

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

**PARÂMETROS DE CONTROLE EM TERMOGRAFIA EMBARCADA EM
DRONE: UMA ANÁLISE DA LITERATURA**

ELAINE MARIA ALMEIDA NOGUEIRA

Março, 2022

Nogueira, Elaine Maria Almeida

PARÂMETROS DE CONTROLE EM TERMOGRAFIA EMBARCADA EM DRONE: UMA ANÁLISE DA LITERATURA/ Elaine Maria Almeida Nogueira - Cruz das Almas, 2022.

00 p. : 00 cm

Orientador(a): Alexandra Cruz Passuello.

TCC (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil) -- Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2022.

1. Inspeções prediais. 2. Sensores termais embarcados em drones. 3. Engenharia diagnóstica. I. Nogueira, Elaine; II. Passuello, Alexandra. PARÂMETROS DE CONTROLE EM TERMOGRAFIA EMBARCADA EM DRONE: UMA ANÁLISE DA LITERATURA III. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

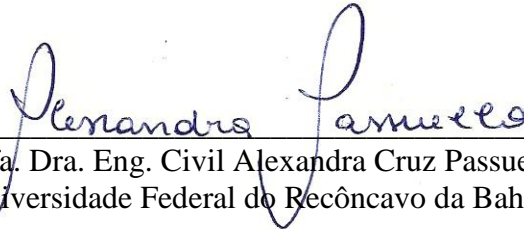
ELAINE MARIA ALMEIDA NOGUEIRA

**PARÂMETROS DE CONTROLE EM TERMOGRAFIA EMBARCADA EM DRONE:
UMA ANÁLISE DA LITERATURA**

Artigo apresentado a Universidade Federal do
Recôncavo da Bahia, como parte das exigências
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Cruz das Almas - BA, 14 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA



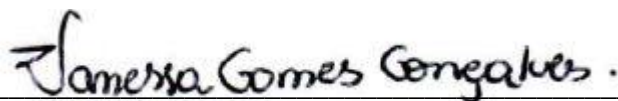
Profa. Dra. Eng. Civil Alexandra Cruz Passuello
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia



Profa. Dra. Fis. Rogelma Maria da Silva Ferreira
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia



Prof. Eng. Civil William da Silva Pereira
Faculdade Factiva



Eng. Civil Vanessa Gomes Gonçalves
Universidade Federal da Bahia (Mestranda)

PARÂMETROS DE CONTROLE EM TERMOGRAFIA EMBARCADA EM DRONE: UMA ANÁLISE DA LITERATURA NA PERSPECTIVA DAS INSPEÇÕES PREDIAIS

NOGUEIRA, E. M. A.; PASSUELLO, A. C.

RESUMO

A aplicação da termografia infravermelha em inspeções prediais é uma técnica não destrutiva que possibilita a rápida obtenção de resultados e a visualização do gradiente térmico dos materiais, auxiliando na identificação de anomalias e falhas. Como aliados, os drones tem sido fundamentais na realização de inspeções prediais em locais de difícil acesso, pois possibilitam o embarque de diferentes sensores, incluindo os térmicos. Entretanto, na realização de ensaios não destrutivos de termografia infravermelha embarcada em drones, algumas condições de contorno devem ser consideradas para a coleta dos dados, visto que vários são os fatores que podem interferir nos resultados dos termogramas. O objetivo deste estudo é apresentar os fatores que com base na literatura influenciam na leitura dos termogramas em inspeções prediais e como estes podem ser impactados quando drones são utilizados com dispositivo de transporte. O método foi baseado em uma revisão da literatura que buscou entender os conceitos físicos por trás das leituras de uma câmera termográfica, de que forma a termografia infravermelha tem sido utilizada como ensaio não destrutivo em inspeções prediais com e sem drone, bem como quais os fatores que podem interferir nos resultados dos ensaios. Para isso foi realizada uma pesquisa nos Periódicos CAPES sobre trabalhos referentes ao uso da termografia infravermelha e dos drones em inspeções prediais, tanto individualmente, como de forma concomitante, filtrando os mais relevantes para a compreensão dos fatores influentes. Foi possível verificar que inúmeros são os fatores já estudados que influenciam os resultados obtidos em uma análise térmica para identificação de anomalias e falhas em edificações. Estes fatores foram apontados neste artigo. Entretanto, foi possível perceber que ainda existem lacunas quanto a interferência da obtenção de termogramas por imagens obtidas por drones, visto que estes veículos aéreos não tripulados também possuem limitações na sua utilização. Conclui-se que, para a obtenção de resultados satisfatórios e a correta leitura do termograma, quando as imagens são obtidas pelos sensores embarcados em drones, é necessário considerar uma série de fatores que foram apontados na literatura. Porém, percebeu-se que o entendimento dos fatores adicionais que podem influenciar as leituras térmicas quando o ensaio é realizado por sensores embarcados ainda não está claro na literatura. Este artigo pode indicar o caminho das pesquisas futuras para a identificação das limitações do uso desses dispositivos associados, até que seja possível encontrar um procedimento padrão para a realização de ensaios sem a distorção de resultados.

Palavras-Chaves: Termografia infravermelha, drone, inspeção predial, Engenharia diagnóstica.

ABSTRACT

The application of infrared thermography in building inspections is a non-destructive technique that enables the rapid achievement of results and the visualization of the thermal gradient of materials, assisting in the identification of anomalies and failures. As allies, drones have been fundamental in conducting building inspections in places of difficult access, because they allow the boarding of different sensors, including thermal ones. However, when performing non-destructive testing of infrared thermography on drones, some boundary conditions must be considered for data collection, since there are several factors that may interfere with the results of thermograms. The objective of this study is to present the factors that based on the literature influence the reading of thermograms in building inspections and how these can be impacted when drones are used with a transportation device. The method was based on a literature review that sought to understand the physical concepts behind the readings of a thermal camera, how infrared thermography has been used as a non-destructive test in building inspections with and without a drone, as well as what factors can interfere with the test results. For this, a search was conducted in CAPES journals on papers related to the use of infrared thermography and drones in building inspections, both individually and concomitantly, filtering the most relevant for the understanding of the influential factors. It was possible to verify that numerous are the factors already studied that influence the results obtained in a thermal analysis to identify anomalies and failures in buildings. These factors were pointed out in this article. However, it was possible to realize that there are still gaps regarding the interference of obtaining thermograms by images obtained by drones, since these unmanned aerial vehicles also have limitations in their use. We conclude that, to obtain satisfactory results and a correct thermogram reading, when the images are obtained by sensors on drones, it is necessary to consider a number of factors that have been pointed out in the literature. This article can point the way for future research to identify the limitations of using these associated devices, until it is possible to find a standard procedure for performing tests without distortion of results.

Keywords: Infrared thermography, drone, building inspection, diagnostic engineering.

1. INTRODUÇÃO

Estudos a respeito de ensaios não destrutivos são essenciais no contexto da engenharia diagnóstica, tendo em vista que essas técnicas permitem a coleta de dados com pouca ou nenhuma intervenção no local, não afetando assim, a integridade dos elementos. Vários são os métodos de ensaios complementares não destrutivos, dentre eles destaca-se o uso da termografia infravermelha, cuja visualização do gradiente de temperatura nos materiais permite a identificação de anomalias muitas vezes não visíveis ao olho nú, auxiliando assim em um diagnóstico mais assertivo.

O uso da técnica de termografia infravermelha é bastante vantajoso quando comparado à outros métodos utilizados em inspeções prediais quando considerado o tempo de execução dos ensaios. Dentre as aplicações pode-se citar a identificação de diferentes materiais e a detecção da presença de umidade, sendo esta o maior agente de deterioração dos materiais construtivos. A investigação utilizando tal metodologia é aplicável visto que materiais com anomalias tem o fluxo de calor afetado, apresentando diferenças localizadas de temperatura que são identificadas através dos termogramas. Medir a temperatura da superfície em momentos de fluxo de calor positivo e negativo permite a identificação de irregularidades (FLIR, 2010; MALHOTRA; CARINO, 2004).

A Norma de inspeção predial NBR 16818:2020 foi lançada recentemente pela ABNT e trata do procedimento para a aplicação do ensaio não destrutivo utilizando termografia infravermelha, ressaltando que a eficácia de tal metodologia se dá por meio do uso adequado do método. Adotar um procedimento padronizado é extremamente importante para a correta interpretação do ensaio, visto que a leitura de temperatura registrada pela câmera sofre influência de alguns fatores naturais, como o vento e a umidade, mas também artificiais, como luzes de faróis automotivos. Conhecer esses fatores e as consequências deles nos termogramas servem para nortear a realização das imagens e sua posterior interpretação. A norma determina um procedimento escrito composto por itens mínimos para a utilização da termografia e considerações a respeito do uso do equipamento em inspeções. Entretanto, não difere metodologias para ambientes internos e externos ou uma possível influência da escolha do horário da inspeção, o que demonstra a necessidade de avanço nos estudos relativos aos fatores influentes nas medições feitas com esta técnica.

A realização de ensaios não destrutivos com uso de sensores, como no caso da termografia infravermelha, tem ganhado mais espaço recentemente através do uso de novas tecnologias em

inspeções prediais. Atualmente, o uso de drones tem facilitado o processo de inspeção de fachadas e coberturas de edifícios, bem como de pontes e outras estruturas de grandes dimensões. Os drones podem embarcar diferentes tipos de sensores, desde os mais simples como os RGB, como também outros mais complexos como os termais. Entretanto, voos realizados por drones podem sofrer instabilidade de posicionamento, devido principalmente a ação dos ventos, além de ter restrições de aproximação com os elementos a serem inspecionados. Em função disso, os dados coletados pelos sensores embarcados podem ser influenciados de diferentes maneiras, especialmente no caso de leituras termais.

O presente estudo tem como objetivo identificar através de uma revisão da literatura o contexto atual do uso da termografia infravermelha na área da engenharia diagnóstica, identificando nos estudos os diversos parâmetros influentes nos termogramas e como estes podem ser impactados quando drones são utilizados com dispositivo de transporte. A finalidade do estudo é dar base para o seguimento de novas pesquisas em engenharia diagnóstica, considerando a realização da termografia infravermelha a partir de leituras realizadas por sensores embarcado em drones.

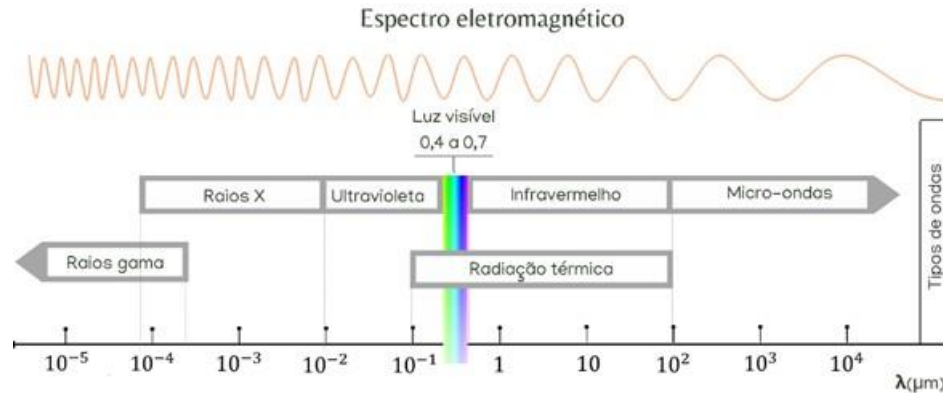
2. CONCEITOS GERAIS

Os infravermelhos foram descobertos por Sir Willliam Herschel, em 1800 (FLIR, 2010) ao realizar testes passando a luz solar através de um prisma de vidro, formando um espectro de radiações com comprimentos de onda variando do violeta ao vermelho. Em seus estudos, ao medir a temperatura na região posterior ao vermelho, onde não era mais visível a luz solar, Herschel constatou uma temperatura ainda mais elevada que as demais, o que posteriormente seria chamado de comprimento de ondas infravermelhos (BARREIRA, 2004).

Após o descobrimento das ondas infravermelhas, a primeira imagem térmica só foi obtida no ano de 1840, inclusive realizada por Sir John Herschel, filho do descobridor dos infravermelhos. No entanto, a primeira documentação experimental sobre o uso da termografia infravermelha em identificações de anomalias nas construções só ocorreu mais de um século depois, em 1973, nos trabalhos realizados pelo Ministério de Transporte e comunicação de Ontário (FLIR, 2010; MALHOTRA; CARINO, 2004).

Em relação aos conceitos físicos, o espectro eletromagnético é dividido em regiões de comprimentos de ondas variados, como apresentado na Figura 1. A radiação térmica emitida por todo objeto será visível apenas nos comprimentos de onda entre 0,4 e 0,7 μm . O intervalo de 0,7 à 100 μm corresponde a fração Infravermelha da radiação (DEWITT, 2014).

Figura 1: Divisão do espectro eletromagnético



Fonte: Adaptado de Dewitt, 2014

Todos os corpos emitem radiação, no entanto para entender como funciona a emissão/absorção de radiação pelos objetos reais é importante entender como ela seria emitida a partir de um corpo negro. O corpo negro se diferencia dos demais pelo fato de ser considerado um absorvedor e emissor perfeito, visto que é capaz de absorver e emitir toda radiação que incide sobre si, independente dos comprimentos de onda e da direção (DEWITT, 2014). Na prática, nenhum objeto real pode emitir toda radiação incidida sobre ele à uma determinada temperatura, assim poucos objetos se comportam como corpos negros (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010; MALHOTRA; CARINO, 2004).

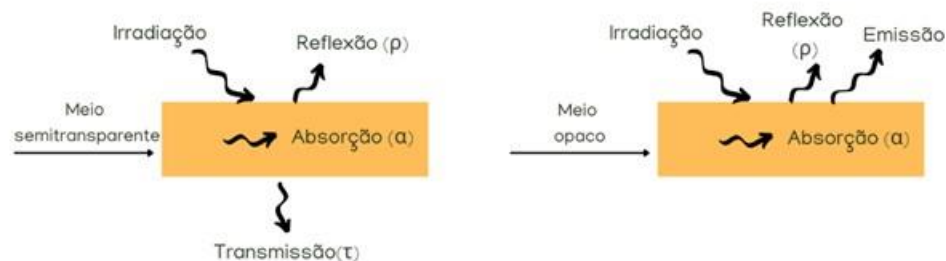
O motivo para um objeto não se comportar de tal forma está relacionado à três processos físicos que impedem que isso aconteça, sendo estes, a *absorção*, a *reflexão* e a *transmissão*. Esses processos estão relacionados com a forma como um corpo reage à energia irradiada sobre ele. A radiação pode ser absorvida, refletida, transmitida, ou então, ocorrer a combinação desses efeitos, como exemplo da situação em que parte da energia é absorvida e outra parte é refletida.

Matematicamente, a *absortividade* (α) é a parcela da energia irradiada sobre o corpo que é absorvida por ele, a *refletividade* (ρ) é a parcela da energia irradiada sobre o corpo que é refletida e a *transmissividade* (τ) é a parcela da energia irradiada sobre o corpo que é transmitida através dele. A soma de todas estas parcelas será sempre igual à 1 $\alpha + \rho + \tau = 1$ (Equação 1), ou seja, igual ao total da energia irradiada sobre o corpo. Corpos em que estes três fenômenos ocorrem simultaneamente são chamados de semitransparentes, como por exemplo, os vidros das janelas. Quando não há transmissão, ou seja, $\tau = 0$, considera-se o corpo como *opaco*.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{Equação 1}$$

A Figura 2 apresenta o esquema de como os materiais se comportam quando recebem a incidência de energia irradiada, sejam eles semitransparentes (a), ou então opacos (b). Grande parte dos materiais de construção são caracterizados como corpos opacos. Entretanto, a capacidade de emissão e reflexão de radiação de um corpo está ligada diretamente às suas características físicas e químicas (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

Figura 2: Radiação em uma superfície. (a) Reflexão, absorção e transmissão da irradiação em um meio semitransparente. (b) Reflexão e absorção de um meio opaco



Adaptado de Dewitt, 2014

3. FUNCIONAMENTO DE UMA CÂMERA TÉRMOGRÁFICA

As câmeras termográficas são dispositivos que reproduzem a temperatura da superfície dos objetos através de termogramas. Estes últimos, por sua vez, são imagens que expressam o gradiente de temperatura de um corpo a partir da radiação que é emitida e refletida por ele e captada pelo equipamento. A imagem de um termograma é formada por isotermas, cujas faixas destacam intervalos de temperatura por meio de cores variadas.

O percentual de emissão de radiação por um corpo, comparado com a emissão de um corpo negro, é denominado emissividade (ϵ_λ), variando entre 0, para um refletor perfeito, e 1, para um corpo negro (ABNT, 2021). Para a compreensão deste termo é importante compreender a parcela da emitância (ϵ) de um corpo produzida por um objeto em determinada temperatura, que é a quantidade de energia emitida por um objeto por unidade de tempo e área. A partir disso, tem-se a emitância radiante espectral (E_{obj}), que é a quantidade de energia que o objeto emite por unidade de tempo, área e comprimento de onda.

Emissividade é a relação entre a emitância radiante espectral de um objeto ($E_{\lambda o}$) e a emitância espectral de um corpo negro ($E_{\lambda cn}$), de mesma temperatura e no mesmo comprimento de onda, calculada pela Equação 2:

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_{\lambda o}}{E_{\lambda cn}} \quad \text{Equação 2}$$

A emissividade dos materiais em sua maior parte se encontra entre valores de 0,85 e 0,90 (FLIR, 2010). Superfícies metálicas possuem emissividade pequena, chegando a 0,02 para superfícies polidas de ouro ou de prata, aumentando seus valores com a presença de camadas de óxidos, como no caso de óxidos inoxidáveis a 900K, cujos valores de emissividade variam de 0,3 a 0,7. Materiais não condutores geralmente possuem emissividade superior a 0,6, como no caso das tintas, que possuem emissividade superior a 0,9 (DEWITT, 2014). Quando o valor de $\epsilon_\lambda = 1$ o corpo é considerado como corpo negro, quando possui ϵ_λ constante inferior à 1 o corpo é dito como cinzento e quando esse valor varia com o comprimento de onda denomina-se o corpo como radiador seletivo.

A radiação emitida por um objeto ocorre através de sua superfície. A taxa na qual a energia é transferida é denominada poder emissivo de superfície, dado pela lei de Stefan-Boltzmann (Equação 3), em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann, com valor igual à $5,6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$, e T é a temperatura absoluta do corpo.

$$E_{cn} = \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Equação 3}$$

A lei de Stefan- Boltzmann prevê um limite superior para esse poder emissivo, dado pela Equação 3. Quando uma superfície emite neste limite superior, é conhecida como emissor ideal ou corpo negro. Para um corpo negro ideal, a radiação por unidade de área é proporcional à quarta

potência da temperatura absoluta. A taxa de emissão de energia de radiação de uma superfície real é menor do que a emitida por um corpo negro à mesma temperatura. Para acomodar esse fato na lei de Stefan-Boltzmann, introduz-se um termo conhecido como emissividade ε na Equação 3. Desta forma, essa expressão pode ser descrita conforme a Equação 4.

$$E_{obj} = \varepsilon\sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad \text{Equação 4}$$

A câmara térmica recebe três parcelas de potência da radiação em sua leitura. O primeiro é a *emissão a partir do objeto*, que é dada por $\varepsilon\tau E_{obj}$, sendo τ a transmissividade da atmosfera e considerando a temperatura do objeto em análise. Em seguida tem-se a *emissão refletida a partir das fontes ambientais*, igual à $(1 - \varepsilon)\tau E_{refl}$, sendo $(1 - \varepsilon)$ a reflexão do objeto e a temperatura agora sendo a das fontes ambientais, ou seja, a temperatura refletida no objeto. Por fim está a emissão a partir da atmosfera, que é igual à $(1 - \tau)\tau E$, sendo $(1 - \tau)$ a *emitância da atmosfera* e a temperatura considerada sendo a da atmosfera.

Relacionando as expressões tem-se como potência total de radiação recebida igual a Equação 5:

$$E_{tot} = \varepsilon\tau E_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau E_{refl} + (1 - \tau)E_{atm} \quad \text{Equação 5}$$

A tensão (U_{obj}) é utilizada pelo equipamento para calcular a temperatura do objeto (Equação 6).

$$U_{obj} = \frac{U_{total}}{\varepsilon\tau} - \frac{(1 - \varepsilon)U_{refl}}{\varepsilon} - \frac{(1 - \tau)U_{atm}}{\varepsilon\tau} \quad \text{Equação 6}$$

4. IMAGENS TERMOGRÁFICAS

As câmeras termográficas captam e reproduzem a radiação infravermelha emitida pelos materiais em imagens, e para isso, dependem de fatores como a emissividade do material, temperatura refletida, distância entre a superfície e a câmara, umidade relativa e temperatura da atmosfera. A radiação externa também é refletida no objeto e captada pela câmara, sendo que ambos os fatores sofrem influência da absorção da atmosfera. Dessa forma esses fatores precisam ser introduzidos na câmara para obter resultados precisos de gradiente de temperatura (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

Para inspeções utilizando a termografia infravermelha se faz necessário o conhecimento prévio sobre ao assunto para compreender o que deve ser levado em consideração para a análise dos dados. Durante a realização das imagens devem ser levadas em consideração todas as situações impostas ao elemento em estudo, sendo elas condições ambientais e limitações dos equipamentos utilizados, para que posteriormente haja a interpretação correta das imagens. São diversos os fatores que influenciam na coleta e leitura dos termogramas, sendo alguns deles apresentados neste artigo.

Como visto anteriormente, a emissividade é dependente de vários parâmetros, dentre eles está o material. Para se obter o valor efetivo da temperatura, como no caso das análises quantitativas, é necessário inserir na câmera o valor correto da emissividade dos materiais, seja ele medido ou obtido na literatura. Também deve-se considerar na análise dos termogramas possíveis alterações neste parâmetro ocasionadas devido a presença de fatores como ventos, sombras, luz artificial e reflexão de outros materiais próximos. (HART, 1991).

Além disso, é importante também considerar que a refletividade dos materiais pode influenciar nos valores de radiação captados pelo equipamento. De acordo com Barreira (2004), corpos total ou parcialmente transparentes, por exemplo, podem provocar erros nas medições da temperatura das superfícies. Como citado anteriormente, a radiação captada pela câmera térmica acaba sendo composta pela energia emitida e refletida pela superfície, somada à uma parcela de radiação que é transmitida do ambiente interno para o externo, como no caso das janelas de vidro inspecionadas por fora. (FLIR, 2010; VOLLMER; MÖLLMANN, 2010).

O ângulo de observação entre a câmera térmica e a superfície fotografada tem relação direta com os valores de emissividade captados pela câmera térmica, visto que para cada ângulo de observação o equipamento pode receber mais ou menos radiação emitida pelo objeto, ocasionando a obtenção do que é chamada de emissividade aparente (BARREIRA, 2004; HART, 1991). No caso da inspeção com câmeras termográficas, que se trata de uma medição sem contato, essa variação angular influencia nos resultados de emissividade obtidos pela câmera para que ela expresse a verdadeira temperatura do corpo, considerando que o plano de observação é normal à superfície e assim a região em análise emitirá mais radiação do que quando observado a outros ângulos (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). Para ângulos entre 0° e 65° da perpendicular à superfície, não há variação significativa da emissividade para os não metais, sendo seus valores

altos, decaindo para zero imediatamente acima dos 70°. No caso dos metais, a emissividade é muito baixa, não variando em observações entre 0 a 40° e aumentando com ângulos superiores (HART, 1991).

Na interpretação dos termogramas é importante considerar a atenuação da atmosfera, visto que nem toda a radiação emitida pelo objeto é captada pela câmera, sendo parte atenuada pela atmosfera existente entre o elemento e a câmera. Essa atenuação depende do comprimento de onda, composição da atmosfera e distância do objeto até a câmera (HART, 1991).

A umidade oriunda das condensações deve ser considerada para a interpretação dos termogramas, visto que podem provocar o arrefecimento do elemento em estudo devido à evaporação da água da superfície, já que altera a transmissão local de calor (HART, 1991). Anotações a respeito do calor que está sendo irradiado na superfície em estudo devem ser feitas durante a realização das imagens, pois a forma que ocorre a incidência da radiação (direta ou indiretamente) e a sua fonte são parâmetros que podem afetar a leitura e interpretação da temperatura obtida com a câmera termográfica.

5. INSPEÇÕES PREDIAIS E TERMOGRAFIA EMBARCADA EM DRONE

As inspeções prediais são de extrema importância para a conservação e manutenção das edificações. Elas podem acontecer apenas com análise visual, no caso inspeções mais simples, ou acompanhadas de ensaios complementares e avaliações específicas, em especial quando as manifestações patológicas prescindirem de análise mais detalhadas para serem classificadas em anomalias ou falhas, como orientado na NBR 16747 (ABNT, 2020). Dentre as técnicas de inspeções pode-se citar a termografia infravermelha, a qual se trata de uma técnica não destrutiva que permite a visualização do gradiente de temperatura dos materiais.

O uso da termografia infravermelha possui vantagens, como a possibilidade de ser realizada a significativas distâncias, avaliação da temperatura em tempo real e rapidez em seu processo de aquisição. Não substitui processos investigativos tradicionais, como por exemplo, os que necessitam de ensaio em loco, mas é possível efetuar um direcionamento na inspeção obtendo uma

classificação das regiões de dano quanto à intensidade de ocorrência dos mesmos (BAUER *et al.* 2014).

A ABNT NBR 16969:2021 apresenta princípios gerais relacionados ao uso da termografia infravermelha. Assim como a ABNT NBR 16818:2020, a norma cita orientações para a utilização das câmeras termográfica em inspeções destacando a importância de um profissional qualificado para a utilização do método, desta vez detalhando um pouco mais as condições de contorno a serem adotadas. No entanto, não especifica orientações para o uso de dispositivos embarcados em drones e não cita se os critérios são pertinentes à ensaios realizados interna e externamente.

Nas últimas décadas tem se avançado significativamente nas técnicas de obtenção de informações, e a utilização de veículos aéreos não-tripulados (VANT) com dispositivos leves a bordo, sobretudo os drones que são os de menor porte adotados em inspeções, tem contribuído para facilitar leituras térmicas. Isso possibilita a inspeção áreas em campos variados utilizando termografia (ORTIZ-SANZ *et al.*, 2019).

A inclusão de drones na construção civil facilita e acelera as inspeções em locais de difícil acesso. As fachadas das edificações estão mais sujeitas à degradação do que sistemas construtivos internos devido à exposição a agentes ambientais, e quando se trata de edificações altas, o custo de manutenção e inspeção acaba sendo mais elevado (TONDELO e BARTH, 2019). Os drones permitem a associação de dispositivos que possibilitam a realização de registros fotográficos e vídeos utilizando sensores RGB e atualmente inspeções termográficas com a adoção de sensores termais.

Ortiz-Sanz *et al.* (2019) realizaram a comparação do uso de uma câmera termográfica com a utilização de um poste e posteriormente acoplada à um drone. Concluíram que o poste utilizado tornou o processo mais trabalhoso para alturas superiores à 5 metros, pois foi difícil alcançar a estabilidade mesmo com o tripé e a ajuda de um outro operador. Em áreas externas o drone conseguiu capturar fotos em grande quantidade, em locais de difícil acesso e sem comprometer a segurança das pessoas que operavam o equipamento, em contrapartida, dentro da adega onde o teto era baixo, era inviável a sua utilização. Tondelo e Barth (2019) trazem uma opinião semelhante ao tratar que métodos tradicionais necessitam de logística envolvendo locação, montagem e desmontagem de equipamentos, como por exemplo andaimes, aumentando o custo e dificultando

a execução da inspeção. Reforça que a logística é simplificada com a utilização de um drone e apenas um operador qualificado.

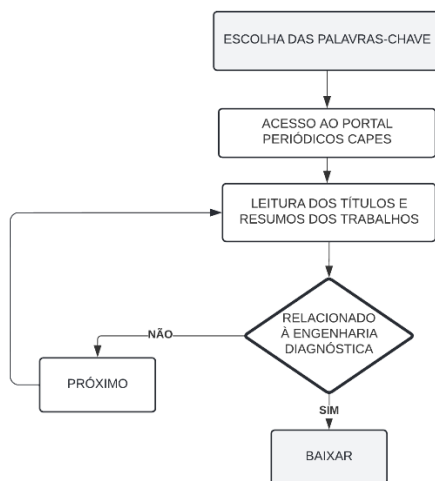
No que diz respeito aos dados obtidos com sensores termais acoplados à drones, as condições climáticas, como a presença de chuvas e ventos afetam a estabilidade do voo, prejudicando às imagens geradas. O autosombreamento e o ângulo de observação da superfície também são fatores a serem levados em consideração. É recomendado a captura de imagens RGB simultaneamente aos termogramas para o esclarecimento das informações obtidas à respeito das regiões inspecionadas (BAYOMI *et al.*, 2021).

6. MATERIAIS E MÉTODOS

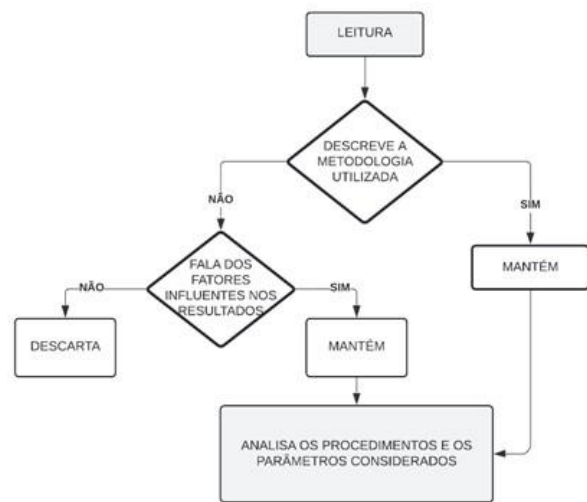
Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, foi realizada uma pesquisa de artigos existentes nos Periódicos CAPES que estavam relacionados à área de Engenharia Diagnóstica, em particular aqueles que abordassem o uso da termografia infravermelha e drones em inspeções de estruturas. A escolha dos artigos foi realizada e refinada a partir de duas etapas, conforme apresentado na Figura 3 (a) e (b).

Figura 3: Fluxograma do método para a seleção de artigos relacionados ao tema da pesquisa

(a) Primeira etapa: seleção geral dos artigos



(b) Segunda etapa: refinamento da pesquisa



Para o estágio inicial da busca pelos artigos com tema necessário para as análises deste trabalho (Figura 3 (a)), foram escolhidas palavras-chaves em português: Termografia infravermelha, inspeções prediais, engenharia diagnóstica, VANT, e algumas palavras complementares para direcionar resultados que apresentem informações sobre critérios das inspeções, como “parâmetro” e “fatores”. Também foram utilizados termos em inglês: infrared thermography, building inspections, diagnostic engineering, factors that influence, UAV, drone e pathological manifestations. Algumas combinações das palavras-chave foram adotadas para filtrar trabalhos que contenham as informações desejadas.

Nesta primeira etapa, foram selecionados os artigos cujos títulos se relacionavam com o uso da termografia infravermelha ou drones na engenharia diagnóstica e aqueles que atenderam a este critério eram baixados para uma leitura posterior rápida, como apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** figura 3.

Na segunda etapa foi feita uma análise mais aprofundada dos trabalhos, em que foi analisado o objeto de estudo e o procedimento utilizado para a coleta de dados com as câmeras termográficas e os drones. Desta vez, demonstrado através da Figura 3 (b), foram mantidos apenas os trabalhos que apresentavam a metodologia detalhada utilizada na inspeção e/ou fatores considerados relevantes para os resultados, em busca de observar a possibilidade de um procedimento padronizado. Os trabalhos que não atenderam a esse critério foram descartados.

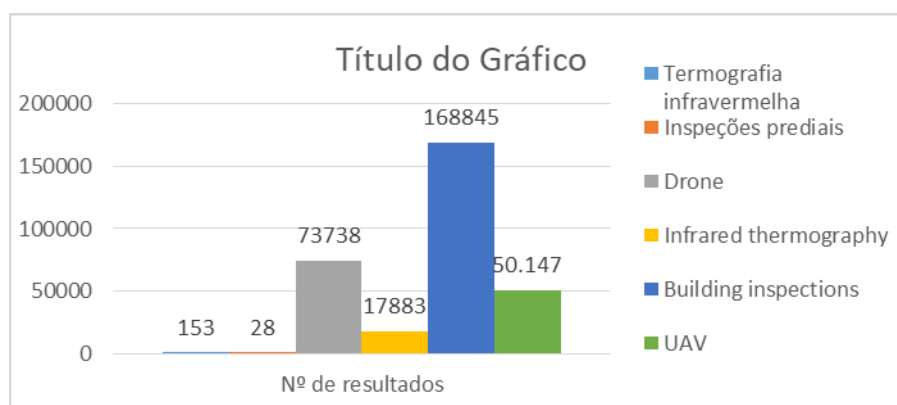
Por fim, foi feita uma análise dos fatores considerados relevantes pelos autores durante o uso dessas técnicas em inspeções prediais, em que foram listados quais influenciam nos resultados obtidos com as câmeras termográficas e em seu uso acopladas à drones, avaliando o que ainda não foi abordado sobre o uso simultâneo dos dois dispositivos.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. ARTIGOS QUE FORAM INCORPORADOS NO ESTUDO

Ao realizar a pesquisa inicialmente com os termos “termografia infravermelha”, “inspeções prediais”, “infrared termography”, “drone”, “UAV” e “building inspections”, verificou-se que as palavras em português resultaram em poucos artigos (Figura 4), enquanto as palavras em inglês resultaram em um número maior. Duas situações podem ser hipotetizadas, a primeira é que o número de revistas em português com temas que abordam a engenharia diagnóstica no Brasil ainda é muito pequeno, além de ter fatores de impacto menores. Por outro lado, também pode-se pensar que o tema do uso de termografia infravermelha em inspeções de estruturas, também ainda não foi extensamente abordado, mostrando a necessidade de mais pesquisas nestas áreas. Importante ressaltar também que o inglês é a língua universal, resultando em um número maior de resultados.

Figura 4: Resultado da pesquisa nos Periódicos CAPES com as palavras-chave em português e em inglês



Fonte: Própria autora, 2022.

Considerando o número extremamente elevado de artigos encontrados na primeira etapa, refinou-se a pesquisa utilizando agrupamento de palavras para direcionar ainda mais os resultados. As combinações adotadas estão expostas na Tabela 1, juntamente com a quantidade de resultados encontrados. Dos 1307 artigos encontrados, foram apenas avaliados o título e, em alguns casos, os resumos, decidindo-se baixar e aprofundar um pouco a análise apenas naqueles que era possível identificar a relação com a engenharia diagnóstica associada à termografia, drones ou a combinação dessas duas técnicas.

Tabela 1: Quantidade de trabalhos baixados conforme as palavras e combinações adotadas

Palavras-chave	Nº resultados	Nº baixados
Termografia infravermelha	153	15
Inspeções prediais	28	2
Termografia infravermelha + engenharia diagnóstica	6	3
Termografia infravermelha + fatores	47	2
Termografia infravermelha + parâmetro	99	10

Termografia infravermelha + manifestações patológicas	8	6
Infrared thermography + building inspections + factors that influence	441	17
Drone + manifestações patológicas	2	2
Drone + engenharia diagnóstica	10	1
Drone + termography infrared	370	40
UAV + building inspections + factors that influence + diagnostic engineering	86	6
UAV + pathological manifestations + factors that influence	6	2
VANT + inspeções prediais	3	2
VANT + engenharia diagnóstica	24	1
VANT + manifestações patológicas	24	3
TOTAL	1307	112

Fonte: Própria autora, 2022.

Para o refinamento final dos artigos a serem incorporados a esta pesquisa foi feita uma leitura expedita em todos os arquivos baixados, dividindo-os em grupos conforme o assunto abordado (termografia infravermelha, uso de drones em inspeções prediais; uso da termografia infravermelha associada aos drones e, por fim, trabalhos que não se enquadravam na área da pesquisa ou ainda repetidos. Foram descartados um total de 1195 artigos, conforme exposto na Tabela 1. A Tabela 2 apresenta a quantidade de arquivos baixados conforme essa divisão, expondo também a quantidade considerada relevante para o estudo por apresentarem informações que contribuíssem para a determinação das melhores condições para a coleta dos dados nas inspeções.

Tabela 2: Número de trabalhos baixados X número de trabalhos mantidos para estudo

Assunto abordado	Nº de trabalhos lidos	Nº trabalhos mantidos
Termografia infravermelha (TI)	49	21
Drones	19	10
TI e drones	19	14
Não aplicados à engenharia civil	15	-
Total	102	45

Fonte: Própria autora, 2022.

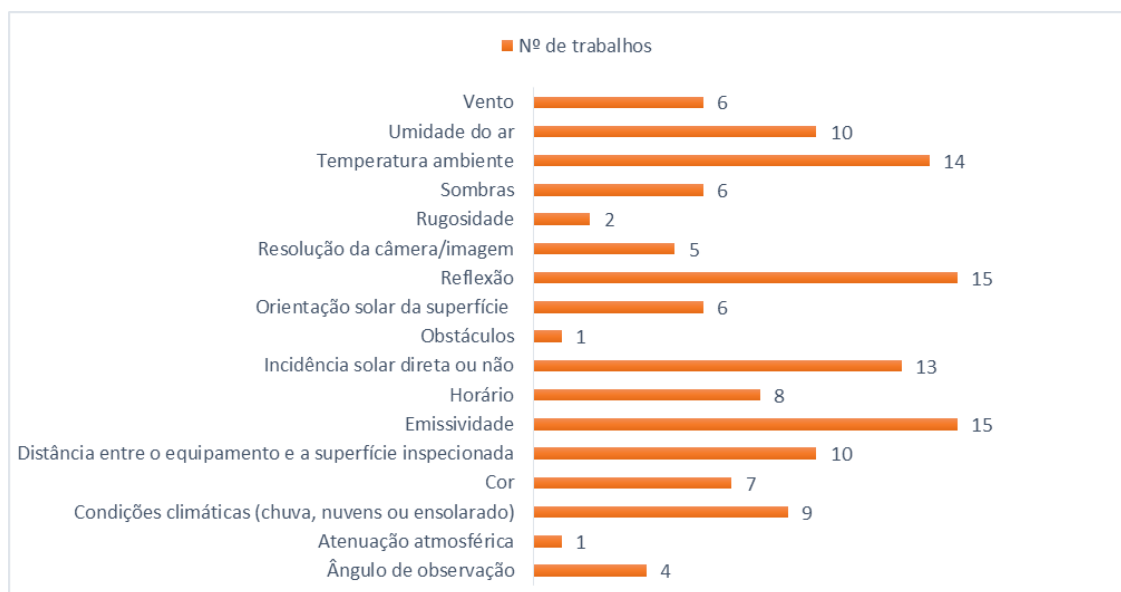
Durante a leitura expedita foi analisado quais trabalhos abordavam sobre os fatores que afetam os dados obtidos pelas técnicas supracitadas e quais descrevem a metodologia adotada na inspeção. Dos 112 trabalhos, os que não descreviam nenhuma dessas considerações foram descartados, restando apenas 45 trabalhos para serem estudados mais detalhadamente.

Na sequência serão apresentados obtidos após análise dos artigos que permaneceram no estudo.

7.2. TERMOGRAFIA EM ENGENHARIA DIAGNÓSTICA: PARÂMETROS INFLUENTES

Conforme contatado na revisão de literatura, a termografia é muito utilizada na identificação de anomalias em edificações, sendo que as medidas adotadas para facilitar a interpretação dos termogramas variam de estudo para estudo. Na Figura 5 são apresentados os fatores considerados pelos autores como relevantes a serem observados e controlados em inspeções utilizando a termografia infravermelha em inspeções prediais.

Figura 5: Fatores considerados relevantes a serem observados e controlados nos trabalhos com inspeções utilizando termografia infravermelha.



Fonte: Própria autora, 2022.

De acordo com a Figura 5, é possível ver que os fatores como a emissividade do material e temperatura ambiente e reflexão foram os mais comuns. Conforme explicado da revisão bibliográfica, isso provavelmente se deve ao fato que a emissividade e temperatura ambiente são informações básicas a serem inseridas nas câmeras termográficas (ROCHA *et al.*, 2018; TAKEDA e MAZER, 2018; LERMA, CABRELLES E PORTALÉS, 2011; AGHAEI *et al.*, 2018; ROCHA e PÓVOAS, 2019; HERRMANN, 2019; TANAKA e PAVON, 2021; SAKAMOTO e FIORITI, 2017; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, 2012; LIÑÁN *et al.*, 2011; FREITAS, CARASEK e CASCUDO, 2014; DE FREITAS, DE FREITAS e BARREIRA, 2014; BAUER *et al.*, 2015; MARSHALL *et al.*, 2018; FICAPAL E MUTIS, 2019; EDIS FLORES-COLEN e DE BRITO, 2013; SIRCA JR e

ADELI, 2018; FRODELLA *et al.*, 2017; BAYOMI, 2021; MOROPOULOU *et al.*, 2013; ORTIZ-SANZ *et al.*, 2019).

A forma da incidência do sol na superfície, assim como sua relação com o horário de inspeção, também foi um fator bastante encontrado nos trabalhos analisados (TAKEDA e MAZER, 2018; LERMA, 2018; ROCHA *et al.*, 2018; FREITAS, CARASEK e CASCUDO, 2014; PÉREZ-SÁNCHEZ e PIEDECAUSA-GARCÍA, 2016; RAKHA e GORODETSKY, 2018; ROCHA e PÓVOAS, 2019; TANAKA e PAVON, 2021; SAKAMOTO e FIORITI, 2017; DE FREITAS, DE FREITAS e BARREIRA, 2014; BAUER *et al.*, 2015; EDIS FLORES-COLEN e DE BRITO, 2013; SIRCA JR e ADELI, 2018; SAKAGAMI, 2015).

De Freitas, De Freitas e Barreira (2014) buscaram compreender se a forma em que ocorre a incidência solar influenciava os termogramas obtidos das superfícies. Para isso realizaram leituras em uma fachada em situações diferentes de incidência solar (com incidência indireta, com incidência direta e após a incidência da radiação solar). O objeto de estudo foi uma fachada cuja composição é de reboco polimérico fino, reboco cimentício, alvenaria de tijolos, camada de ar, isolamento térmico e placas de gesso. Os autores encontraram maiores temperaturas nas regiões, e conseqüentemente melhor visualização das anomalias, quando as leituras foram realizadas no período de maior incidência solar, que no caso específico da pesquisa foi no turno da tarde, às 15 horas. Os resultados obtidos para os termogramas no turno da manhã, horário no qual a superfície ainda não havia sido aquecida pelo sol, foram mais tênues em termos de identificação de anomalias. Segundo os autores, isso ocorre pois quando há o aquecimento da superfície, a região com descolamento de revestimento apresenta maior temperatura superficial devido à uma barreira de ar existente entre o revestimento e substrato, fazendo com que a transferência de calor do meio externo para o mais interno seja dificultada (BARREIRA, 2004). De forma análoga, no período da noite há a redução de temperatura mais rapidamente, resultando em temperaturas menores.

Conforme Maldague (2001), diferenças de temperatura a partir de 1°C podem estar apontando a existência de uma anomalia. Se analisar uma superfície, por exemplo, que parte recebe radiação diretamente e parte recebe indiretamente, pode-se verificar uma grande variação de temperatura entre esses dois pontos. Neste caso, quando as leituras são feitas em fachadas que possuem partes com diferença de incidência solar, tal gradiente não necessariamente significa a presença de uma manifestação patológica no elemento analisado. Portanto, a não consideração da

condição de incidência solar que ocorre nesta superfície pode permitir um diagnóstico equivocado. A ABNT NBR 16969:2021 fala que ao comparar objetos semelhantes, a identificação da distribuição térmica ou temperaturas incomuns representam anomalias térmicas, no entanto não descrevem parâmetros bases que caracterizem essa atipicidade.

Freitas, Carasek e Cascudo (2014) e Lerma (2018) também desenvolveram pesquisas para avaliar possíveis interferências na identificação de anomalias quando as leituras térmicas são realizadas em diferentes horários, cujas características de aquecimento e resfriamento são diferentes. Além da questão de incidência solar, os autores também apontam a importância de considerar o período do dia para se fazer a inspeção, justamente devido ao comportamento diferenciado dos materiais no período de aquecimento e resfriamento. Rocha *et al.* (2018) também destacam a importância desse efeito para comparação das informações obtidas no ensaio. Nos estudos de Freitas, Carasek e Cascudo (2014) foram inspecionadas fachadas de duas edificações da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Goiás. As leituras foram realizadas em dias diversos para considerar também a diferença de umidade presente (dia chuvoso e dia seco). Foram realizadas leituras térmicas três horários distintos, 8h, 15h e 21h. A partir dos resultados obtidos, os autores concluíram que o melhor horário para as inspeções foi o das 15h do dia seco, período no qual, devido à maior temperatura, foi possível visualizar manchamentos de umidade nas platibandas e algumas fissuras. As leituras realizadas nos demais horários neste período (8h e 21h) não possibilitaram a visualização completa dessas manifestações patológicas.

Os resultados dos estudos de Freitas, Carasek e Cascudo (2014) também demonstraram que o período chuvoso não é o mais adequado para visualização de manifestações patológicas com termografia. Nesta condição de leituras não foi possível a visualização de fissuras e até mesmo a diferenciação entre materiais distintos, independente dos horários no qual as leituras foram realizadas. Segundo a própria autora deste artigo, uma possível causa da não visualização das anomalias seria o resfriamento total da superfície, sendo que em situações de grande incidência de chuva pode ocorrer o equilíbrio térmico em toda superfície. Em especial no caso de fissuras pouco profundas, a barreira térmica é pequena, não favorecendo a identificação de diferenças de temperaturas com o sensor. Em contrapartida, para a visualização e infiltrações em ambientes internos de uma edificação Rocha *et al.* (2018) optou por realizar uma inspeção interna em período chuvoso, considerando o horário das 16h. O resultado dos termogramas identificou a presença de

infiltrações tanto em locais que possuíam já apresentavam manchamentos escurecidos visíveis ao olho nu, como também em regiões que ainda não era possível identificar alguma manifestação patológicas.

Os estudos de Takeda e Mazer (2018) também focaram na avaliação das leituras termográficas em condições diferentes de umidade. Os resultados demonstraram que leituras realizadas a noite permitiram uma melhor visualização das manifestações patológicas, como fissuras e descolamento cerâmico. Barreira (2004) também defende que as inspeções termográficas devem ser realizadas a noite, porém em períodos afastados do pôr-do-sol, visto que a maior parte do calor absorvido pela superfície no período diurno ainda não foi dissipado. O autor ainda ressalta que o tempo para dissipação de calor varia de acordo com as propriedades de cada material.

A distância entre a superfície observada e a câmera é um fator importante a ser levado em consideração (HERRMANN *et al.*, 2019; ROCHA *et al.*, 2018; FREITAS, CARASEK e CASCUDO, 2014; SAKAMOTO e FIORITI, 2017; RODRÍGUEZ-LIÑÁN, 2012; DE FREITAS, DE FREITAS E BARREIRA, 2014; BAUER *et al.*, 2015; MARSHALL *et al.*, 2018; FICAPAL e MUTIS, 2019; FRODELLA *et al.*, 2017; LEGGIERO *et al.*, 2021; Ortiz-Sanz *et al.*, 2019). Bauer *et al.* (2015) chamam atenção ao fato de que resoluções baixas ocasionadas quando as imagens não são realizadas com a proximidade adequada, dificultam a visualização de manifestações. Isso ocorre, pois a câmera termográfica adota uma certa área do elemento para a medida da temperatura. Quando a distância entre o sensor térmico e a superfície aumenta, então esta área de leitura também aumenta, diminuindo assim a precisão do dado. Esse fator é relevante quanto à utilização dos drones, pois distâncias maiores associados à falta de estabilidade do equipamento podem resultar em imagens de baixas resolução, não permitindo a identificação de problemas.

Além disso, no caso de leituras realizadas à distâncias superiores à 10 metros, é necessário considerar a alteração da temperatura lida em razão da atenuação provocada pela atmosfera (BARREIRA, 2004), visto que medida de temperatura registrada pela câmera termográfica será diminuída. Rocha *et al.* (2018) adotaram em sua inspeção uma distância entre 2m e 3m para garantir uma boa resolução das imagens. No entanto isso pode ser um fator negativo quanto ao uso do drone, pois algumas áreas inspecionadas podem possuir limitações para a adoção de tais distâncias entre drone e superfície inspecionada.

Assim como ocorre com incidência solar direta, as sombras também provocam fenômenos complexos no regime de aquecimento da fachada (BARREIRA, 2004; FREITAS, CARASEK e CASCUDO, 2014; LERMA, CABRELLES e PORTALÉS, 2011; ROCHA e PÓVOAS, 2019; EDIS, FLORES-COLEN e DE BRITO, 2014; DE FREITAS, DE FREITAS e BARREIRA, 2014). Segundo Lerma, Cabrelles e Portalés (2011), as sombras são fontes de erros nas leituras, sendo um ponto de atenção para a análise dos dados. Em seu trabalho os autores fizeram a análise térmica multitemporal em um edifício histórico do século XV, o Arenberg Castel, em Heverlee, Leuven (Bélgica). O objetivo do estudo era a construção de um mapa de umidade da superfície. Confirmou através de sua abordagem que termogramas realizados em vários horários podem ser usados na identificação de áreas afetadas pela umidade, ressaltando também que o processamento das imagens requer conhecimento dos materiais e estruturas para evitar erros nas análises.

Sakamoto e Fioriti (2017) consideram a reflexão da radiação emitida pelos materiais estudados e do seu entorno como um fator a ser considerado. Inclusive, em seus estudos Bauer *et al.* (2015) ressaltam que a radiação refletida influencia os resultados obtidos, pois a câmera capta além da temperatura emitida pelo objeto, a refletida por ele, influenciando assim as leituras. Sugere-se a determinação da temperatura aparente refletida para, se necessário, corrigir os resultados (TANAKA e PAVON, 2021; BAUER *et al.*, 2015).

Sakamoto e Fioriti (2017) relatam que as cores das superfícies permitem a absorção e emissão de radiações infravermelhas em intensidades diferentes, permitindo a visualização de gradientes de temperatura diferentes nos termogramas. Os autores realizaram ensaios para verificar a influência da cor ao realizar termogramas em temperatura ambiente e após a exposição à radiação por longo período. Após análise dos resultados, eles concluíram que em temperatura ambiente, tanto as cores escuras como as claras não apresentaram temperaturas muito diferentes. Entretanto, quando o ensaio foi realizado com a incidência de radiação térmica, as cores mais escuras apresentaram temperaturas superiores de até 7 °C, em relação as cores mais claras.

Por fim, os trabalhos de alguns autores também apontam que a rugosidade do material tem relação direta com a reflexão da superfície (EDIS, FLORES-COLEN e DE BRITO, 2013; BAUER *et al.*, 2014). De acordo com Edis, Flores-Colen e De Brito (2013), superfícies lisas podem refletir a temperatura de fontes de calor a sua volta. A alteração da rugosidade proveniente do acúmulo de sujeira ou desgaste da superfície afeta a refletividade e conseqüentemente a variação da

temperatura, permitindo assim identificar as sujidades que também são caracterizadas como manifestações patológicas. Entretanto, a mudança de rugosidade em um mesmo tipo de material, como por exemplo os diferentes tipos de peças cerâmicas, também pode levar a diagnósticos equivocados.

7.3. DRONES EM ENGENHARIA DIAGNÓSTICA: PARÂMETROS INFLUENTES

Como já citado anteriormente, o uso de veículos aéreos não tripulados (VANT), em particular os drones, facilita a coleta de informações em inspeções prediais, visto que permite uma visualização mais rápida e segura dos elementos a serem vistoriados. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) ainda não disponibilizou normas específicas que padronizem a realização de inspeções através do uso de sensores embarcados em drones. Dessa forma, é importante atentar as características específicas de voos de drone e refletir como elas poderiam influenciar as informações coletadas por sensores embarcados nesses equipamentos. A Figura 6 apresenta a lista de fatores encontrados na revisão da literatura e que foram considerados pelos autores como relevantes para inspeções de estruturas realizadas a partir de drones.

Figura 6: Fatores considerados pelos autores como relevantes em inspeções utilizando veículos aéreos não-tripulados em inspeções prediais



Fonte: Própria autora, 2022.

Os parâmetros mais citados foram a distância entre o equipamento e a superfície e a presença de vento (ROCHA e PÓVOAS, 2017; ROCHA e PÓVOAS, 2019; TONDELO e BARTH,

2019; PARENTE, FELIX e PIKANÇO, 2017; DE BERARDINIS *et al.*, 2018; DUAN *et al.*, 2019; RAKHA e GORODETSKY, 2018; LIMA *et al.*, 2020). A distância tem relação direta com a resolução da câmera, sendo que quanto maior a distância do drone à superfície, mais complicado será de visualizar algumas anomalias nas superfícies inspecionadas. No caso das câmeras termográficas, vai interferir na identificação de pontos com temperaturas diferentes. Já o vento influencia na estabilidade do equipamento, podendo gerar imprecisões geométricas nos resultados, devendo-se sempre atender às especificações técnicas sobre a velocidade máxima do vento no qual o drone vai poder ser operado para garantir estabilidade das leituras. Além do mais, a ocorrência de ventos pode acarretar no arrefecimento da superfície permitindo a captação de valores equivocados da radiação do objeto. É importante que o planejamento de voo considere os horários mais favoráveis, com previsões da velocidade dos ventos, bem como outras condições, tal como a presença de sombras (PARENTE, FELIX e PIKANÇO, 2017).

Bayomi (2021) também cita sobre algumas condições climáticas que devem ser evitadas na realização de inspeções por drones, no mesmo intuito de garantir a estabilidade do voo e, conseqüentemente, das leituras realizadas pelos sensores. Além de chuvas e vento, o autor também cita a interferência da neve. Tondelo e Barth (2019) também destacaram a importância das condições climáticas na estabilidade do equipamento, como a presença de ventos e chuvas. O autor acredita que todos os benefícios gerados na simplificação da inspeção realizada com drones pode ser perdido com condições climáticas desfavoráveis.

Outro fator relevante apontado na literatura técnica é a presença de obstáculos próximos às fachadas, visto que impõem dificuldades para a realização do voo do drone (ROCHA e PÓVOAS, 2017; DIAS, FLORES-COLEN e SILVA, 2021; BAYOMI, 2021). Tondelo e Bath (2019) também citam que obstáculos próximos as fachadas, como árvores e fios elétricos, atrapalham a coleta dos dados, pois vão incidir em desvios das rotas previamente estabelecidas, podendo acarretar na necessidade da obtenção de imagens à distâncias maiores e, conseqüentemente, com qualidades menores. Os autores apontam também a interferência de sinal provocada pelos vidros e metais localizados na edificação ou seu entorno, afetando o voo do drone.

7.4. SENSORES TERMAIS EMBARCADOS EM DRONES: PARÂMETROS INFLUENTES

Dos 45 artigos analisados, 14 utilizaram sensores termais embarcados em drone como objeto de estudo (AGHAEI *et al.*, 2018; OMAR E NEHDI, 2017; ROCHA e PÓVOAS, 2017; ROCHA E PÓVOAS, 2019; DIAS, FLORES-COLEN e DE BRITO, 2013; FICAPAL e MURTIS, 2019; *et al.*, 2021; RAKHA e GORODETKY, 2018; FRODELLA *et al.*, 2017; SONY, LAVENTURE e SADHU, 2019; ZHANG *et al.*, 2017; LEGGIEGO *et al.*, 2021, MOROPOULOU *et al.*, 2013; ORTIZ-SANZ *et al.*, 2019). A Figura 7 traz o levantamento dos parâmetros encontrados na literatura.

Figura 7: Fatores considerados pelos autores como relevantes em inspeções utilizando sensores termais acoplados à veículos aéreos não-tripulados em inspeções prediais



Fonte: Própria autora, 2022.

As condições climáticas são fatores citados por todos os trabalhos, tendo em vista que afetam tanto o voo dos drones quanto os termogramas gerados pela câmera. As chuvas e os ventos influenciam na estabilidade do equipamento, prejudicando na resolução das imagens. Além disso, tais condições provocam o resfriamento das superfícies, o que interfere na análise térmica a partir de informações coletadas com as câmeras termográficas.

Nos estudos de Omar e Nehdi (2017) foram realizadas inspeções de dois decks de pontes de concreto reforçado, onde o drone foi utilizado como meio de transporte para uma câmera termográfica. Os autores objetivaram a identificação de anomalias que em uma inspeção visual se mantiveram ocultas. Os resultados apontaram influência das condições ambientais (carga solar, temperatura ambiente e velocidade do vento) nas leituras realizadas pelo sensor infravermelho. Segundo os autores, a incidência solar é um fator importante a ser considerado, pois as sombras podem ser geradas nas imagens obtidas. Este ponto também é ressaltado por Aghaei *et al* (2018). Além disso, Omar e Nehdi (2017) adotaram o ângulo de 90° entre o drone/sensor e a plataforma inspecionada, de forma a minimizar os efeitos de distorção da lente. Os estudos concluíram que a associação de sensores termais aos drones favorece a aquisição rápida, segura e econômica de dados para avaliação do estado de conservação decks das pontes.

Aghaei *et al* (2018) focaram seu trabalho na realização de inspeção com termografia embarcada em drone com o objetivo de identificar de falhas em instalações fotovoltaicas em uma Usina localizada em Santa Catarina, sul do Brasil. Os autores estabeleceram que a altura mínima entre o plano de inspeção e o equipamento deve ser de 5 metros, pois isso evitaria o autosobreamento por parte do drone. Entretanto, o objeto de estudo encontrava-se sobre a cobertura, ou seja, no plano horizontal, demonstrando que esta consideração é importante para coberturas e não fachadas. Os autores consideraram também que o horário logo após o meio-dia, logo no início da tarde, como o mais adequado para a realização do ensaio com drones associados à câmeras termográficas, visto que há uma perpendicularidade do sol ao plano que está sendo inspecionado. Os resultados demonstraram que foi possível detectar defeitos nas placas fotovoltaicas localizadas à 40 metros de altitude, sem que houvesse interrupção na geração de energia.

Ficapal e Mutis (2019) estudaram as pontes térmicas produzidas em fachadas com paredes de vidro, utilizando imagens geradas por uma câmera termográfica acoplada à um drone. Vários fatores foram considerados para evitar erros nos dados obtidos, dentre eles estão a utilização de procedimentos para a obtenção da emissividade real aproximada dos materiais e a consideração de fatores ambientais como a presença de vento, grandes partículas (moléculas de vapor de água e gás) presentes na atmosfera, temperatura ambiente e umidade. Também relatam que a distância ou o ângulo de incidência da amostra são possíveis causadores de alterações nas medições. Além

disso, recomenda que as inspeções sejam realizadas à noite ou em período nublado e velocidade dos ventos baixa para evitar perda de calor por meio de convecção. A ABNT NBR 15572:2013, voltada à utilização da termografia e inspeções de equipamento elétricos e mecânicos recomenda evitar a realização de inspeções com tal método com velocidades dos ventos superiores à 20km/h.

É válido lembrar também que a utilização do drone possibilita a retirada de fotografias com ângulo de observação aproximadamente perpendicular à superfície estudada, favorecendo a visualização do valor correto da emissividade dos materiais. Como já citado anteriormente, a câmera termográfica pode captar valores de emissividade diferentes do real quando posicionada à ângulos muito maiores ou menores que 90°. A realização de imagens com o sensor termal muito próximo às fachadas das edificações, geradas por um operador no nível do terreno, podem gerar termogramas que permitam a interpretação incorreta dos dados, devido aos grandes ângulos de observação necessários para a capturar regiões mais altas. Neste caso tal erro seria evitado ao adotar medições utilizando o drone.

Ficapal e Mutis (2019) realizaram medições em ângulos variados a fim de minimizar o efeito da reflexão. Afirma que para materiais com emissividade inferior à 0,5, como no caso de algumas superfícies metálicas, as medições apresentam maiores erros devido à temperatura refletida, ressaltando também a possível ocorrência de variações devido à inclinação da câmera infravermelha ou do VANT durante o voo.

Por fim, é possível dizer que as considerações feitas em relação ao uso individual de ensaios termográficos e voos de drone devem ser consideradas de forma concomitante no caso de termografia embarcada em drone.

A Tabela 3 apresenta um comparativo dos fatores influentes nas inspeções realizadas com termografia infravermelha, drones e com o uso concomitante dessas técnicas.

Tabela 3: Comparativo dos fatores listados que influenciam nos resultados obtidos por cada técnica.

Fatores evidenciados	Altitude	Ângulo de observação	Atenuação atmosférica	Condições climáticas (chuva, nuvens ou ensolarado)	Cor	Distância	Emissividade	Horário	Incidência solar direta ou não	Luminosidade	Metais e vidros	Obstáculos	Orientação solar da superfície	Reflexão	Resolução da câmera	Rugosidade	Sombras	Temperatura ambiente	Umidade do ar	Vento
Assunto abordado nos trabalhos																				
Apenas termografia infravermelha		X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
Apenas drones	X	X		X		X			X		X	X	X		X		X			X
Drones com termografia infravermelha	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X

Fonte: Própria autora, 2022.

Apenas duas das considerações listadas no uso da termografia infravermelha e dos drones separadamente não foram citadas em trabalhos em que essas técnicas atuaram conjuntamente, sendo elas a cor e a presença de metais e vidros. Entretanto, estes são fatores importantes, pois no caso de inspeções de fachadas, por exemplo, as superfícies com cores variadas expostas à radiação solar ou às fontes artificiais de radiação podem gerar termogramas com gradientes de temperaturas diferentes, os quais devem ser analisados cautelosamente para apontar ou não a presença de anomalias. No caso das superfícies com metais e vidros, além de interferir no sinal do drone, devem ser consideradas devido à refletividade e transmissividade desses materiais.

Um ponto importante a ser estudado é o uso dessas técnicas no período da noite. Como apresentado anteriormente, alguns autores relatam o turno da noite como o mais adequado para a realização da inspeção utilizando a termografia, no entanto não foram encontrados trabalhos que analisassem essa informação com o uso do drone. A adoção de tal equipamento também pode sofrer interferência da radiação de fontes artificiais, como o caso de postes elétricos ou iluminação das fachadas, interferindo nos dados obtidos pela câmera termográfica, provocando também sombras nas imagens obtidas. Isso expõe a necessidade de pesquisas posteriores seguindo essa vertente, buscando compreender e elaborar formas para contornar tais situações. Outro fator é que a NBR 16969:2021 não apresenta orientações para a realização de inspeções utilizando a termografia

infravermelha através de dispositivos embarcados em drones, evidenciando a necessidade de estudos voltados ao conhecimento das limitações para o uso concomitante destas técnicas.

8. CONCLUSÕES

O uso da termografia infravermelha em inspeções prediais tem apresentado resultados satisfatórios na identificação de anomalias térmicas, no entanto deve-se atentar a todos os fatores que podem afetar os dados obtidos. As condições climáticas variadas, horário das inspeções, características dos materiais, entre outros, devem ser considerados para a realização da inspeção e interpretação dos termogramas realizados, pois estes têm relação direta com a radiação captada pela câmera termográfica.

Para o uso dos drones em inspeções se faz necessário seguir as recomendações estabelecidas pelo fabricante, considerando também critérios encontrados na literatura que fomentem a realização das fotografias. Fatores como a chuva, o vento e a presença de obstáculos interferem no voo do dispositivo, afetando também a qualidade das imagens obtidas.

Quanto ao uso de câmeras termográficas embarcadas nesses veículos aéreos não-tripulados, foi possível concluir que são válidas todas as considerações feitas para o uso das técnicas individualmente. Os parâmetros mais considerados como influentes foram condições climáticas, ventos e ângulo de observação. Fatores como a cor das superfícies inspecionadas e a presença de metais e vidros não foram considerados nos trabalhos estudados, assim como também não foram encontrados trabalhos que abordassem o uso desses dispositivos simultaneamente em inspeções noturnas, e conseqüentemente os efeitos que as iluminações artificiais podem causar nos dados. Vale destacar que a NBR 16969:2021 não apresenta orientações sobre o uso concomitante dessas técnicas de inspeção e, também, não especifica critérios para inspeções no período noturno. Essas questões evidenciam a necessidade de trabalhos futuros para a compreensão das limitações do uso dos drones com câmeras termográficas embarcadas, motivando a elaboração procedimentos padronizados.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 15572: Ensaios não destrutivos — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. **Rio de Janeiro**, 2013.

_____. NBR 16747: Inspeção predial - Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento – Procedimento. **Rio de Janeiro**, 2020.

_____. NBR 16818: Ensaios não destrutivos - Termografia infravermelha — Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha. **Rio de Janeiro**, 2020.

_____. NBR 16969: Ensaios não destrutivos - Termografia infravermelha - Princípios gerais Inspeção predial. **Rio de Janeiro**, 2021.

AGHAEI, Mohammadreza *et al.* Fault inspection by aerial infrared thermography in a pv plant after a meteorological tsunami. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018**. 2018.

BARREIRA, Eva Sofia Botelho Machado. Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higratérmico dos edifícios. 2004.

BAUER, Elton *et al.* Critérios para a aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias em fachadas de edifícios. *Rev Politec (Instituto Politec Bahia)*, v. 26, p. 266-277, 2014.

BAUER, Elton *et al.* Infrared thermography—evaluation of the results reproducibility. **Structural survey**, 2015.

BAYOMI, Norhan *et al.* Building envelope modeling calibration using aerial thermography. **Energy and Buildings**, v. 233, p. 110648, 2021.

DE BERARDINIS, Pierluigi *et al.* Instruments for assessing historical built environments in emergency contexts: non-destructive techniques for sustainable recovery. **Buildings**, v. 8, n. 2, p. 27, 2018.

DE FREITAS, Sara S.; DE FREITAS, Vasco P.; BARREIRA, Eva. Detection of façade plaster detachments using infrared thermography—A nondestructive technique. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 80-87, 2014.

DEWITT, David P. *et al.* Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. **Livros Técnicos e Científicos (LTC) Editora SA**, 2014.

DIAS, Ilídio S.; FLORES-COLEN, Inês; SILVA, Ana. Critical analysis about emerging technologies for building's Façade inspection. **Buildings**, v. 11, n. 2, p. 53, 2021.

DUAN, Yuxia *et al.* On the use of infrared thermography and acousto—ultrasonics NDT techniques for ceramic-coated sandwich structures. **Energies**, v. 12, n. 13, p. 2537, 2019.

EDIS, Ecem; FLORES-COLEN, Inês; DE BRITO, Jorge. Passive thermographic inspection of adhered ceramic claddings: limitation and conditioning factors. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 27, n. 6, p. 737-747, 2013.

EDIS, Ecem; FLORES-COLEN, Inês; DE BRITO, Jorge. Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 187-197, 2014.

FICAPAL, Albert; MUTIS, Ivan. Framework for the detection, diagnosis, and evaluation of thermal bridges using infrared thermography and unmanned aerial vehicles. **Buildings**, v. 9, n. 8, p. 179, 2019.

FLIR. FLIR i3, FLIR i5, FLIR i7, Extech IRC30 Manual do utilizador. 2010.

FREITAS, Juliana Gomes de; CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 57-73, 2014.

FRODELLA, William *et al.* Landslide mapping and characterization through infrared thermography (IRT): suggestions for a methodological approach from some case studies. **Remote Sensing**, v. 9, n. 12, p. 1281, 2017.

HART, J. M. A practical guide to infra-red thermography for building surveys. Garston, Watford, BRE, 1991.

HERRMANN, Thiana Dias *et al.* Estudo de caso do desempenho de estanqueidade à água de argamassas e hidrorrepelentes - Parte I. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, 2019.

KORDATOS, E. Z. *et al.* Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1261-1265, 2013.

LEGGIERO, Mark *et al.* Radiative heat loss estimation of building envelopes based on 3D thermographic models utilizing small unmanned aerial systems (sUAS). **Energy and Buildings**, v. 244, p. 110957, 2021.

LERMA, Carlos *et al.* Quantitative analysis procedure for building materials in historic buildings by applying infrared thermography. **Russian Journal of Nondestructive Testing**, v. 54, n. 8, p. 601-609, 2018.

LERMA, José L.; CABRELLES, Miriam; PORTALES, Cristina. Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building façade. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2190-2197, 2011.

LIMA, Moemí Barbosa *et al.* Inspeção de Manifestações Patológicas de Fachadas em Edifício de Grande Altura com VANT. **MIX Sustentável**, v. 6, n. 2, p. 111-122, 2020.

LIÑÁN, C. Rodríguez *et al.* Inspección mediante técnicas no destructivas de un edificio histórico: oratorio San Felipe Neri (Cádiz). **Informes de la Construcción**, v. 63, n. 521, p. 13-22, 2011.

MALDAGUE, X. **Infrared and Thermal Testing**: nondestructive testing handbook. 3. ed. Columbus, OH: Patrick O. Moore, 2001.

MALHOTRA, V. Mohan; CARINO, Nicholas J. Handbook on nondestructive testing of concrete. CRC press, 2004.

MARSHALL, Alex *et al.* Variations in the U-value measurement of a whole dwelling using infrared thermography under controlled conditions. **Buildings**, v. 8, n. 3, p. 46, 2018.

MOROPOULOU, Antonia *et al.* Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1222-1239, 2013.

OMAR, Tarek; NEHDI, Moncef L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography. **Automation in Construction**, v. 83, p. 360-371, 2017.

ORTIZ-SANZ, Juan *et al.* IR thermography from UAVs to monitor thermal anomalies in the envelopes of traditional wine cellars: Field test. **Remote sensing**, v. 11, n. 12, p. 1424, 2019.

PARENTE, D. Cardoso; FELIX, N. Carvalho; PIÇANCO, A. Pessoa. Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação de patologia superficial em pavimento asfáltico. **Rev. ALCONPAT**, Mérida, v. 7, n. 2, p. 160-171, agosto 2017.

RAKHA, Tarek; GORODETSKY, Alice. Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. **Automation in Construction**, v. 93, p. 252-264, 2018.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino *et al.* Detecção de infiltração em áreas internas de edificações com termografia infravermelha: estudo de caso. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 329-340, 2018.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; PÓVOAS, Yêda Vieira. A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte. **Revista Alconpat**, v. 7, n. 3, p. 200-214, 2017.

ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; PÓVOAS, Yêda Vieira. Detecção de corrosão em concreto armado com termografia infravermelha e ultrassom. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 53-68, 2019.

RODRÍGUEZ-LIÑÁN, Carmen *et al.* Análisis sobre la influencia de la densidad en la termografía de infrarrojos y el alcance de esta técnica en la detección de defectos internos en la madera. **Materiales de construcción**, n. 305, p. 99-113, 2012.

SAKAGAMI, Takahide. Remote nondestructive evaluation technique using infrared thermography for fatigue cracks in steel bridges. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 38, n. 7, p. 755-779, 2015.

SAKAMOTO, Camila Akemi; FIORITI, Cesar Fabiano. Estudo de parâmetros relevantes na obtenção de termogramas para diagnóstico de problemas patológicos. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 13, n. 2, 2017.

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

SONY, Sandeep; LAVENTURE, Shea; SADHU, Ayan. A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 26, n. 3, p. e2321, 2019.

TAKEDA, Othavio Toniasso; MAZER, Wellington. Potencial del análisis termográfico para evaluar manifestaciones patológicas en sistemas de revestimiento de fachadas. Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, p. 38-50, 2018.

TANAKA, Diandra; PAVON, Elier. Influência das dimensões dos descolamentos de revestimentos cerâmicos na avaliação com termografia de infravermelho. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 133-146, 2021.

TONDELO, Patricia Geittones; BARTH, Fernando. Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 10, p. e019009-e019009, 2019.

VOLLMER, Michael; MÖLLMANN, K. P. Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications. 2010.

ZHANG, Peng *et al.* Detection and location of fouling on photovoltaic panels using a drone-mounted infrared thermography system. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 016026, 2017.