagem através de nuvem de pontos obtidas com fotogrametria de imagens térmicas. A aplicação da nuvem de pontos térmica 3D, como foi chamada pelos autores Ham & Golparvar-Fard, resultou em um cálculo de eficiência energética mais rápido e automatizado, além de possibilitar uma fácil identificação das falhas de isolamento térmico da estrutura.

Wang et al. (2013) obtiveram uma nuvem de pontos RGB através de um escâner (LIDAR) e sobrepueram a esta, imagens de um ensaio termográfico do mesmo local, gerando um levantamento com informações de temperatura e dimensões sobre os três eixos (X, Y e Z).

O sistema de modelagem pode auxiliar na compreensão de problemas relacionados a falha em isolamento térmico em edificações, mas que ainda falta exploração do sensoriamento termal em conjunto à plataforma *BIM* no meio acadêmico (NATEPHRA et al., 2017).

2.6.2 Interpolação de imagens

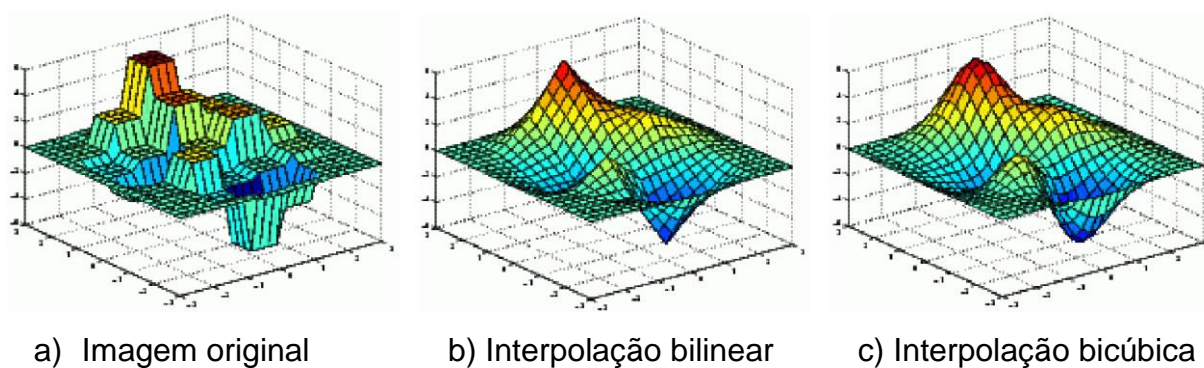
O processo de fotogrametria se dá através da transformação projetiva, sendo que, no mínimo, quatro coordenadas de pixels são arbitradas, atribuindo novas características aos pixels interpolados, formando uma nova imagem, diferente das originais utilizadas como dados de entrada (SCHENK, 1999 apud YASTIKLI & GULER, 2013). Os autores ainda complementam, afirmando que antes da transformação projetiva, para resultados mais precisos, deve-se corrigir as distorções provenientes das lentes das câmeras.

Lenza (2017) lista alguns tipos de interpolação de imagens, sendo eles:

- Linear
- Bilinear
- Bicúbica
- Polinomial
- Nearest Neighbor
- Vizinho mais próximo

Dentre os tipos de interpolação, destacam-se o método bilinear e o método bicúbico, sendo que o primeiro processo, Figura 21 b, apresenta-se mais célere em processamentos, enquanto o segundo processo, Figura 21 c, resulta em um efeito mais suave e de maior qualidade, sendo este preferencialmente utilizado por programas de imageamento (LENZA, 2017).

Figura 21 – Tipos de interpolação



Fonte: Adaptado de Lenza (2017)

Pelas interpolações mencionadas, o processo de fotogrametria pode resultar em um mosaico com resolução aparente superior à das imagens inseridas,

dependendo do *software* utilizado. Esse benefício pode, inclusive, interferir positivamente no resultado obtido em levantamentos fotogramétricos de imagens térmicas, deixando-os mais nítidos e possibilitando uma melhor identificação das manifestações patológicas da edificação em estudo.

2.6.3 Aerofotogrametria

Diversas são as finalidades para qual são utilizadas técnicas de fotogrametria, como levantamentos planialtimétricos, volumetria de biomassa, modelagem tridimensional de objetos em geral, dentre outras. Em alguns destes casos, se faz necessária a utilização de aeronaves para a obtenção das ortoimagens, denominando este processo de aerofotogrametria.

Dentre as aeronaves comumente utilizadas para este serviço, pode-se destacar:

- Tripuladas
 - Asas fixas
 - Asas rotativas
- Não tripuladas
 - Asas fixas
 - Asas rotativas

Segundo Hemesath (2019), são modelos usuais de RPAs utilizadas no processo de aquisição de imagens aéreas:

- Asas fixas
 - Sensefly Ebee Classic
 - Sensefly Ebee SQ
 - Sensefly Ebee X
- Asas rotativas
 - DJI Phantom 3 (Advanced e Professional)
 - DJI Phantom 4 (Advanced e Professional)

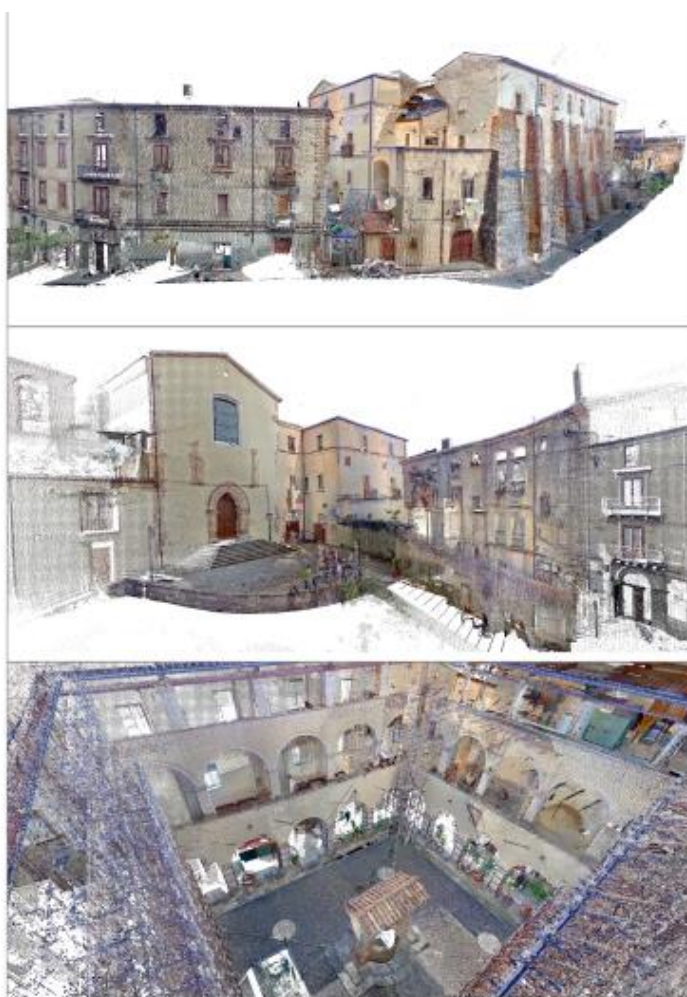
Para este trabalho é importante um voo lento, característico de *RPAs* de asas rotativas, permitindo a obtenção de imagens sem arraste. Para isso, foram utilizados dois veículos aéreos não tripulados (VANTs) da fabricante DJI, modelo Mavic 2 Enterprise Advanced, que possui um sensor térmico IR para registro de imagens laterais e da cobertura das edificações estudadas e o modelo Phantom 4 Advanced,

que possui um sensor RGB para levantamento fotogramétrico da edificação. As demais imagens serão obtidas do solo, por operador capacitado para função.

2.7 ESTUDOS COM A CRIAÇÃO DE MODELOS 3D

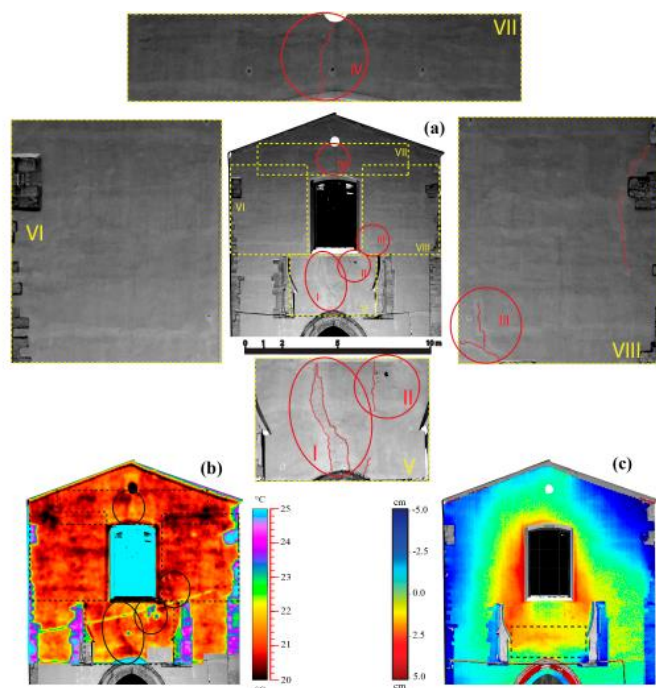
De modo semelhante ao objeto do presente estudo, Costanzo et al. (2015) somaram as técnicas de IRT com laser scanner de modo a obter um modelo tridimensional para análise dos danos em edificações. A Figura 22 apresenta as imagens da edificação obtidas através do Laser scanner, e na sequência, na Figura 23, tem-se o modelo gerado pelos autores, nos quais identificam-se os danos patológicos.

Figura 22 – Obtenção da imagem por laser scanner



Fonte: Costanzo et al. (2015, p 202)

Figura 23 – Junção das técnicas de laser scanner e termografia IR



Fonte: Costanzo et al. (2015, p 204)

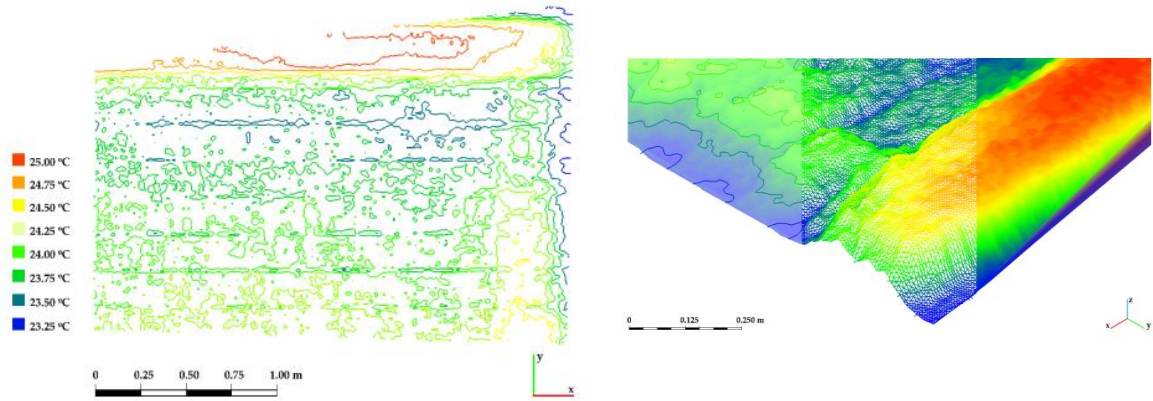
Os autores concluíram que isoladamente as técnicas já podem retornar dados interessantes ao diagnóstico, monitoramento e acompanhamento de edificações históricas, porém, que somadas, podem identificar danos não visíveis ao olho nu, além de indicarem a progressão de danos patológicos.

Lagüela et al. (2012) também somaram as duas técnicas, apresentando em seu método o passo-a-passo para a criação do modelo, sendo:

- I. Análise por inspeção termográfica;
- II. Análise com uso de laser scanning.
- III. Processamento de imagens 2D da inspeção por IR;
- IV. Processamento de imagens 3D pelo laser scanning;
- V. Geração do modelo 3D.

Antón & Amaro-Mellado (2021) obtiveram medidas de temperatura na fachada e criaram um modelo 3D para representação dos danos no sistema de revestimento argamassado, conforme ilustra a Figura 24.

Figura 24 – Geração de imagens

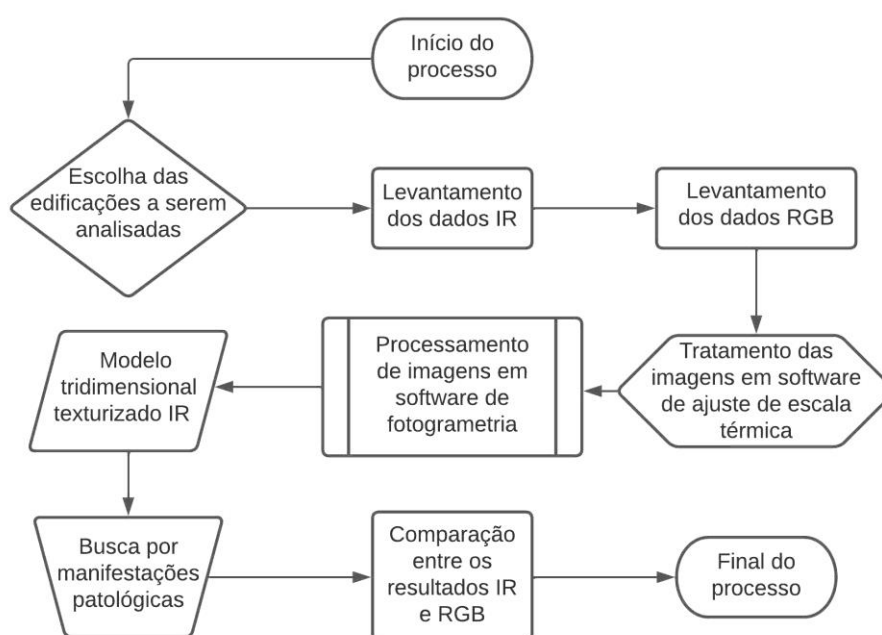


Fonte: Antón & Amaro-mellado, (2021, p 13)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas as etapas para coleta de dados termográficos, bem como seus tratamentos e processamentos, que resultaram nas nuvens de pontos e nos modelos tridimensionais texturizados, sendo estes utilizados para avaliar a eficácia do método de identificação de manifestações patológicas, como descrito pela Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma metodológico



Fonte: Do autor

As etapas seguidas podem ser sintetizadas pelos seguintes passos:

- Definição das edificações a serem analisadas;
- Estudo da sintomatologia da edificação a ser analisada;
- Levantamento dos dados termográficos e situações de contorno;
- Tratamento as imagens em *software* de termografia;
- Processamento as imagens em *software* de fotogrametria;
- Análise dos resultados obtidos e conferi-los com as condições do levantamento RGB.

3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

Objetivando analisar a possibilidade de identificar e mensurar manifestações patológicas através de termografia em levantamentos tridimensionais, o primeiro passo a ser tomado é encontrar uma ou mais edificações que possuam estas condições. Para este fim, foram utilizadas técnicas convencionais de investigação, como inspeções visuais, higrométricas e termográficas, encontrando problemas que interfiram diretamente no comportamento térmico da estrutura, substrato ou revestimentos ensaiados.

Os ensaios de verificação devem ocorrer após o pôr do sol, durante a fase de liberação de calor sensível, antes do meio dia, durante a fase de acúmulo energético, como sugerido por Sham et al. (2012), quando o calor absorvido pelos materiais de construção será liberado por convecção até atingir a superfície analisada, permitindo assim uma melhor identificação das amplitudes térmicas.

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, que rege o princípio da conservação de energia, mantendo-se a massa e o trabalho constantes, a quantidade de calor de um sistema é diretamente proporcional à sua variação de temperatura, logo, em longos períodos de tempo com temperatura constante, a estrutura tende ao equilíbrio energético, impossibilitando a visualização de gradientes térmicos através de termômetros ou câmeras termográficas, motivo pelo qual ensaios termográficos devem ser executados durante notáveis variações de temperatura.

Dessa forma, os levantamentos foram feitos pela manhã, próximo das 11h, momento em que havia a maior amplitude térmica horária, fazendo com que os locais danificados se demonstrassem distintos dos demais.

3.1.1 Estudo de caso

Foram escolhidas duas edificações que os proprietários permitissem a divulgação dos dados do estudo para o levantamento de IRT deste trabalho, sendo a primeira com revestimento argamassado, onde foram utilizadas as câmeras termográficas da FLIR, e a segunda com revestimento cerâmico, onde foi utilizado o Mavic 2 Enterprise Advanced, VANT da fabricante DJI.

Para melhor compreensão das edificações, de suas manifestações patológicas e dos equipamentos utilizados para Imageamento, segue a Tabela 1 com os dados pertinentes.

Tabela 1 – Dados das edificações estudadas

Informações/equipamentos	FLIR C5 e A325	VANT M2EA
Identificação	Edificação A	Edificação B
Cidade	Porto Alegre / RS	Santos / SP
Coordenadas da localização (WGS 84)	51°14'10.35" W 30°07'59.09" S	46°19'48.16" W 23°57'08.65" S
Tipo de revestimento	Argamassado	Cerâmico
Manifestação patológica apresentada	Infiltração e deslocamento do revestimento na região da platibanda	Infiltração na região da caixa de água
Altura	13,5m	30,9m
Largura	12m	13m*
Comprimento	30m	43,3m*

Fonte: Do autor

*Valores médios retirados das plantas dos anexos 1 e 2

Figura 26 – Edificação A



Fonte: Do autor

A Figura 26 apresenta a edificação “A”, na cidade de Porto Alegre / RS, onde foram utilizadas as câmeras RGB (DJI Phantom 4 Advanced) e IR (FLIR A325 e FLIR C5).

Figura 27 – Edificação B



Fonte: Do autor

A Figura 27 apresenta a edificação “B”, na cidade de Santos / SP, onde foram utilizadas as câmeras RGB e IR (Mavic 2 Enterprise Advanced)

3.2 LEVANTAMENTO TERMOGRÁFICO

Para o processamento do modelo digital de superfície (MDS), foi necessário a obtenção das imagens termográficas, que foram capturadas através das câmeras FLIR A325 (Figura 28), FLIR C5 (Figura 29) e Mavic 2 Enterprise Advanced (Figura 30), com as seguintes características respectivamente, conforme fabricante, informadas nas Tabela 2 a 4.

Figura 28 – FLIR A325



Fonte: (FLIR, 2021a)

Tabela 2 – Propriedades da câmera utilizada- FLIR A325

Dimensões da câmera	170 x 70 x 70 mm
Sensor de IV	320 x 240 (76.800 pixels)
Câmera Digital	Não Aplicado
Distância Focal Mínima	0,4 m (3,94 pol.)
Faixa Espectral	7,5 a 13 μ m
Frequência da Imagem	30 Hz
Modos de Imagem Imagem de infravermelho	Imagem IR
Paletas de cores	Arco-íris; Ferro; Preto e Branco & Preto e Branco invertido
Correção de Medições	Valor personalizado
Faixa de Temperatura de Objetos	-20 a 120 °C ou 0 a 350 °C
Precisão	± 2 °C ou $\pm 2\%$ da leitura
Sensibilidade Térmica	<50 mK
Tempo Operacional	Não Aplicado
Peso	700 g

Figura 29 – FLIR C5



Fonte: (FLIR, 2021b)

Tabela 3 – Propriedades da câmera utilizada- FLIR C5

Dimensões da câmera	138 x 84 x 24 mm
Sensor de IV	160 x 120 (19.200 pixels)
Câmera Digital	5 MP
Distância Focal Mínima Termal	0,1 m (3,94 pol.)
Distância Focal Mínima MSX	0,3 m (11,8 pol.)
Faixa Espectral	8 a 14 μm
Frequência da Imagem	8,7 Hz
Modos de Imagem	Imagem de infravermelho; Imagem visual (RGB); MSX (detalhes visuais realçados na imagem térmica) e <i>Picture-in-picture</i> (área de infravermelho na imagem visual)
Paletas de cores	Ferro; Cinza; Arco-íris; Arco-íris alto contraste; Ártico e Lava
Correção de Medições	Valor personalizado; Temperatura aparente refletida; Compensação atmosférica e Emissividade (Fosco; Semifosco e Semibrilhante)
Faixa de Temperatura de Objetos	-20 a 400 °C
Precisão com temperatura ambiente variando de 15 a 35 °C	± 3 °C com a temperatura do objeto variando entre 0 e 100 °C ou $\pm 3\%$ com

	a temperatura do objeto entre 100 e 400 °C
Sensibilidade Térmica	<70 mK
Tempo Operacional	4 horas
Peso	190 g

A Figura 30 apresenta o sensor utilizado na coleta de dados e suas informações constam na Tabela 4.

Figura 30 – Sensor Mavic 2 enterprise advanced



Fonte: (VISUAL, 2020)

Tabela 4 – Informações sensor

Dimensões do equipamento	322 x 242 x 84 mm
Sensor de IV	640x512 (327.680 pixels)
Câmera Digital	48Mp
Distância Focal Mínima Termal	9mm
Distância Focal Mínima RGB	9mm
Faixa Espectral	8 a 14 µm
Frequência da Imagem	30 Hz
Modos de Imagem ou Vídeo	Imagem de infravermelho; Imagem visual (RGB)

Paletas de cores	<i>White Hot; Fulgurite; Iron Red; Hot Iron; Medical; Arctic; Rainbow 1; Rainbow 2; Tint e Black Hot</i>
Correção de Medições	Automático ou Manual
Faixa de Temperatura de Objetos	-40 °C a 150 °C com alto ganho ou -40 °C a 550 °C com baixo ganho
Precisão com temperatura ambiente de 25 °C a 5m de distância do objeto	± 2 °C ou $\pm 2\%$ (Para alto ganho; Qualquer que seja o maior valor)
Tempo Operacional	< 31min
Peso	909 g

Os três sensores foram utilizados para a obtenção dos termogramas, possibilitando a comparação entre distintos equipamentos. Em casos específicos, como em levantamentos aéreos com a utilização de VANT, foi utilizado apenas o Mavic 2, devido à câmera termográfica presente no equipamento.

Após coletadas, as imagens registradas pela FLIR C5 passaram por tratamento em *software* próprio para termografia, FLIR *Tools*, da mesma fabricante da câmera, onde foi padronizada a escala de temperatura das imagens, a fim de garantir que todos os elementos registrados da edificação estejam representados pela mesma cor dada sua temperatura *in loco*.

3.2.1 Dados do levantamento

A obtenção dos dados termográficos, como já mencionado, foi realizada em dois locais, sendo o primeiro no dia 05/04/2022, às 10:30, com duração de uma hora, onde foram utilizadas as câmeras termográficas da FLIR (A325 e C5), Tabela 5, e o segundo, no dia 17/04/2022, às 15h, com duração de vinte minutos, com a utilização da plataforma M2EA, Tabela 6.

Tabela 5 – Condições climáticas do dia 05/04/2022 às 11h

Temperatura	20°C
Umidade relativa do ar	89,2%
Pressão atmosférica	1018hPa
Velocidade média do vento	7,4 Km/h

Fonte: (METEORED, 2022a)

A Tabela acima descreve as condições climáticas em Porto Alegre / RS, no dia e horário dos levantamentos termográficos realizados com as câmeras FLIR A325 e FLIR C5.

Tabela 6 – Condições climáticas do dia 17/04/2022 às 15h

Temperatura	23°C
Umidade relativa do ar	83,2%
Pressão atmosférica	1019hPa
Velocidade média do vento	5,6 Km/h

Fonte: (Meteored, 2022b)

A Tabela 6 descreve as condições meteorológicas da cidade de Santos / SP, no instante do levantamento utilizado neste trabalho, com o VANT Mavic.

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS FOTOGRAFAMÉTRICOS

Esta etapa é compreendida pelo processamento em *software* de fotogrametria das imagens resultantes do tratamento supracitado, agregando característica tridimensional ao conjunto, gerando um modelo em escala fiduciária ao ambiente da edificação em estudo, que mantem as informações dimensionais do objeto estudado, permitindo assim que as falhas sejam mensuradas e acuradas em suas origens.

Para que o processamento ocorra de forma satisfatória, as imagens devem possuir sobreposição lateral (*Side Overlap*) de pelo menos 65% e frontal (*Front Overlap*) de no mínimo 75%, garantindo que para qualquer ponto de análise haja uma quantidade ideal de capturas sobrepostas em ângulos distintos.

O processamento fotogramétrico foi utilizado em diferentes escalas de cores, disponibilizadas pelas câmeras ou pelo *software* de tratamento termográfico FLIR Tools, a fim de determinar a paleta na qual seja possível identificar a maior quantidade

de pontos coincidentes entre as imagens sobrepostas, otimizando o resultado da fotogrametria.

3.4 ANÁLISE DO MODELO TERMOGRÁFICO

Nesta etapa, o modelo termográfico 3D foi analisado em busca de distorções geométricas ou colorimétricas que possam resultar em diagnósticos errôneos.

Passando o modelo pela análise primária, este seguiu por uma segunda análise, cujo foco foi a identificação de manifestações patológicas e outras características de caráter relevante para inspeções termográficas, como grandes amplitudes térmicas ou elementos estruturais não visíveis a olho nu.

3.4.1 TRATAMENTO DOS DADOS EM *SOFTWARE*

Dois *softwares* foram utilizados para o aprimoramento e processamento das imagens, sendo estes o FLIR *Tools*, utilizado para ajuste da escala de temperatura dos termogramas obtidos através da câmera FLIR C5, e o Agisoft Photoscan, para processamento fotogramétrico de todos os levantamentos, sejam eles IR ou RGB.

Os ajustes de escala de temperatura de IRT objetivaram uma melhor compreensão dos pontos pelo *software* de fotogrametria, mantendo os termogramas com a mesma cor para cada temperatura medida nas fachadas da edificação. Como as imagens termográficas da FLIR A325 e do M2EA não permitem tal ajuste neste *software*, foram processadas como obtidas em campo no Photoscan.

3.5 ANÁLISE E CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS PATOLÓGICOS

Dando sequência no desenvolvimento do presente estudo, as imagens que possibilitaram a identificação dos danos patológicos são apresentadas, indicando em conformidade com o presente em bibliografia quais os sintomas presentes no local, sua possível causa e o prognóstico, como exemplifica a Tabela 7.

Tabela 7 – Identificação dos danos

Imagem	Dano verificado	Possível causa	Prognóstico
--------	-----------------	----------------	-------------

Fonte: Do autor

Após a identificação dos danos, e principalmente com base no prognóstico e no efeito da falha para a segurança dos ocupantes e do patrimônio, as falhas/danos foram classificadas como mínimo, intermediário e grave.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo foram comparados os modelos tridimensionais resultantes do processo fotogramétrico com a utilização de imagens RGB e IR.

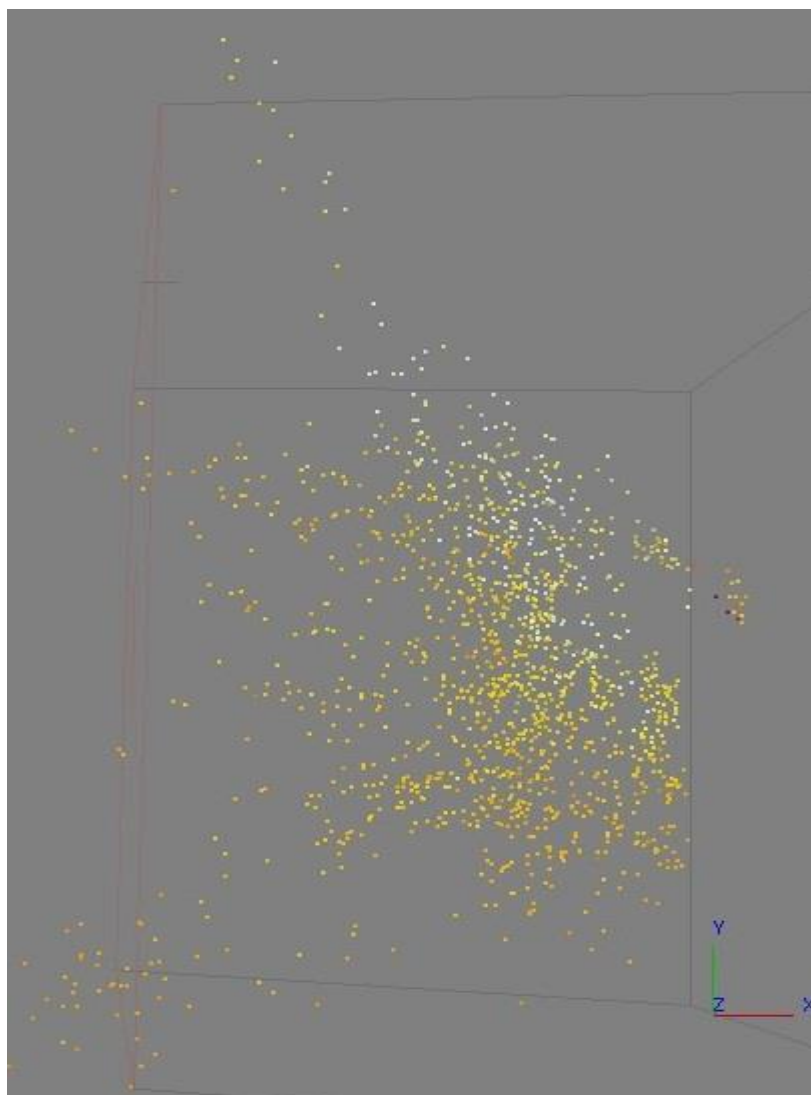
4.1 OBTENÇÃO DOS MODELOS

Devido ao baixo FOV das câmeras da FLIR utilizadas neste trabalho, bem como pela falta de espaço nos empreendimentos estudados, que impediam o distanciamento adequado para obtenção dos termogramas, não houve sobreposição suficiente dos termogramas registrados, impedindo assim a formação de uma nuvem de pontos precisa e consecutivamente impedindo a geração do modelo tridimensional. Já para o levantamento com VANT, não houve limitação de distância para aquisição das imagens, garantindo a sobreposição necessária ao processo fotogramétrico.

4.1.1 FLIR C5

Com base no levantamento termográfico realizado com a câmera FLIR C5, apresentado neste capítulo e disponível no apêndice C, não foi possível gerar uma nuvem de pontos conclusiva, demonstrando baixa densidade de pontos, como fica nítido na Figura 31, impedindo assim a geração do modelo 3D e da Textura.

Figura 31 – Nuvem de pontos IR resultante do levantamento com a FLIR C5



Fonte: Do autor

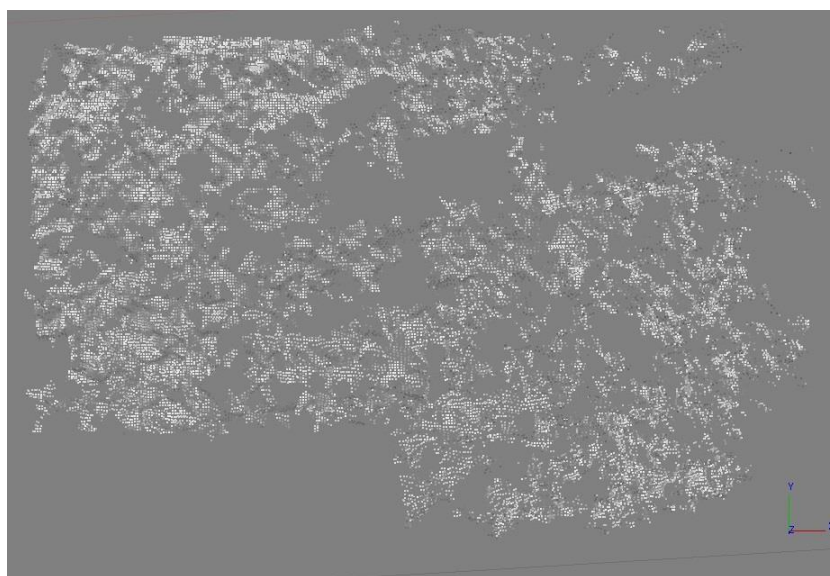
Como pode ser percebido na Figura 31, o resultado do processamento fotogramétrico não possibilitou a geração de uma nuvem de pontos que representasse a superfície de maneira fiduciária, ficando amorfa e não representando a geometria da edificação.

O baixo FOV e a falta de espaço para distanciamento das fachadas no momento do registro dos termogramas foram fatores decisivos na ineficiência desse sistema, que culminaram na incapacidade de processamento fotogramétrico pelo *software*.

4.1.2 FLIR A325

Sobre os termogramas obtidos através da câmera FLIR A325, foi possível gerar uma nuvem de pontos de baixa qualidade, como demonstrado pela Figura 32, com densidade suficiente para gerar um modelo 3D parcial da fachada, como pode ser observado na Figura 33.

Figura 32 – Nuvem de pontos IR resultante do levantamento com a FLIR A325



Fonte: Do autor

Figura 33 – Modelo 3D texturizado parcial



Fonte: Do autor

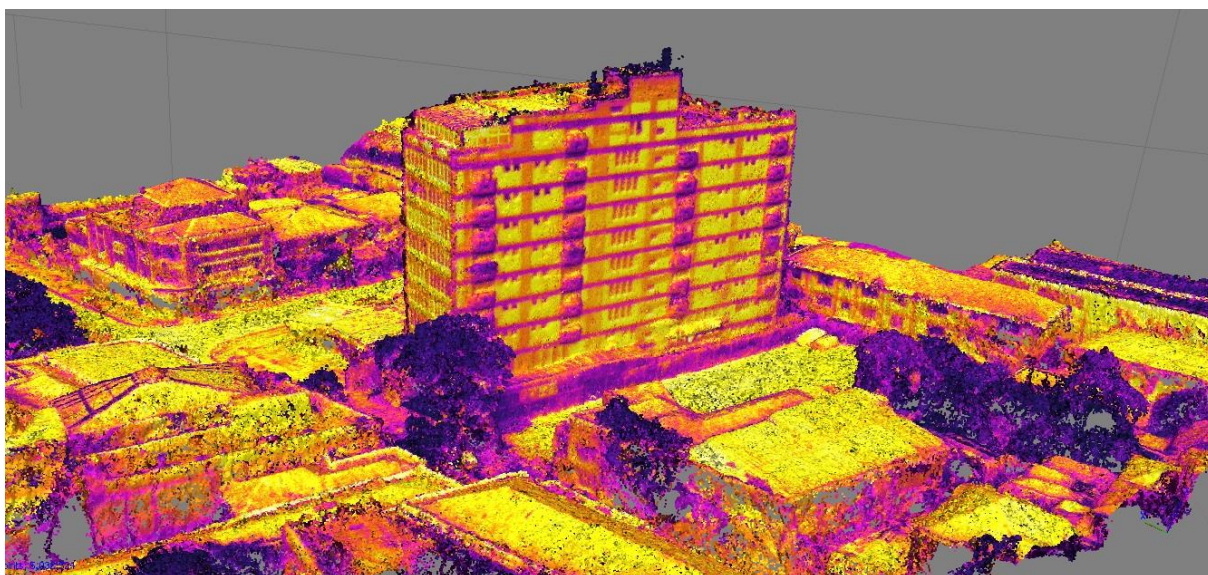
Assim como no capítulo anterior, tanto o baixo FOV quanto a falta de espaço para realizar um adequado distanciamento da edificação foram fatores impeditivos à conclusão do modelo da fachada por completo, porém, com uma maior resolução de imagem IV, quando comparada com a FLIR C5, foi possível gerar o modelo parcial descrito.

Antón & Amaro-Mellado (2021), ao coletar dados em campo de edificações, registraram imagens semelhantes a apresentada acima, tendo, no entanto, em decorrência de uma maior distância de coleta, gerado um modelo com maior nitidez.

4.1.3 Mavic 2 Enterprise Advanced

Processando as imagens IR e RGB obtidas através do M2EA, com o distanciamento adequado do objeto e com imagens de alta resolução, obteve-se uma nuvem de pontos de alta qualidade e densidade, assim como um modelo tridimensional texturizado e ortomosaicos das fachadas e coberturas, como demonstrado pelas Figuras 34 à 42.

Figura 34 – Nuvem de pontos IR resultante do levantamento com o M2EA



Fonte: Do autor

O processo fotogramétrico com IRT proveniente da RPA resultou em uma nuvem de pontos bastante agrupada, que muito se assemelha com a coloração dos termogramas utilizados e com a geometria do terreno e das edificações, quando comparado com a nuvem de pontos RGB da Figura 35.

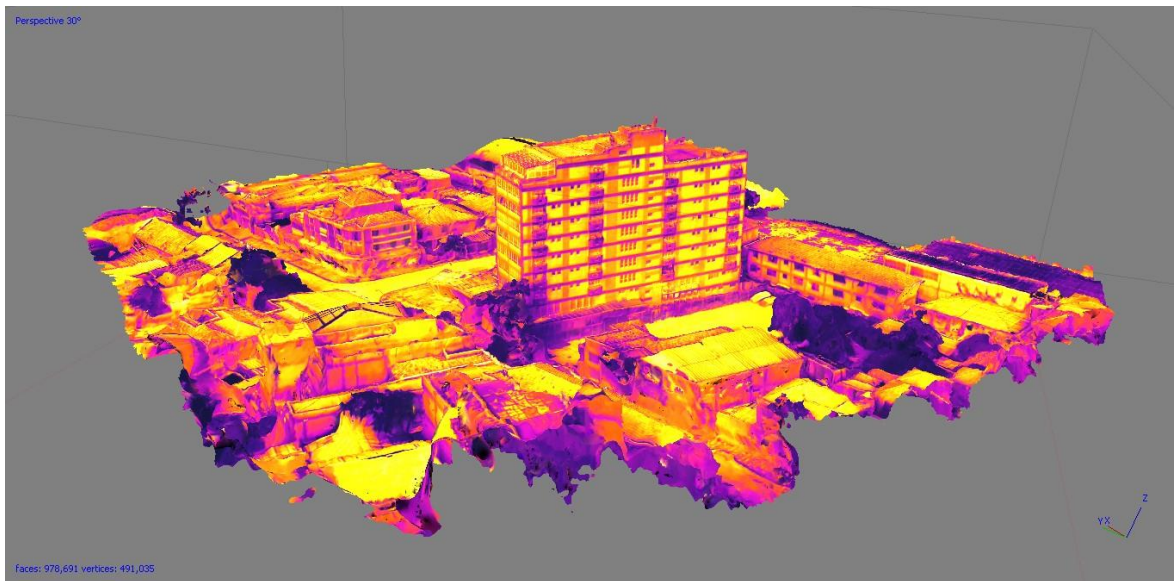
Figura 35 – Nuvem de pontos RGB resultante do levantamento com o M2EA



Fonte: Do autor

Como descrito na revisão bibliográfica, mesmo sem a utilização dos pontos de controle, as características dimensionais, excluindo-se o georreferenciamento, apresentam precisão suficiente para este tipo de processamento, quando comparadas com aqueles amarrados por pontos de controle. Essa constatação permite a análise da acurácia geométrica da nuvem de pontos IR ao compará-la com a nuvem de pontos RGB.

Figura 36 – Modelo 3D com textura IR resultante do levantamento com o M2EA



Fonte: Do autor

Devido à densidade da nuvem de pontos gerada sobre os termogramas do Mavic (Figura 34), foi possível gerar um modelo tridimensional sobre essa mesma nuvem e texturizá-lo com o ortomosáico, resultando no modelo da Figura 36.

Figura 37 – Modelo 3D com textura RGB resultante do levantamento com o M2EA



Fonte: Do autor

Pelo mesmo motivo do modelo 3D IR, o modelo 3D RGB (Figura 37) também se demonstrou homogêneo, tanto na geometria quanto na coloração, sem apresentar distorções na área estudada, característica comum deste tipo de levantamento nas regiões próximas às bordas dos modelos tridimensionais. A Figura a seguir apresenta o comparativo entre mosaicos IR e RGB da cobertura.

Figura 38 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da cobertura



Fonte: Do autor

Comparando os ortomosaicos IR e RGB da cobertura, na região central das imagens, não apresentam distorções, demonstrando dimensões compatíveis com o tipo de processamento, como descrito no capítulo a seguir.

Figura 39 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Oeste



Fonte: Do autor

Na comparação dos ortomosaicos IR e RGB da fachada Oeste, na região central das imagens, não apresentam distorções significativas, demonstrando

dimensões compatíveis com o tipo de processamento, como descrito no próximo capítulo.

Figura 40 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Norte

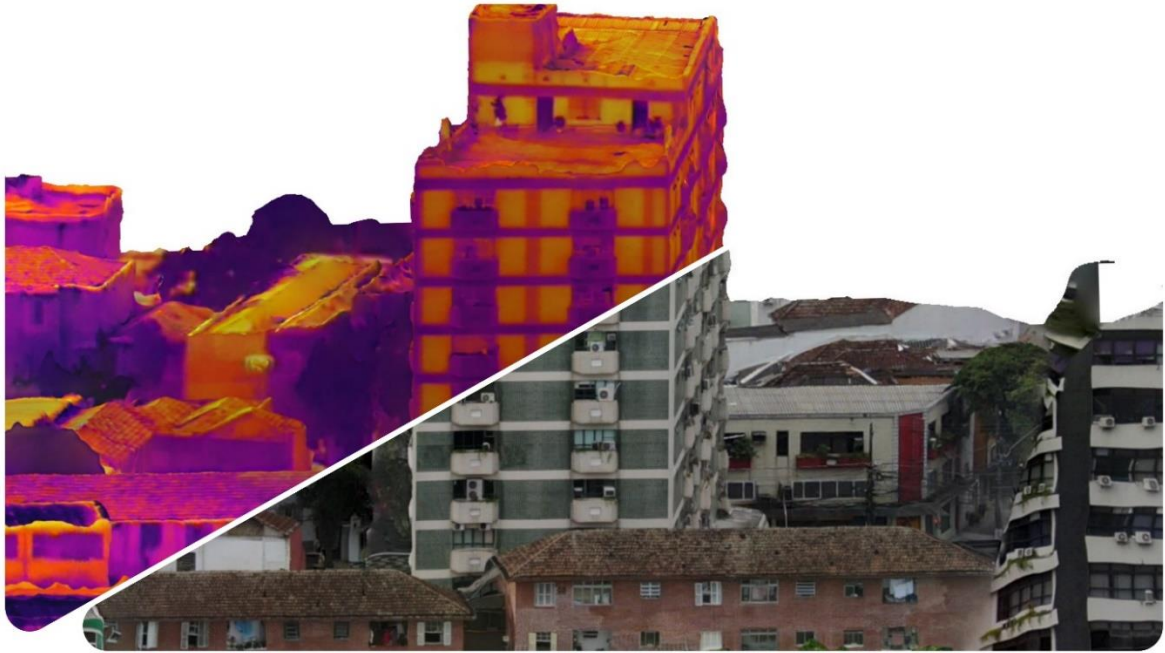


Fonte: Do autor

Como mencionado nas Figuras 38 e 39, os ortomosaicos IR e RGB apresentaram boa geometria na região central, como apresenta o capítulo que segue.

As distorções presentes na Figura 40 localizam-se nas extremidades do ortomosaico, sendo elas características do processo fotogramétrico e apresentando-se na imagem apenas pela posição de captura do mosaico dentro do *software*.

Figura 41 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Sul



Fonte: Do autor

Figura 42 – Comparação entre mosaicos IR e RGB da fachada Leste

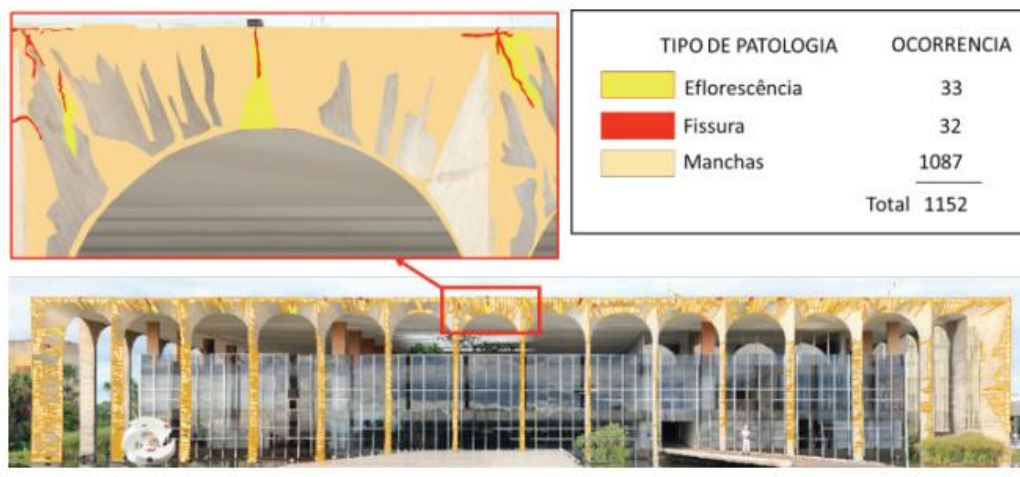


Fonte: Do autor

Costa et al. (2014) informam que a utilização do sensoriamento remoto permite mais agilidade, segurança, acurácia e precisão no diagnóstico de edificações, eliminando, por exemplo, a necessidade de locação de equipamentos, trabalho em altura ou outros, que dependendo do cenário possam vir a ser necessários.

Os autores aplicaram a técnica no Palácio do Itamaraty, como apresenta a Figura 43.

Figura 43 – Sensoriamento remoto no Palácio do Itamaraty



Fonte: (COSTA et al., 2014, p 164)

Como pode-se perceber, os autores conseguiram identificar pela captura os pontos de existência de eflorescência, fissuras e manchas.

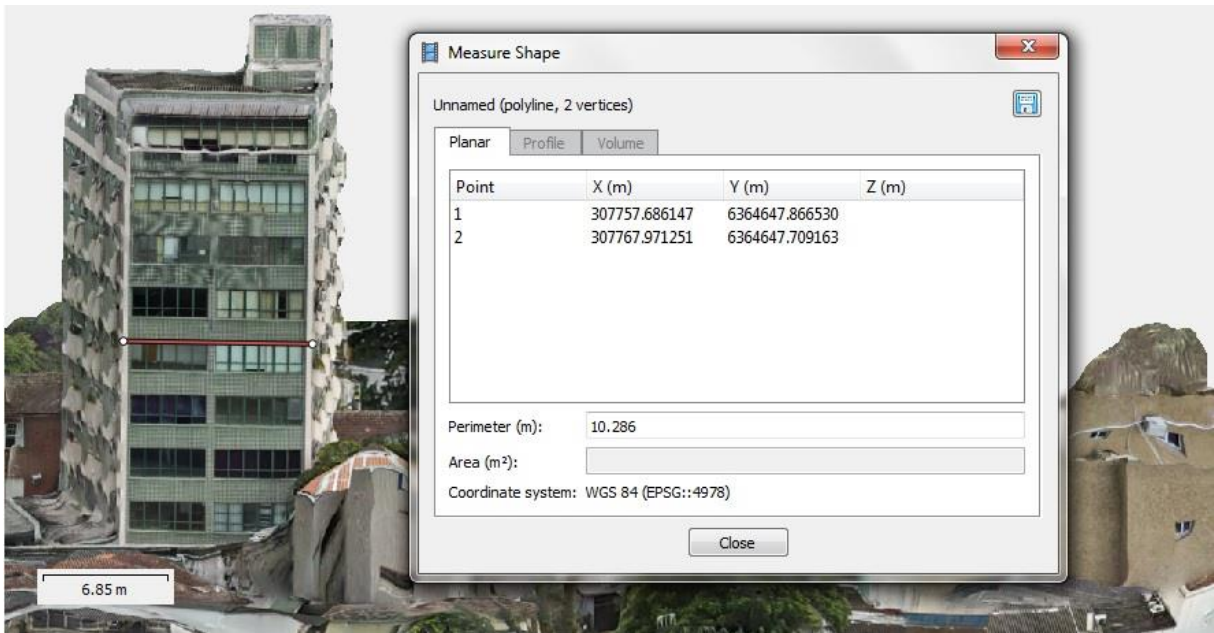
4.1.4 ANÁLISE COMPARATIVA

Como já mencionado nos capítulos 4.1.2 e 4.1.3, devido ao baixo FOV das câmeras da FLIR utilizadas neste trabalho e à falta de espaço para o devido distanciamento entre fachada e câmera termográfica, foi possível gerar o modelo 3D da edificação apenas no levantamento utilizando a RPA M2EA, que não possui restrição de distância para obtenção dos termogramas.

Por possuir sistema de *GPS/GLONASS*, além de sensores IR e RGB, o VANT utilizado gera imagens georreferenciadas em ambos os espectros de luz, possibilitando o processamento das nuvens de pontos das Figuras 34 e 35, e dos modelos 3D das Figuras 36 e 37, propostos neste trabalho.

Em posse dos ortomosaicos nos espectros de luz visível e infravermelho, foi possível medir as fachadas da edificação e comparar os dados com as plantas da mesma, constantes nos Anexos A e B, como comprovado pelas Figuras 44 à 55.

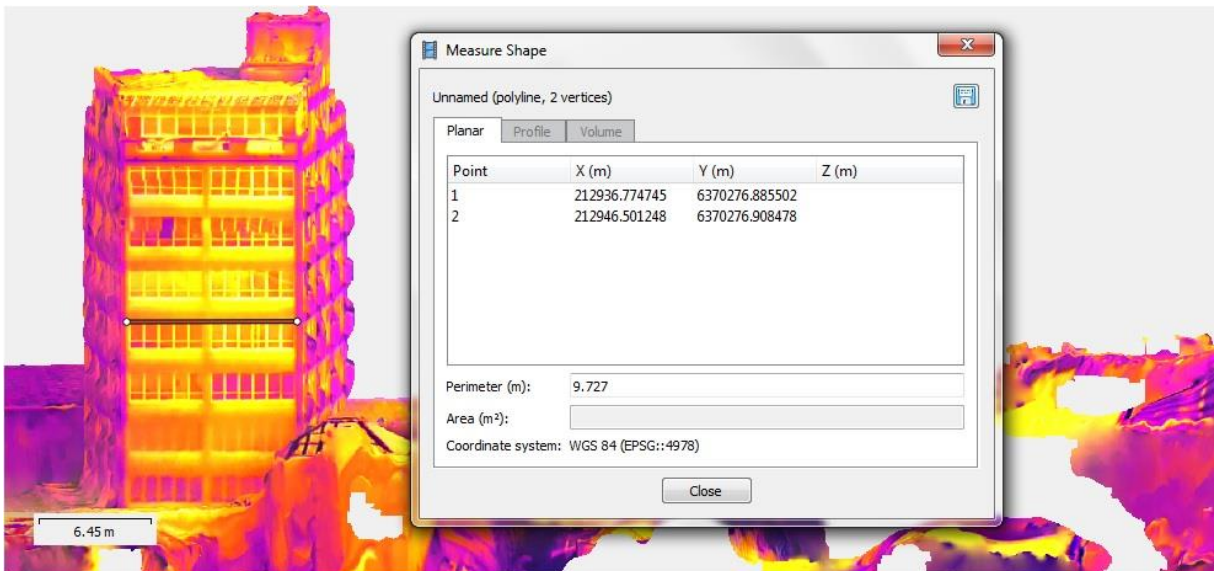
Figura 44 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Norte



Fonte: Do autor

A Figura 44 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico RGB, a fachada Norte possui aproximadamente 10,29 metros de largura.

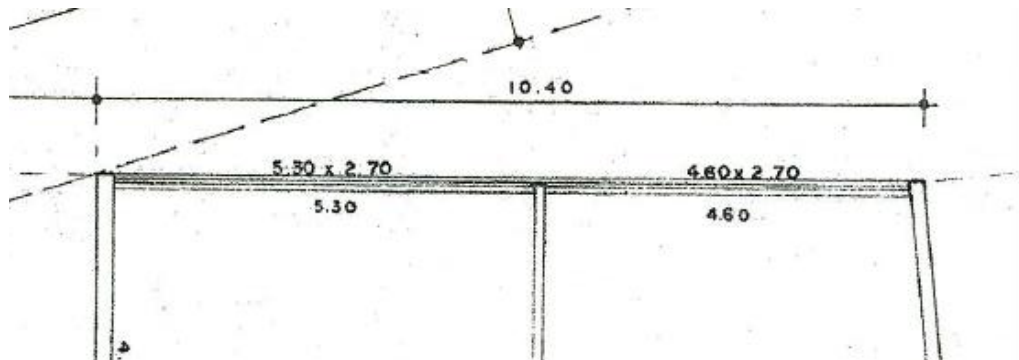
Figura 45 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Norte



Fonte: Do autor

A Figura 45 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico IR, a fachada Norte possui aproximadamente 9,73 metros de largura.

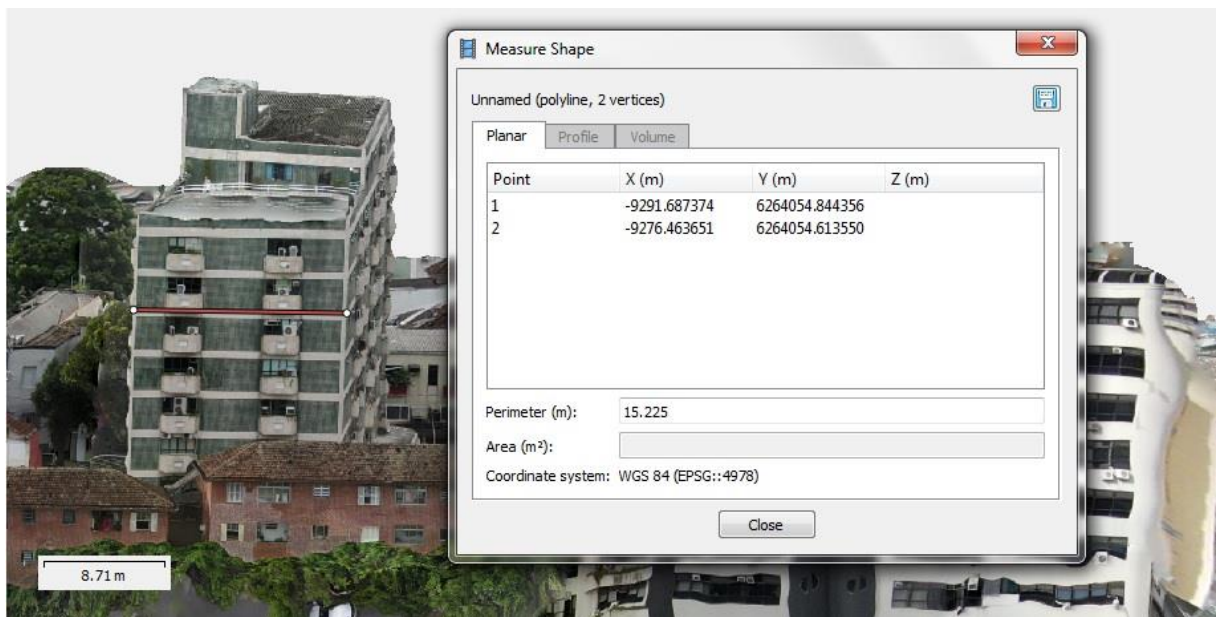
Figura 46 – Medida de projeto da fachada Norte



Fonte: Do autor

Como demonstra a Figura 46, de acordo com o projeto da edificação, a fachada Norte possui 10,4 metros de largura.

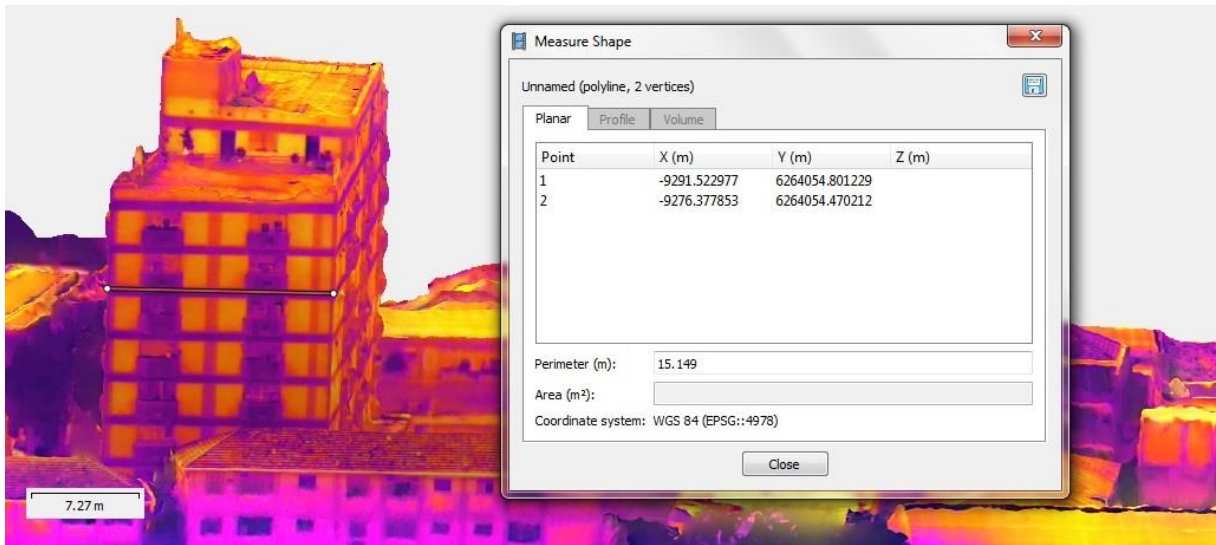
Figura 47 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Sul



Fonte: Do autor

A Figura 47 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico RGB, a fachada Sul possui aproximadamente 15,23 metros de largura.

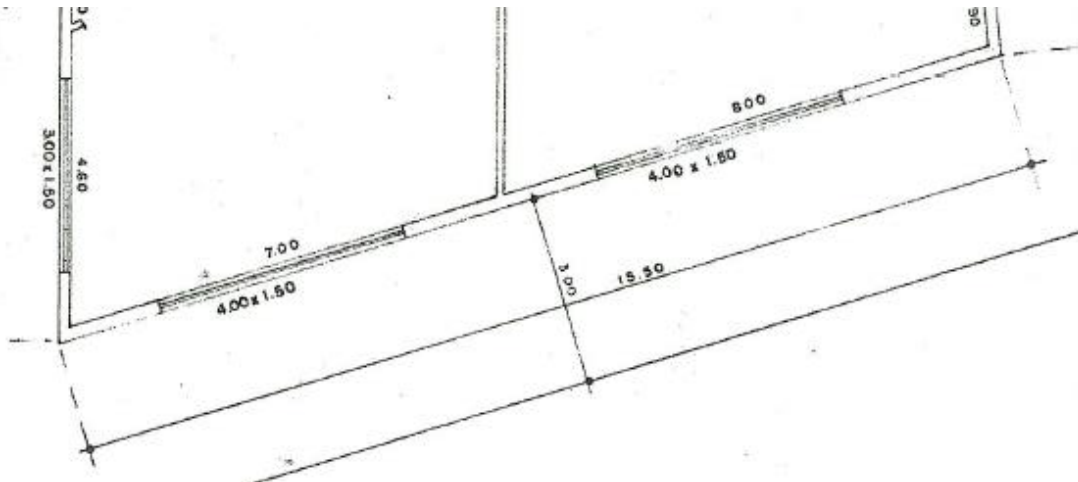
Figura 48 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Sul



Fonte: Do autor

A Figura 48 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico IR, a fachada Sul possui aproximadamente 15,15 metros de largura.

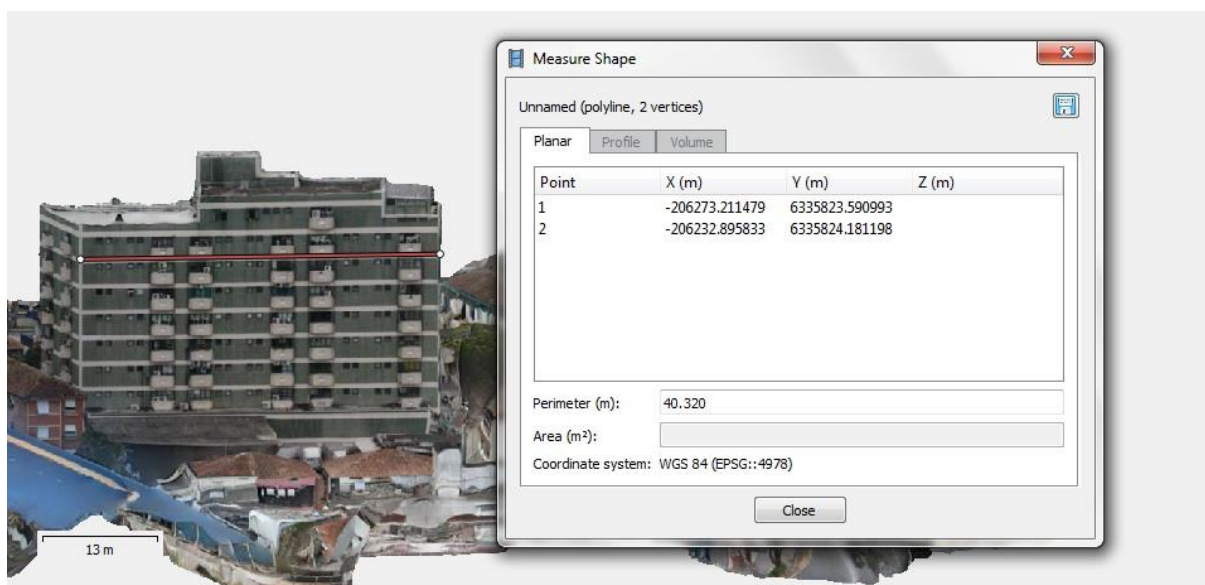
Figura 49 – Medida de projeto da fachada Sul



Fonte: Do autor

Como demonstra a Figura 49, de acordo com o projeto da edificação, a fachada Sul possui 15,5 metros de largura.

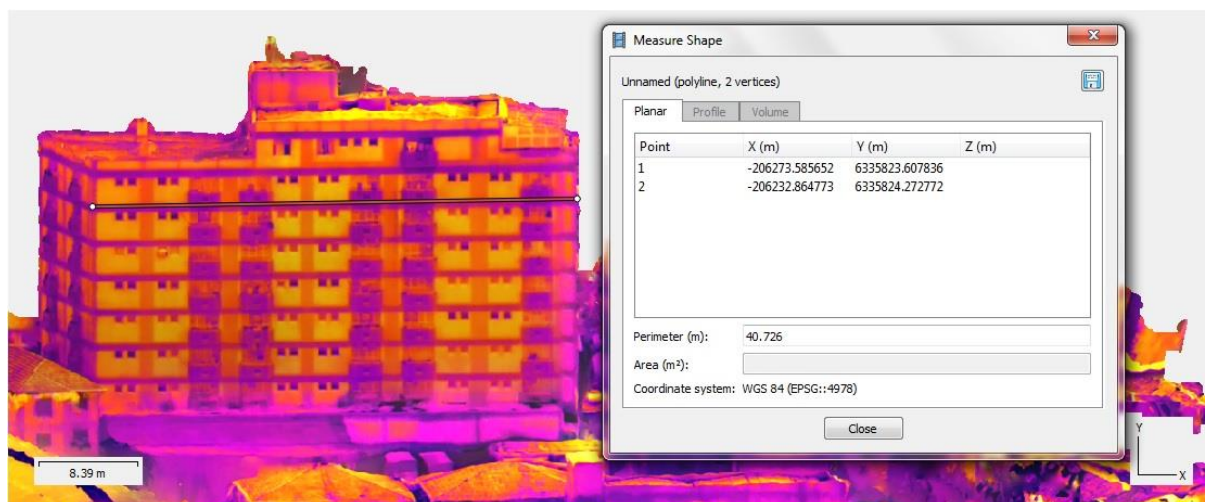
Figura 50 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Leste



Fonte: Do autor

A Figura 50 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico RGB, a fachada Leste possui aproximadamente 40,32 metros de largura.

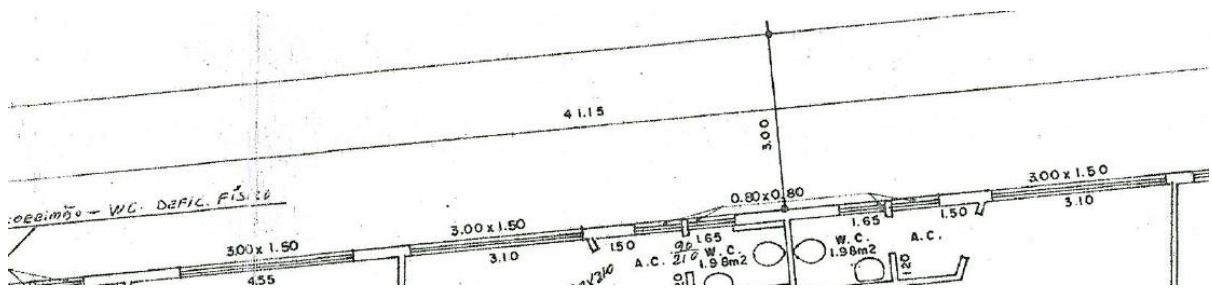
Figura 51 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Leste



Fonte: Do autor

A Figura 51 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico IR, a fachada Leste possui aproximadamente 40,73 metros de largura.

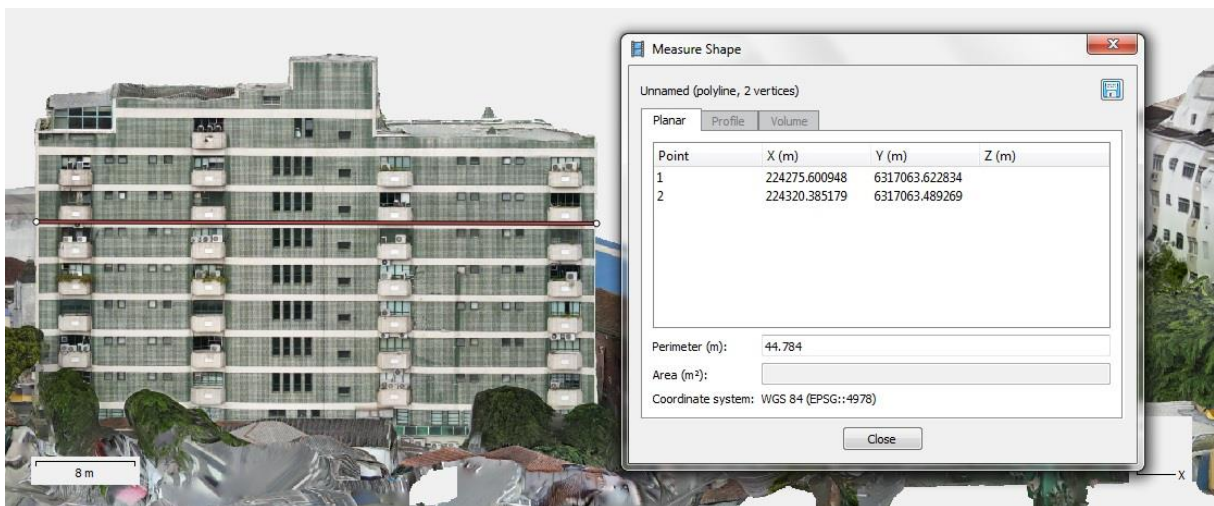
Figura 52 – Medida de projeto da fachada Leste



Fonte: Do autor

Como demonstra a Figura 52, de acordo com o projeto da edificação, a fachada Leste possui 41,15 metros de largura.

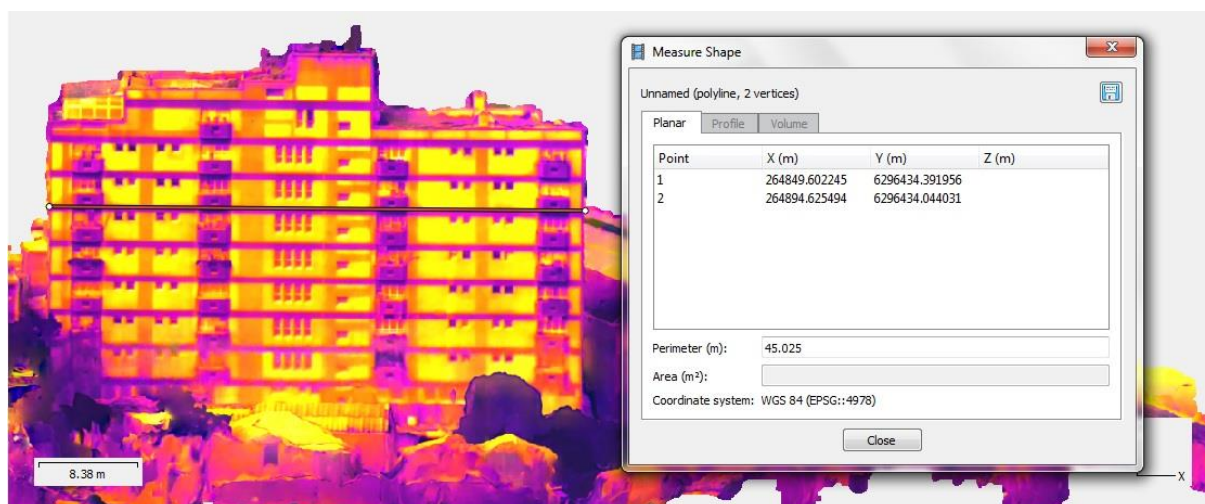
Figura 53 – Medida sobre ortomosaico RGB da fachada Oeste



Fonte: Do autor

A Figura 53 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico RGB, a fachada Oeste possui aproximadamente 44,78 metros de largura.

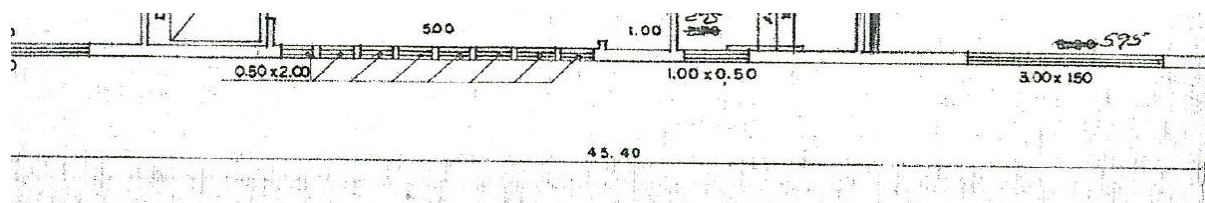
Figura 54 – Medida sobre ortomosaico IR da fachada Oeste



Fonte: Do autor

A Figura 54 comprova que, com base no levantamento aerofotogramétrico IR, a fachada Oeste possui aproximadamente 45,03 metros de largura.

Figura 55 – Medida de projeto da fachada Oeste



Fonte: Do autor

Como demonstra a Figura 55, de acordo com o projeto da edificação, a fachada Oeste possui 45,4 metros de largura. Resumindo os dados apresentados acima, a Tabela 8 apresenta os dados medidos, assim como os valores médios quando comparados entre ortomosaicos RGB, IR e projeto.

Tabela 8 – Resumo das distâncias medidas

	Metros			Média
	Projeto	Fotogrametria		
Fachada	Pavimento tipo	Levantamento IR	Levantamento RGB	
Norte	10,40	9,73	10,29	10,14
Sul	15,50	15,15	15,23	15,29
Leste	41,15	40,73	40,32	40,73
Oeste	45,40	45,03	44,78	45,07

Fonte: Do autor

Comparando percentualmente as distâncias medidas sobre os ortomosáicos IR e RGB com as dimensões de projeto, chegamos ao resultado presente na Tabela 9.

Tabela 9 – Comparativo percentual da diferença de distâncias entre ortomosaicos e projeto

	Levantamento IR	Levantamento RGB
Norte	93,56%	98,94%
Sul	97,74%	98,26%
Leste	98,98%	97,98%
Oeste	99,19%	98,64%
Média	97,37%	98,46%

Fonte: Do autor

Com os dados explícitos na Tabela acima, percebe-se que o maior erro sobre as dimensões de projeto está na fachada Norte do levantamento IR, na grandeza de 6,44%, enquanto o menor erro pertence à fachada Oeste, também do levantamento IR, na ordem de 0,81%.

O levantamento RGB foi aquele que apresentou menor desvio padrão das medidas sobre o projeto, apresentando uma diferença percentual média de 1,54%, atingindo, em média, 98,46% de similaridade nas medidas da planta baixa do pavimento tipo da edificação (Anexos A e B).

4.2 IDENTIFICAÇÃO DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

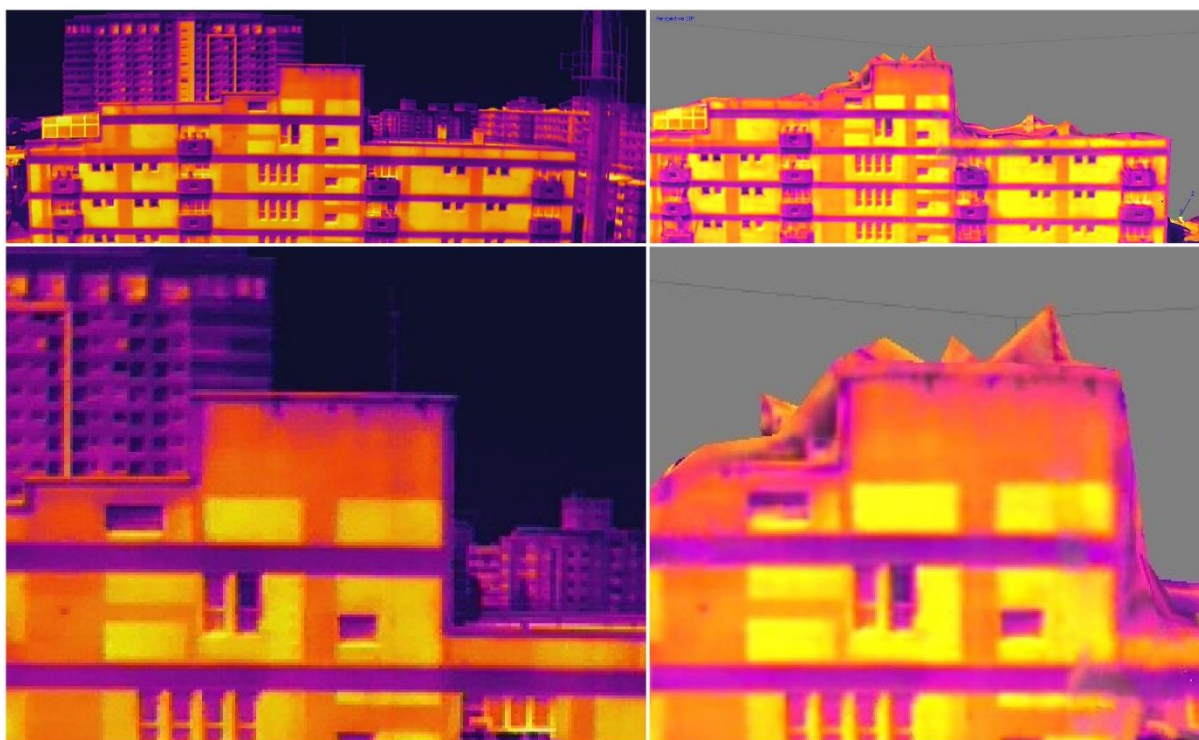
Dando continuidade, nesse capítulo são apresentados dados que foram passíveis de identificação através das técnicas de IRT empregadas.

Devido à interpolação das imagens, as diferenças nas temperaturas indicadas nos termogramas através das cores foi intensificada pelo processo fotogramétrico, destacando as manifestações patológicas que interferem no coeficiente térmico do substrato, como no caso da Figura abaixo.

A Figura 56 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (a) apresenta um dos termogramas da fachada oeste, onde manifesta-se uma infiltração sob os reservatórios de concreto armado, da mesma forma como na Figura 5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 6 (b), obtida através do modelo tridimensional IR, que demonstra com cores mais intensas e definidas a mesma manifestação.

Figura 56 – Termograma (a)

Modelo tridimensional IR(b)




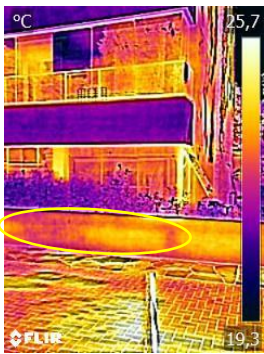
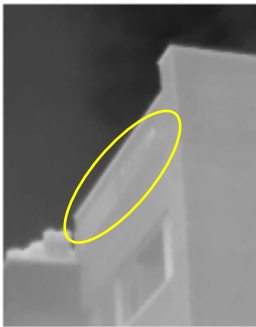
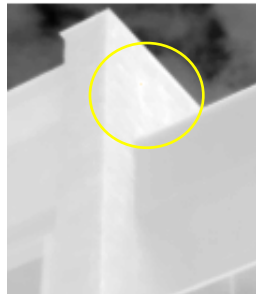
Fonte: Do autor

Após a obtenção dos termogramas e dos modelos 3D, foi possível identificar os pontos deficientes nas fachadas das edificações estudadas, resumidos nas Tabelas 10 e 11.

4.2.1 Manifestações patológicas na edificação A

Como não foi possível obter o modelo tridimensional do edifício A, foram identificadas as manifestações patológicas através dos termogramas obtidos com as câmeras termográficas FLIR C5 e FLIR A325, como descrito pela Tabela 10.

Tabela 10 – Identificação de manifestações patológicas sobre termogramas

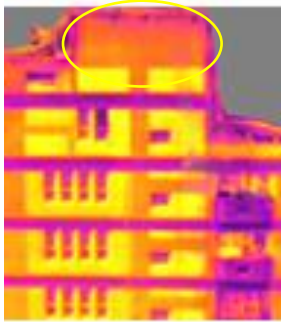
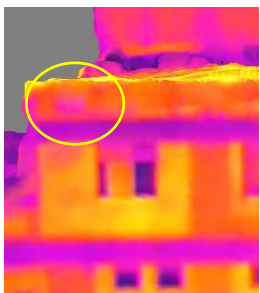
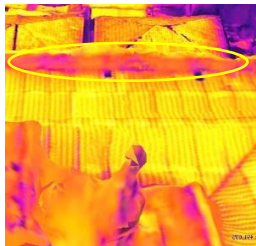
Imagem	Equipamento	Dano verificado	Possível causa	Prognóstico
	FLIR C5	Maior concentração de umidade na face superior da edificação	Desempenho do sistema de impermeabilização / tratamento térmico da cobertura	Sem o desempenho satisfatório o sistema poderá apresentar infiltrações ou danos no revestimento da fachada no local.
	FLIR C5	Infiltração na região da floreira	Desempenho do sistema de impermeabilização na região afetada	Possível deslocamento do revestimento argamassado da região afetada e possível proliferação de agentes patogênicos biológicos, como o Mofo, por exemplo
	FLIR A325	Deslocamento de revestimento argamassado e infiltração na platibanda	Desempenho do sistema de impermeabilização / ineficiência do rufo	Possível queda do revestimento argamassado, podendo causar dano físico e material / arquitetônico
	FLIR A325	Infiltração na fachada	Ineficiência do rufo / falha no sistema de revestimento em pedra	Possível desprendimento do revestimento de pedra

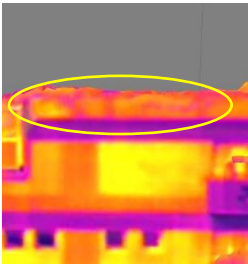
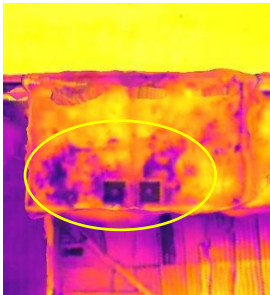
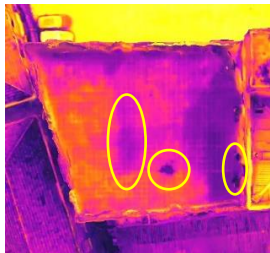
Fonte: Do autor

4.2.2 Manifestações patológicas na edificação B

Devido a facilidade de visualizar e identificar as manifestações patológicas sobre o modelo 3D quando comparado com a identificação sobre os termogramas de forma individual, a Tabela 11 apresenta as imagens obtidas diretamente do *software* de fotogrametria.

Tabela 11 – Identificação de manifestações patológicas sobre o modelo 3D

Imagem	Equipamento	Dano verificado	Possível causa	Prognóstico
	M2EA	Infiltração na região dos reservatórios	Desempenho do sistema de impermeabilização dos reservatórios	Aceleração do processo de oxidação das armaduras da região e possível queda do revestimento argamassado, podendo causar dano físico e material / arquitetônico
	M2EA	Infiltração na platibanda Leste (lado externo)	Desempenho do sistema de impermeabilização / ineficiência do rufo	Possível queda do revestimento argamassado, podendo causar dano físico e material / arquitetônico
	M2EA	Infiltração na platibanda Leste (lado interno)	Desempenho do sistema de impermeabilização / ineficiência do rufo	Possível queda do revestimento argamassado, podendo causar dano físico e material / arquitetônico

	M2EA	Infiltração na platibanda Oeste (lado externo)	Desempenho do sistema de impermeabilização / ineficiência do rufo	Possível queda do revestimento argamassado, podendo causar dano físico e material / arquitetônico
	M2EA	Acúmulo de material biológico ou esporúcia	Possível falta de caimento / escoamento das águas pluviais e falta de manutenção / limpeza	Possível propagação de doenças por agentes patogênicos
	M2EA	Acúmulo de água na cobertura do edifício	Possível falta de caimento / escoamento das águas pluviais	Possibilidade de infiltração pela laje, na eventualidade de falha do sistema de impermeabilização

Fonte: Do autor

4.3 CLASSIFICAÇÃO DOS DANOS

Conforme citado, os danos foram classificados baseando-se no seu grau de risco ou danos aos usuários e à edificação como um todo. Assim, a Tabela 12 apresenta uma síntese das manifestações encontradas no presente estudo.

Tabela 12 – Grau de risco ou danos aos usuários e à edificação

Edificação	Dano verificado	Grau de risco	Observações
B	Maior concentração de umidade na face superior da edificação	MÍNIMO	Em casos mais severos, pode gerar mofo, agente biológico e patogênico, que pode ser prejudicial à saúde, aumentando assim o grau de

			risco de MÍNIMO para INTERMEDIÁRIO
B	Infiltração na região da floreira	MÍNIMO	Em casos mais severos, pode gerar mofo, agente biológico e patogênico, que pode ser prejudicial à saúde, aumentando assim o grau de risco de MÍNIMO para INTERMEDIÁRIO
B	Deslocamento de revestimento argamassado e infiltração na platibanda	INTERMEDIÁRIO	Em casos mais avançados, não havendo o correto tratamento, o volume deslocado pode se desprender da platibanda e cair sobre algo ou alguém, aumentando o grau de risco de INTERMEDIÁRIO para GRAVE
B	Infiltração na fachada	MÍNIMO	É possível um futuro desprendimento das pedras, que cairiam sobre a cobertura, não oferecendo maior risco à edificação ou aos usuários, mas apenas prejuízo arquitetônico.
A	Infiltração na região dos reservatórios	INTERMEDIÁRIO	Não havendo o correto tratamento da infiltração, em casos mais avançados, pode haver perda de seção da armadura por oxidação, podendo resultar em perda de capacidade portante do elemento, possibilitando, no pior dos casos, o rompimento dos reservatórios de concreto

			armado, passando o grau de risco de INTERMEDIÁRIO para GRAVE
A	Infiltração na platibanda Leste (lado externo)	MÍNIMO	Em casos mais avançados e sem o correto tratamento, o volume deslocado pode se desprender da platibanda e cair sobre algo ou alguém, aumentando o grau risco de INTERMEDIÁRIO para GRAVE
A	Infiltração na platibanda Leste (lado interno)	MÍNIMO	Mesmo em casos mais avançados, um possível desprendimento volumétrico de argamassa não ofereceria risco aos usuários, podendo apenas danificar as telhas imediatamente abaixo da região identificada, resultando então em uma percolação de água pluvial
A	Infiltração na platibanda Oeste (lado externo)	MÍNIMO	Em casos críticos e sem tratamento, o volume deslocado pode se desprender da platibanda e cair sobre algo ou alguém, aumentando o grau risco de INTERMEDIÁRIO para GRAVE
B	Acúmulo de material biológico ou espurcícia	INTERMEDIÁRIO	Em contato físico, pode gerar contaminação, podendo ser um vetor de doenças
B	Acúmulo de água na cobertura do edifício	MÍNIMO	Apesar de pouco provável, na eventual falha do sistema de impermeabilização, pode

			ocorrer a infiltração da água pluvial pela laje, e assim, acelerar o processo de oxidação da armadura, passando o grau de risco de MÍNIMO para INTERMEDIÁRIO
--	--	--	--

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possuía o objetivo inicial de identificar a eficácia da identificação e mensuração de manifestações patológicas através de modelos tridimensionais de edificações, processados sobre imagens termográficas de espectro infravermelho, objetivo que foi atingido, mesmo havendo à necessidade de haver grandes distâncias para obtenção dos termogramas da fachada ou então de uma câmera termográfica com FOV suficiente para o levantamento, dadas as dimensões das fachadas e o espaço disponível para o distanciamento da mesma.

Foram coletados dados termográficos com IRT utilizando três sensores distintos e imagens aéreas RGB de duas edificações, nas cidades de Porto Alegre / RS e Santos / SP.

Sobre as imagens IR e RGB foram processadas nuvens de pontos, modelos tridimensionais e ortomosaicos. Constatou-se que o processamento foi efetivo apenas para termogramas que registrassem a fachada por completo, necessitando de câmeras com FOV adequado à situação ou um maior distanciamento da edificação.

Não foi possível comprovar a acurácia da escala Kelvin pois o *span* não foi ajustado no *software* FLIR *Tools*, devido à incompatibilidade do arquivo, para que todos os pontos da fachada com a mesma temperatura fossem identificados pela mesma cor e porque não foi possível gerar outro modelo 3D da mesma edificação com outra câmera para comparação dos dados.

Comparando as medidas obtidas sobre os ortomosaicos IR e RGB com as medidas de projeto, foi possível perceber uma pequena diferença dimensional, variando a precisão de 93,56% a 99,19% para o processamento IR e de 97,98% a 98,94% para o processamento RGB. Comparando as dimensões entre levantamentos, que variam pouco, pode ser questionado se as dimensões reais da edificação são compatíveis com as de projeto.

Por fim, foram identificadas e classificadas por grau de risco as manifestações patológicas presentes nas fachadas, tanto por análise de termograma quanto diretamente sobre o modelo tridimensional, comprovando a possibilidade de identificação de determinadas manifestações patológicas sobre este tipo de processamento de imagens.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 16292:2014 Ensaios não destrutivos — Termografia — Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas, Pub. L. No. 978-85-07-978-85-07-04963-0, 9 (2014). <https://www.abntcolegao.com.br/unisinos/pdfview/viewer.aspx?Q=D69A6706B755A011B1F559D11BAF9AE10C60E90AB43D30B815FE5D2B69B57C5F>
- ABNT NBR 15424:2016 Ensaios não destrutivos - Termografia - Terminologia, Pub. L. No. 978-85-07-978-85-07-06612-5, 11 (2016). <https://www.abntcolegao.com.br/unisinos/pdfview/viewer.aspx?Q=61A56D7E6513AD80E70AEE5D4EADBFC7D2C19F626B91E009>
- Alam, F. W. A., Pinz, F. P., Torres, A. S., & Paliga, C. M. (2016). Potencial da Termografia Infravermelha na Detecção de Manifestações Patológicas Ocultas Ocasionadas pela Umidade Acidental em Paredes de Alvenarias Cerâmicas com Revestimento de Argamassa e Pintura. *Revista de Arquitetura IMED*, 5(1), 28–47. <https://doi.org/10.18256/2318-1109/arqimed.v5n1p28-47>
- Alba, M. I., Barazzetti, L., Scaioni, M., Rosina, E., & Previtali, M. (2011). Mapping infrared data on terrestrial laser scanning 3D models of buildings. *Remote Sensing*, 3(9), 1847–1870. <https://doi.org/10.3390/rs3091847>
- Altoé, L., & Oliveira Filho, D. (2012). Termografia Infravermelha Aplicada À Inspeção De Edifícios. *Acta Tecnológica*, 7(1), 55. <https://doi.org/10.35818/acta.v7i1.113>
- Antón, D., & Amaro-Mellado, J. L. (2021). Engineering graphics for thermal assessment: 3D thermal data visualisation based on infrared thermography, GIS and 3D point cloud processing software. *Symmetry*, 13(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/sym13020335>
- Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring - A review. *Infrared Physics and Technology*, 60, 35–55. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2013.03.006>
- Barreira, E., Almeida, R. M. S. F., & Delgado, J. M. P. Q. (2016). Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. *Construction and Building Materials*, 110, 251–269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026>
- Bauer, E., de Freitas, V. P., Mustelie, N., Barreira, E., & de Freitas, S. S. (2015). Infrared thermography – evaluation of the results reproducibility. *Structural*

- Survey*, 33(1), 20–35. <https://doi.org/10.1108/SS-05-2014-0021>
- Bauer, E., Pavón, E., Oliveira, E., & Pereira, C. H. F. (2016). Facades inspection with infrared thermography: cracks evaluation. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0002-9>
- Calado, F. A. R. (2013). Sistema de visão multispectral para uma plataforma robótica de inspeção termográfica em subestação de energia. *MSc Thesis*, 111.
- CALDEIRA, M. M. (2016). *APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA IDENTIFICAÇÃO DE DANOS NA ADERÊNCIA ENTRE CONCRETO E POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS*.
- Callister, W. D. (1999). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução* (Vol. 5).
- Cerdeira, F., Vázquez, M. E., Collazo, J., & Granada, E. (2011). Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes. *Energy and Buildings*, 43(8), 1845–1851. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.029>
- Cho, Y. K., Ham, Y., & Golpavar-Fard, M. (2015). 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.03.004>
- Costa, M. S., Christakou, E. D., Silva, L. S. Da, & Nepomuceno, A. A. (2014). *Identificação de Danos em Fachadas de Edificações: Geração de Mosaicos Fotográficos Obtidos por Plataforma Robótica*. 1(January), 161–165. <https://doi.org/10.5151/despro-sigradi2013-0029>
- Costanzo, A., Minasi, M., Casula, G., Musacchio, M., & Buongiorno, M. F. (2015). Combined use of terrestrial laser scanning and IR Thermography applied to a historical building. *Sensors (Switzerland)*, 15(1), 194–213. <https://doi.org/10.3390/s150100194>
- Coutinho, F. A. (2021). USO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA DETECÇÃO DE INFILTRAÇÃO EM ÁREAS INTERNAS DE UMA EDIFICAÇÃO: ESTUDO DE CASO. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*, 21.
- de Castro, C. M. S. B. (2003). *PRODUÇÃO DE FILMES FINOS DE DIÓXIDO DE VANÁDIO POR PULVERIZAÇÃO CATÓDICA*. http://www.ime.eb.mil.br/arquivos/teses/se4/cm/Marcelo_Silva_Bortolini_de_Castro.pdf
- De Freitas, S. S., De Freitas, V. P., & Barreira, E. (2014). Detection of façade plaster detachments using infrared thermography - A nondestructive technique.

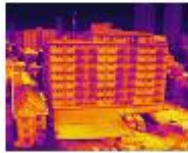
- Construction and Building Materials*, 70, 80–87.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.094>
- de Sena, G. O., Nascimento, M. L. M., Neto, A. C. N., & Lima, N. M. V. (2020). *Patologia das Construções* (I. Muniz (ed.); 1st ed.). 2B.
- Edis, E., Flores-Colen, I., & De Brito, J. (2014). Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. *Construction and Building Materials*, 51, 187–197.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.085>
- FARIA, C. F. D. S. (2015). *AVALIAÇÃO DA HUMIDADE UTILIZANDO A TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS*. 120. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/89817/2/35952.pdf>
- FÉ, E. P. D. LA. (2017). *Crítérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho*. <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31912>
- Flir. (2012). *User's manual: FLIR Exx series* (p. 118). <http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M5162.pdf>
- FLIR. (2021a). *FLIR A325*. <https://www.flir.com.br/support/products/a325sc/>
- FLIR. (2021b). *FLIR C5*. <https://www.flir.com.br/products/c5/>
- Franco Júnior, J. C. (2019). *Modelagem BIM de infraestrutura urbana a partir de levantamentos aéreos com drone*.
- Ham, Y., & Golparvar-Fard, M. (2015). Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. *Automation in Construction*, 49, 214–224.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.07.009>
- Hemesath, H. B. (2019). *ANÁLISE DA ACURÁCIA DE LEVANTAMENTO AEROFOTOGRAFÉTRICO POR VANT PARA MENSURAÇÃO DE FALHAS EM PAVIMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM* (p. 77).
- Hiasa, S., Birgul, R., & Necati Catbas, F. (2017). A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges. *Computers and Structures*, 190, 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.05.011>
- Júnior, J. H. N. R. (2021). *USO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO FERRAMENTA DE INSPEÇÃO PREDIAL ESPECIALIZADA: análise das manifestações patológicas na fachada de um edifício localizado na cidade de São Luís, Maranhão*. 6.

- Kee, S.-H., Oh, T., Popovics, J. S., Arndt, R. W., & Zhu, J. (2012). Nondestructive Bridge Deck Testing with Air-Coupled Impact-Echo and Infrared Thermography. *Journal of Bridge Engineering*, 17(6), 928–939. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000350](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000350)
- Kylili, A., Fokaides, P. A., Christou, P., & Kalogirou, S. A. (2014). Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy*, 134, 531–549. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>
- Lagüela, S., Díaz-Vilariño, L., Armesto, J., & Arias, P. (2012). *Thermographic 3D models as the foundation for Building Information Models*. <https://doi.org/10.21611/qirt.2012.180>
- Lenza, T. P. (2017). Um Algoritmo Direcionado a Bordas Que Utiliza Segmentação Para Interpolação de Imagens Digitais. In *Universidade de Brasília*.
- Lourenço, T., Matias, L., & Faria, P. (2017). Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. *Construction and Building Materials*, 148, 419–428. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.052>
- Matsumoto, M., Mitani, K., & Catbas, F. N. (2013). *Bridge Assessment Methods Using Image Processing*.
- Meteored. (2022a). *Condições climáticas de Porto Alegre / RS no dia do levantamento termográfico*. <https://www.tempo.com/porto-alegre-sactual.htm>
- Meteored. (2022b). *Condições climáticas de Santos / SP no dia do levantamento termográfico*. <https://www.tempo.com/santos-sactual.htm>
- Milhomem, P. M. (2019). CRITÉRIOS PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO GRAU DE DANO DE FISSURAS EM FACHADAS DE EDIFÍCIOS COM APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHO. *Departamento De Engenharia Civil e Ambiental*, 124. http://www.pgea.unb.br/~lasp/research/DEFESA_VALERIO_AYMORE_MARTIN_S_DM-500_2012.pdf
- Natephra, W., Motamedi, A., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2017). Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments. *Building and Environment*, 124, 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.004>
- Paoletti, D., Ambrosini, D., Sfarra, S., & Bisegna, F. (2013). Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation. *Journal of Cultural Heritage*, 14(2), 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.05.005>

- Pedra, S. a. (2011). *Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural*.
- Pereira, L. B., Vale, C. P. do, & Venceslau, R. (2017). Imagens multiespectrais e termográficas aplicadas ao estudo de Património Arquitectónico. *Congresso Da Reabilitação Do Património*, 205–214.
- Pitarma, R., Crisóstomo, J., & Jorge, L. (2015). Determinação da Emissividade de Materiais com Recurso a Software de Imagem. *2015 10th Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI 2015*, 0, 982–987. <https://doi.org/10.1109/CISTI.2015.7170493>
- REBELO, D. F. F. (2017). *Avaliação quantitativa dos resultados da termografia de infravermelhos aplicada ao estudo da humidade*.
- Rocha, J. H. A., & Póvoas, Y. V. (2019). Detecção de corrosão em concreto armado com termografia infravermelha e ultrassom. *Ambiente Construído*, 19(3), 53–68. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300324>
- Sakamoto, C. A., & Fioriti, C. F. (2017). Estudo De Parâmetros Relevantes Na Obtenção De Termogramas Para Diagnóstico De Problemas Patológicos. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 13(2), 44–56. <https://doi.org/10.5216/reec.v13i2.44793>
- Sham, J. F. C., Lo, T. Y., & Memon, S. A. (2012). Verification and application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release characteristics by building fabrics. *Energy and Buildings - A1*, 53, 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.018>
- Solla, M., Lagüela, S., Riveiro, B., & Lorenzo, H. (2013). Non-destructive testing for the analysis of moisture in the masonry arch bridge of Lubians (Spain). *Structural Control and Health Monitoring*, May 2011, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/stc>
- Sousa, J. L. C. de, Aquino, F. K. M. de, Nascimento, N. V. do, Costa, A. A. V. da, & Teixeira, J. C. S. (2021). Patologias do concreto armado e seus métodos de restauração estrutural. *Research, Society and Development*, 10(1), e53010112015. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12053>
- Souza, V. C. M. de, & Ripper, T. (1998). PATOLOGIA, RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO. In *Dermatologische Wochenschrift* (Vol. 152, Issue 48).
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3), 357–375.

- <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>
- Taylor, T., Counsell, J., & Gill, S. (2013). Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography. *Energy and Buildings* - A1, 66, 222–231. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.051>
- Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors (Switzerland)*, 14(7), 12305–12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>
- Visual, D. (2020). *No Title*. <https://www.dronevisual.com/post/dji-anuncia-novo-drone-mavic-2-enterprise-advanced>
- Wang, C., Cho, Y. K., & Gai, M. (2013). As-Is 3D Thermal Modeling for Existing Building Envelopes Using a Hybrid LIDAR System. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(6), 645–656. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000273](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000273)
- Washer, G., Fenwick, R., & Bolleni, N. (2010). Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete. *Journal of Bridge Engineering*, 15(4), 384–390. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000117](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000117)
- Watase, A., Birgul, R., Hiasa, S., Matsumoto, M., Mitani, K., & Catbas, F. N. (2015). Practical identification of favorable time windows for infrared thermography for concrete bridge evaluation. *Construction and Building Materials*, 101, 1016–1030. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.156>
- Yastikli, N., & Guler, E. (2013). Avaliação da performance de câmaras termográficas para documentação fotogramétrica de prédios históricos. *Boletim de Ciências Geodesicas*, 19(4), 711–728. <https://doi.org/10.1590/S1982-217020130004000012>

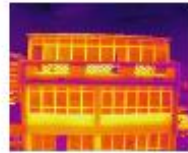
APÊNDICE A – IMAGENS TERMOGRÁFICAS REGISTRADAS POR VANT M2EA



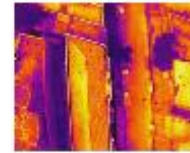
DJI_0360



DJI_0361



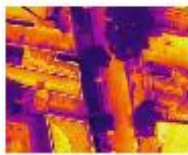
DJI_0363



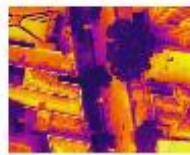
DJI_0365



DJI_0367



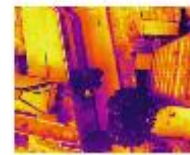
DJI_0369



DJI_0371



DJI_0373



DJI_0375



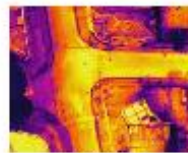
DJI_0377



DJI_0379



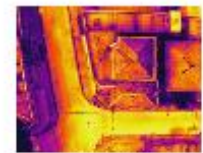
DJI_0381



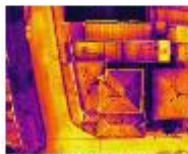
DJI_0383



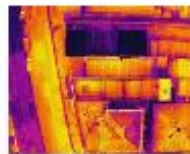
DJI_0385



DJI_0387



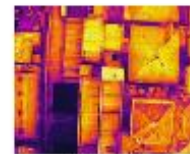
DJI_0389



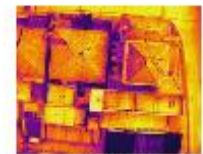
DJI_0391



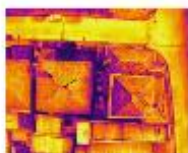
DJI_0393



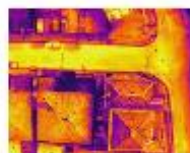
DJI_0395



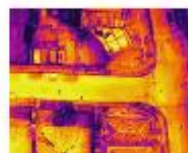
DJI_0397



DJI_0399



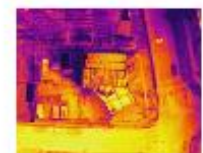
DJI_0401



DJI_0403



DJI_0405



DJI_0407



DJI_0409



DJI_0411



DJI_0413



DJI_0415



DJI_0417



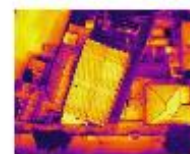
DJI_0419



DJI_0421



DJI_0423



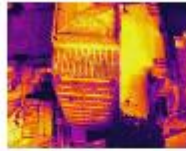
DJI_0425



DJI_0427



DJI_0569



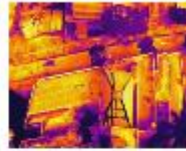
DJI_0571



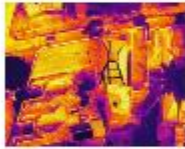
DJI_0573



DJI_0575



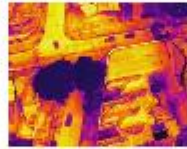
DJI_0577



DJI_0579



DJI_0581



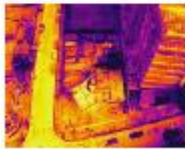
DJI_0583



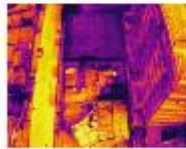
DJI_0585



DJI_0587



DJI_0589



DJI_0591



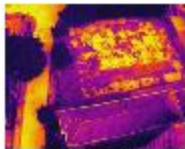
DJI_0593



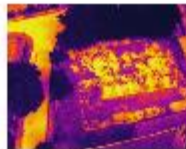
DJI_0595



DJI_0597



DJI_0599



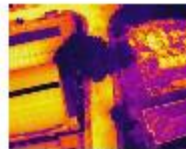
DJI_0601



DJI_0603



DJI_0605



DJI_0607



DJI_0609



DJI_0611



DJI_0613



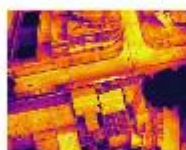
DJI_0615



DJI_0617



DJI_0619



DJI_0621



DJI_0623



DJI_0625



DJI_0627



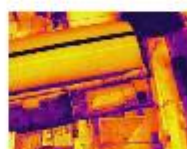
DJI_0629



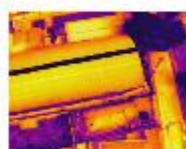
DJI_0631



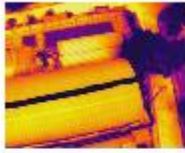
DJI_0633



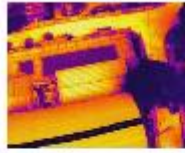
DJI_0635



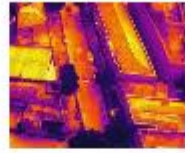
DJI_0637



DJI_0640



DJI_0641



DJI_0643



DJI_0646



DJI_0647



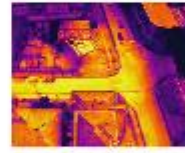
DJI_0649



DJI_0651



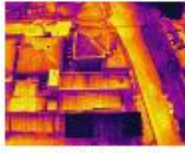
DJI_0653



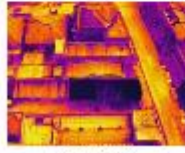
DJI_0655



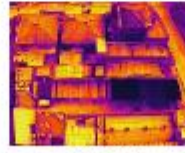
DJI_0657



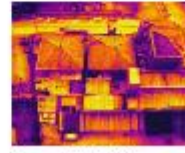
DJI_0659



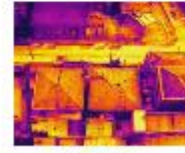
DJI_0661



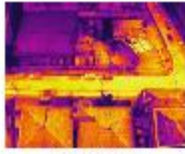
DJI_0663



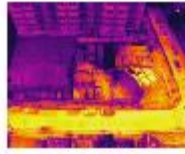
DJI_0665



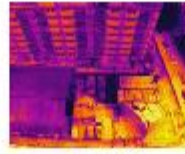
DJI_0667



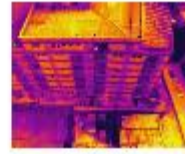
DJI_0669



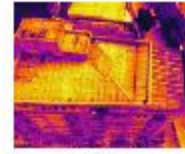
DJI_0671



DJI_0673



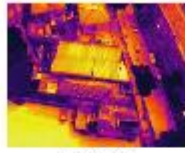
DJI_0675



DJI_0677



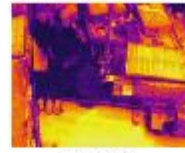
DJI_0679



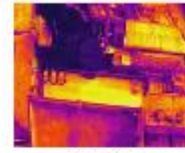
DJI_0681



DJI_0683



DJI_0685



DJI_0687



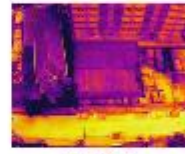
DJI_0689



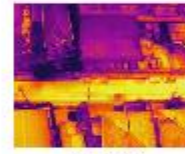
DJI_0691



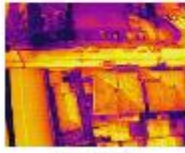
DJI_0693



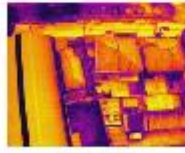
DJI_0695



DJI_0697



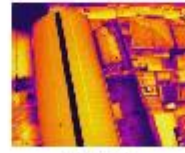
DJI_0700



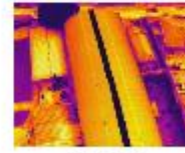
DJI_0701



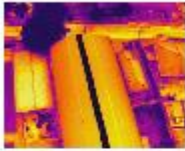
DJI_0703



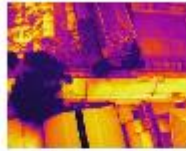
DJI_0705



DJI_0707



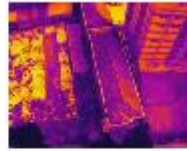
DJI_0720



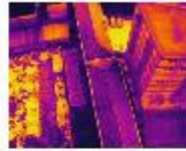
DJI_0721



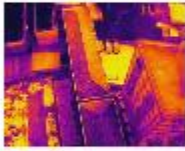
DJI_0723



DJI_0725



DJI_0727



DJI_0719



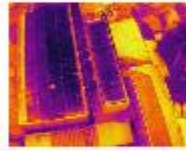
DJI_0721



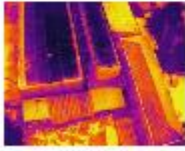
DJI_0723



DJI_0725



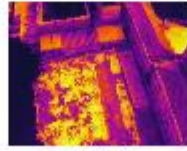
DJI_0727



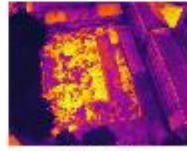
DJI_0729



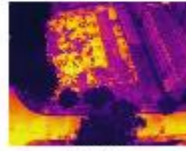
DJI_0731



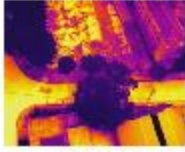
DJI_0733



DJI_0735



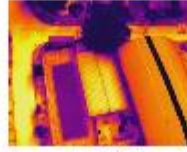
DJI_0737



DJI_0739



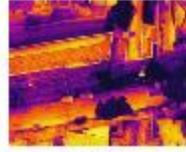
DJI_0741



DJI_0743



DJI_0745



DJI_0747



DJI_0749



DJI_0751



DJI_0753



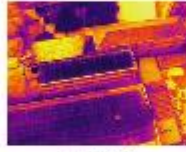
DJI_0755



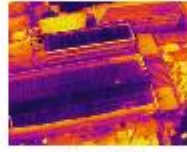
DJI_0757



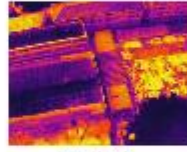
DJI_0759



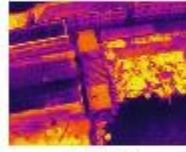
DJI_0761



DJI_0763



DJI_0765



DJI_0767



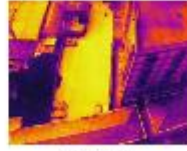
DJI_0769



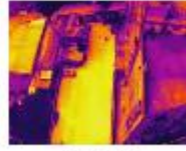
DJI_0771



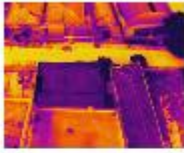
DJI_0773



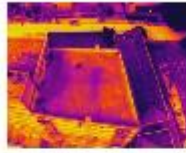
DJI_0775



DJI_0777



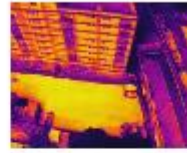
DJI_0919



DJI_0921



DJI_0923



DJI_0925



DJI_0927



DJI_0929



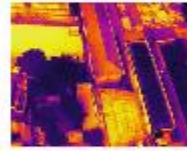
DJI_0931



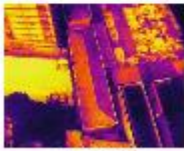
DJI_0933



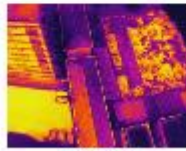
DJI_0935



DJI_0937



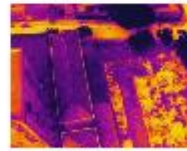
DJI_0939



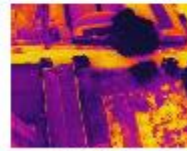
DJI_0941



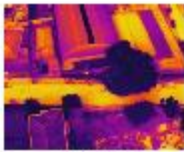
DJI_0943



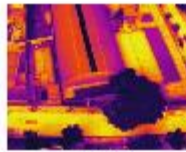
DJI_0945



DJI_0947



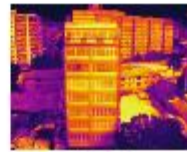
DJI_0949



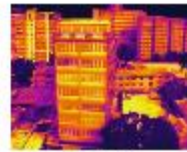
DJI_0951



DJI_0273



DJI_0277



DJI_0279



DJI_0281



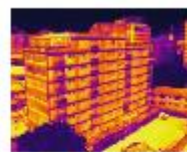
DJI_0283



DJI_0285



DJI_0287



DJI_0289



DJI_0291



DJI_0293



DJI_0295



DJI_0297



DJI_0299



DJI_0301



DJI_0303



DJI_0305



DJI_0307



DJI_0309

APÊNDICE B – IMAGENS TERMOGRÁFICAS OBTIDAS POR CÂMERA TERMOGRÁFICA FLIR A325



20220405_100911



20220405_100915



20220405_100920



20220405_100928



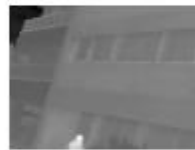
20220405_100938



20220405_100948



20220405_100951



20220405_100958



20220405_101000



20220405_101008



20220405_101010



20220405_101021



20220405_101028



20220405_101030



20220405_101034



20220405_101042



20220405_101048



20220405_101051



20220405_101055



20220405_101100



20220405_101105



20220405_101109



20220405_101114



20220405_101118



20220405_101124



20220405_101130



20220405_101133



20220405_101138



20220405_101140



20220405_101148



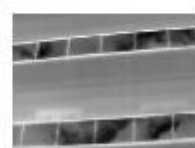
20220405_101152



20220405_101155



20220405_101158



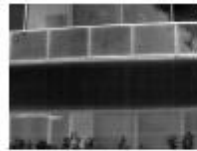
20220405_101205



20220405_101208



20220405_101212



20220405_101213



20220405_101220



20220405_101223



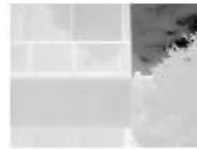
20220405_101234



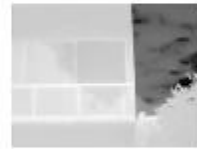
20220405_101239



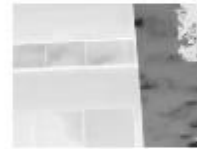
20220405_101243



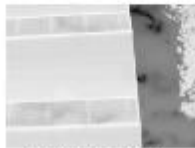
20220405_101243



20220405_101251



20220405_101253



20220405_101259



20220405_101302



20220405_101305



20220405_102201



20220405_102215



20220405_102218



20220405_102221



20220405_102225



20220405_102228



20220405_102232



20220405_102233



20220405_102244



20220405_102247



20220405_102250



20220405_102253



20220405_102255



20220405_102258



20220405_102301



20220405_102303



20220405_102305



20220405_102309



20220405_102312



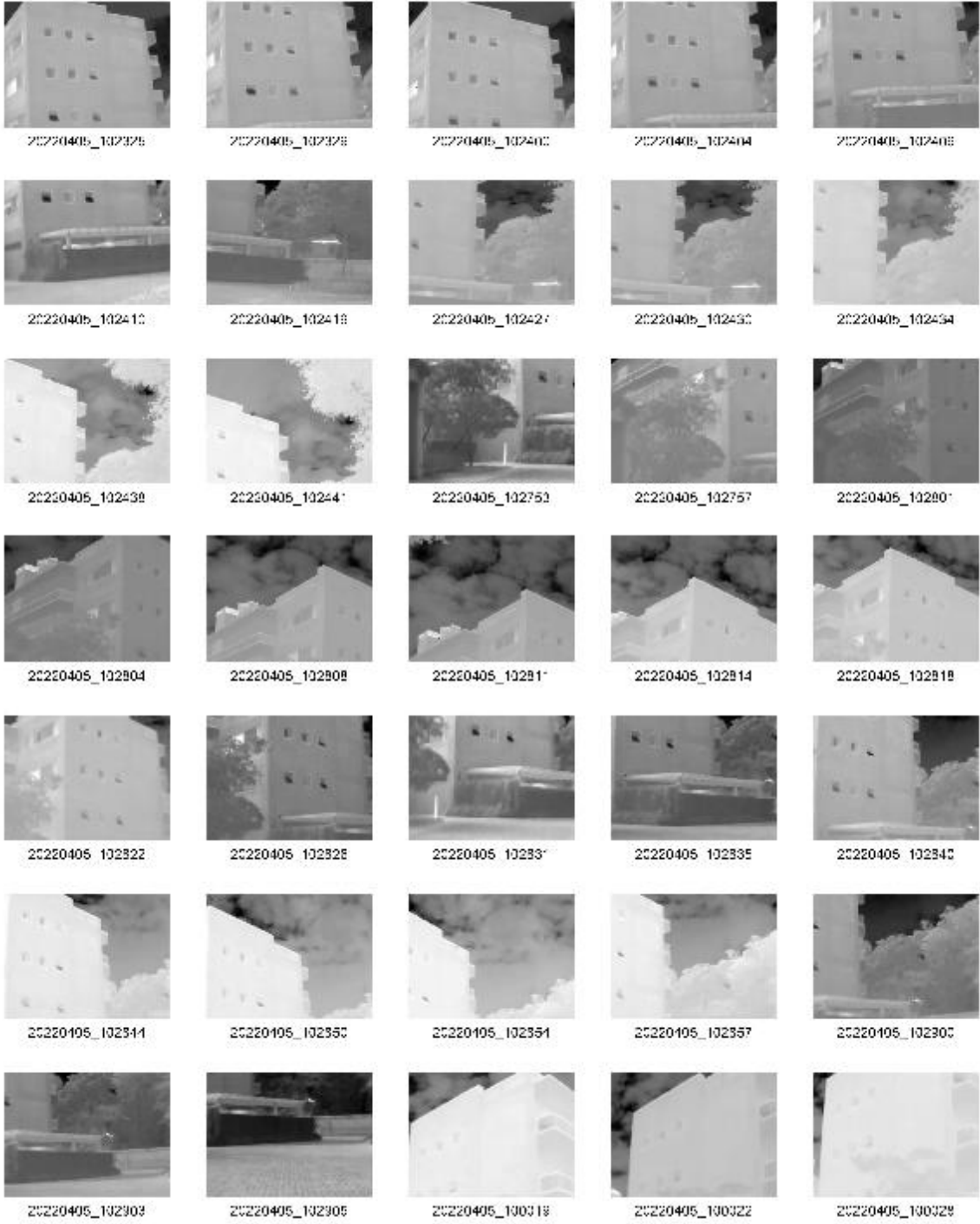
20220405_102315



20220405_102318



20220405_102323





20220405_100332



20220405_100339



20220405_100344



20220405_100349



20220405_100352



20220405_100100



20220405_100109



20220405_100111



20220405_100118



20220405_100120



20220405_100128



20220405_100129



20220405_100134



20220405_100141



20220405_100147



20220405_100149



20220405_100153



20220405_100157



20220405_100200



20220405_100203



20220405_100208



20220405_100211



20220405_100214



20220405_100219



20220405_100224



20220105_100232



20220105_100238



20220105_100241



20220105_100355



20220105_100358

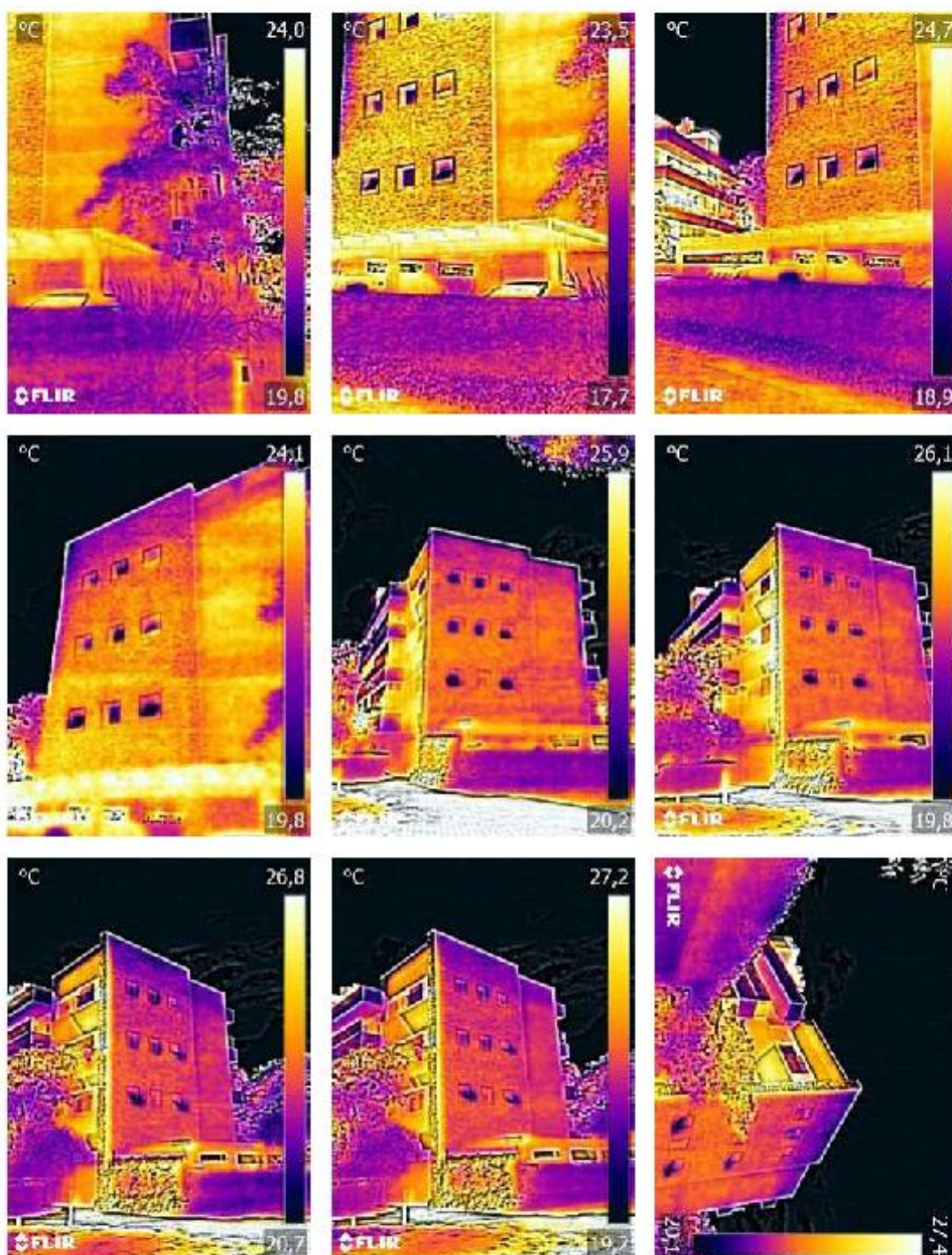


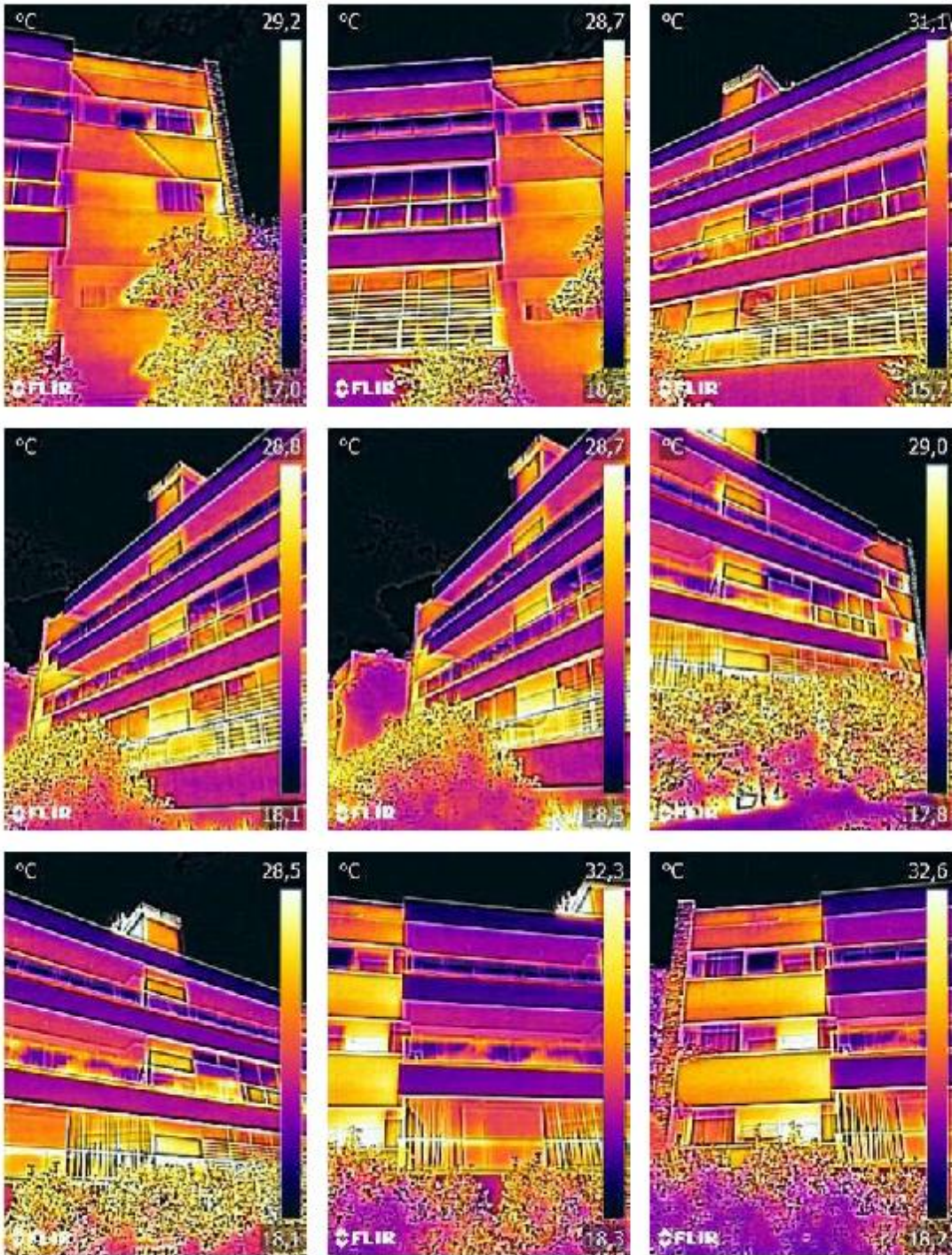
20220405_100902

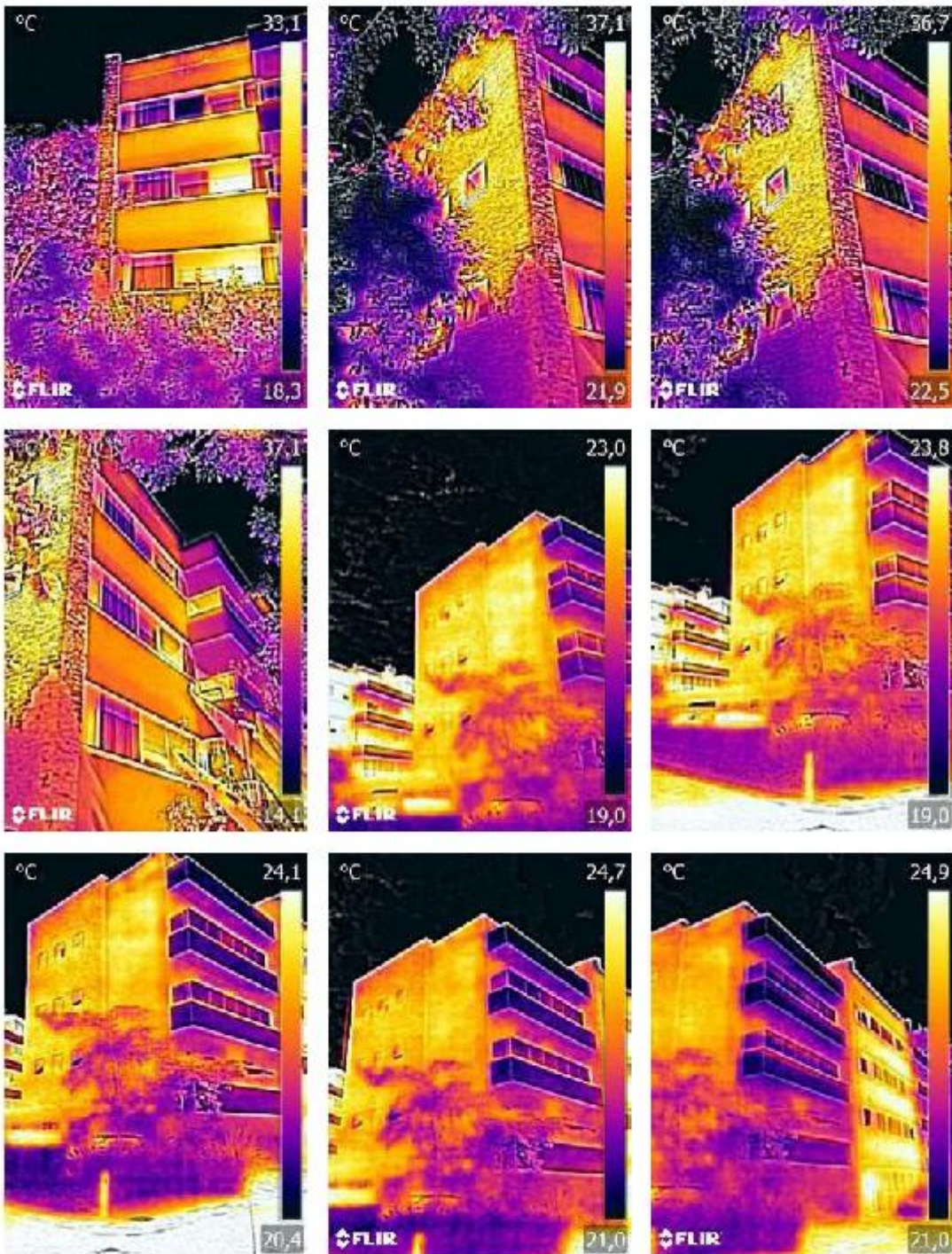


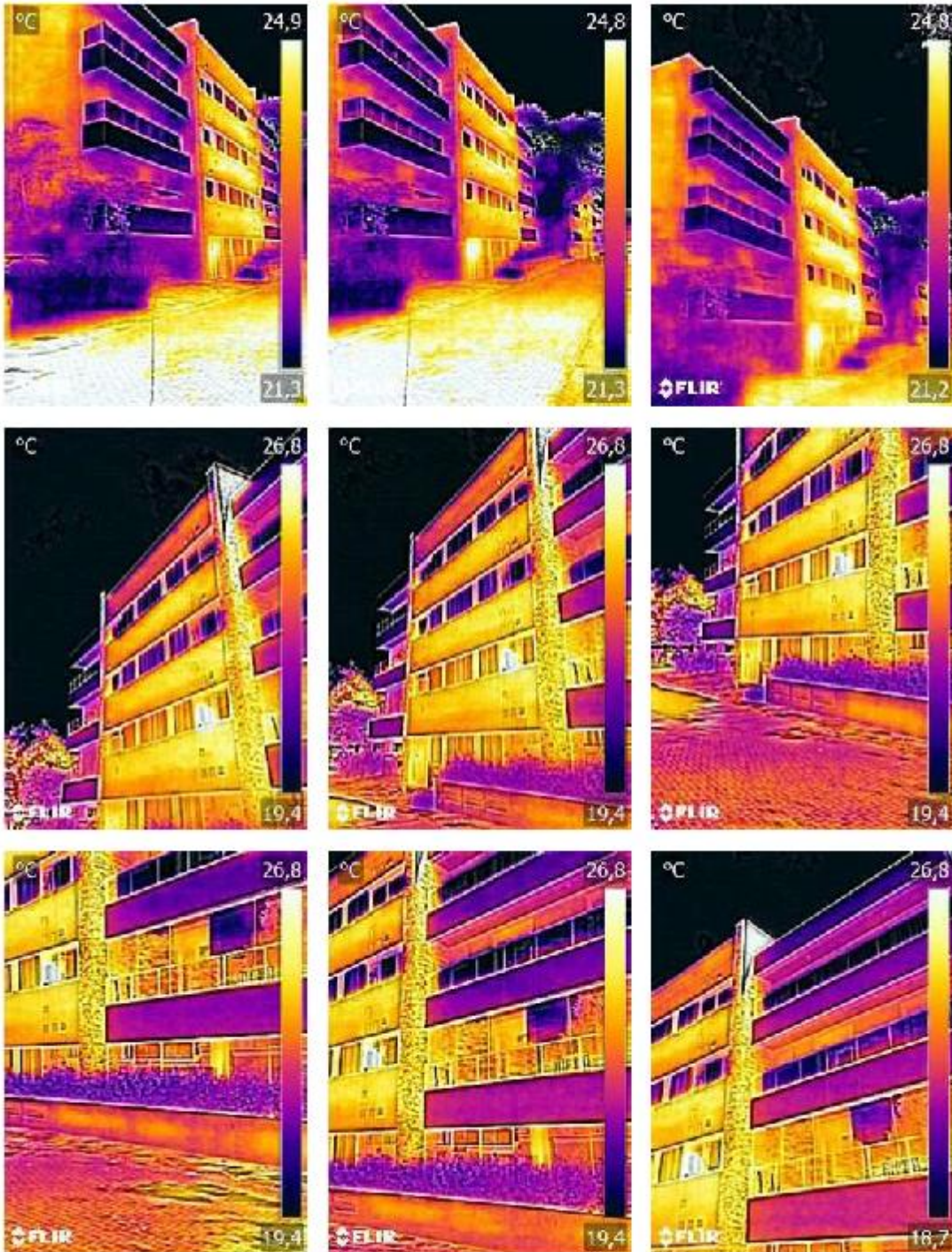
20220405_100907

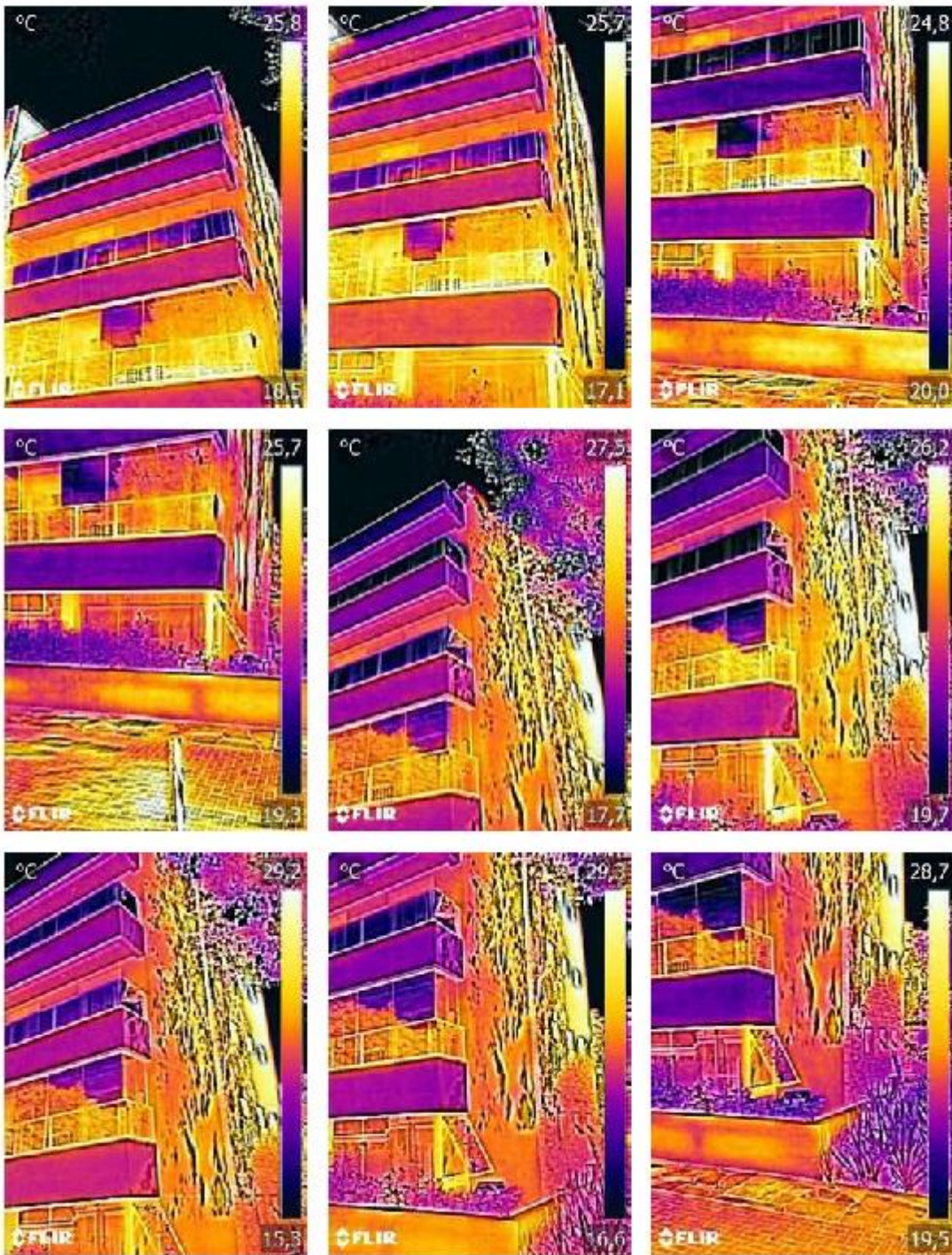
**APÊNDICE C – IMAGENS TERMOGRÁFICAS OBTIDAS POR CÂMERA
TERMOGRÁFICA FLIR C5**

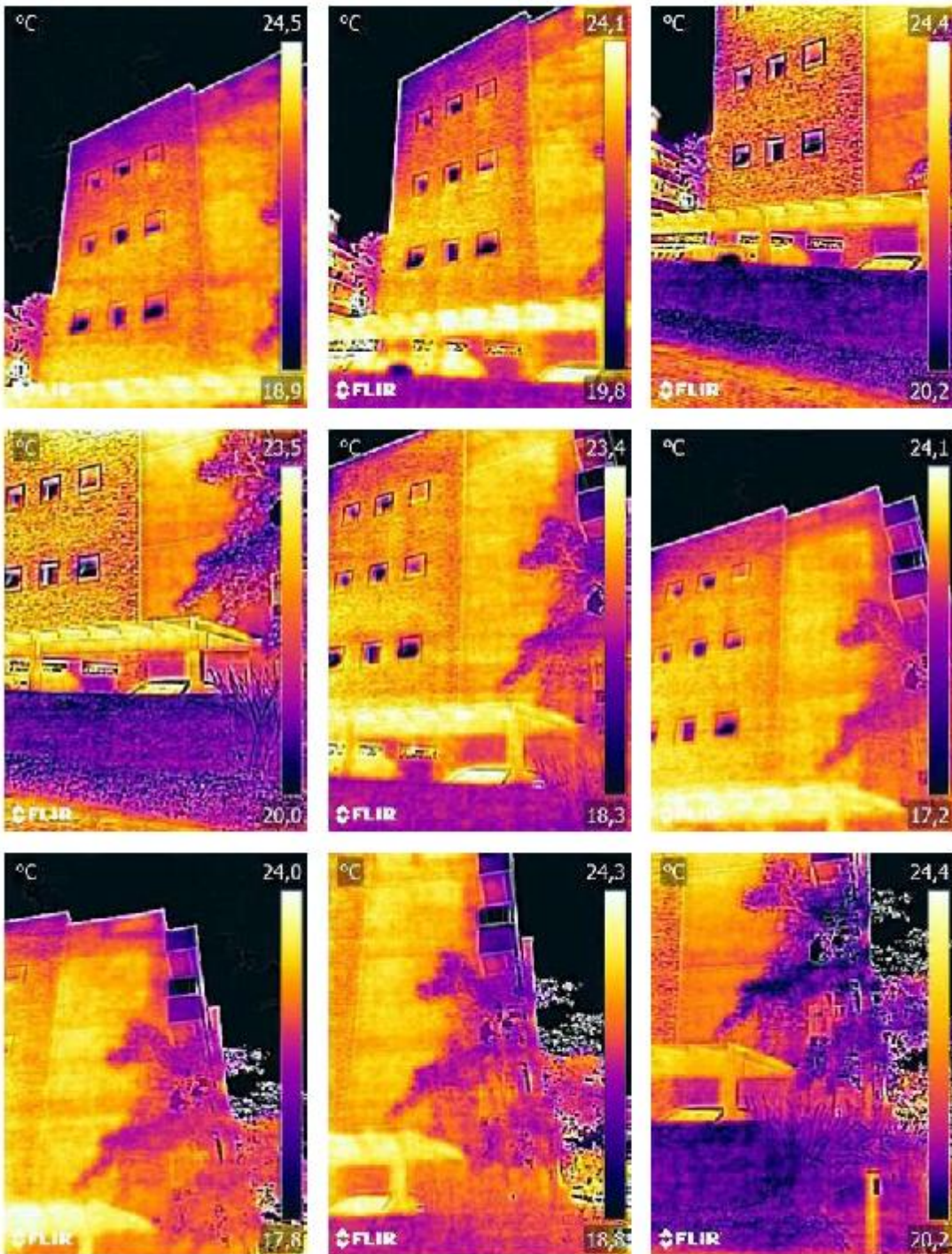


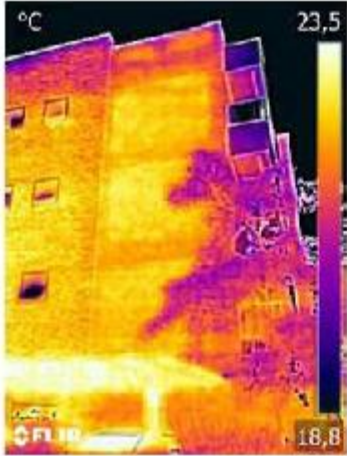
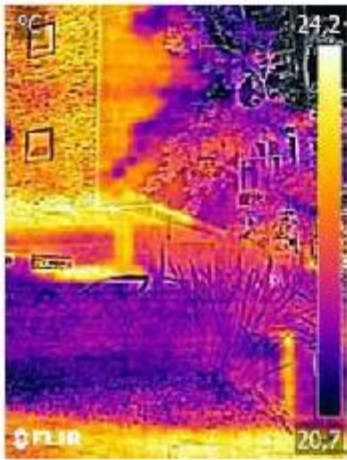




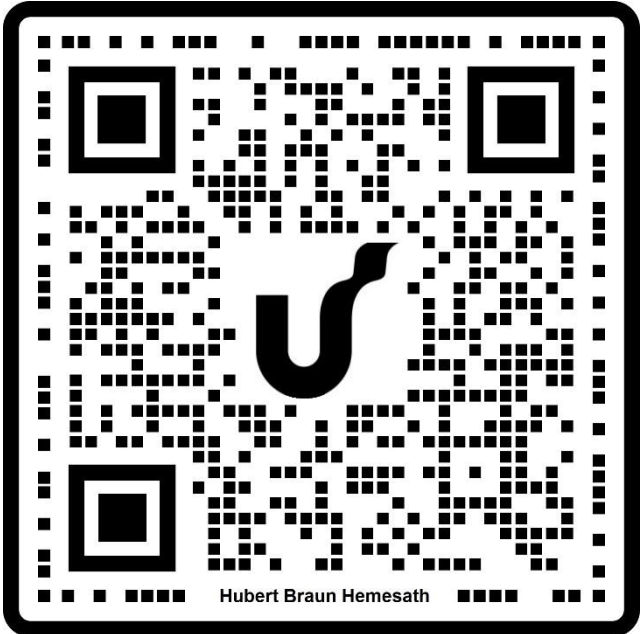








APÊNDICE D – ACESSO A TODOS OS ARQUIVOS



<https://flowcode.com/p/j1OsLCUP5?fc=0>

ANEXO A – PLANTA DE PAVIMENTOS DIVERSOS E DETALHES

