

O uso da termografia infravermelha para verificação de corrosão de armaduras em postes de concreto armado

The use of infrared thermography to verify corrosion on reinforced concrete posts

Cómo usar la termografía infrarroja para verificar corrosión de armaduras en postes de hormigón armado

Recebido: 14/03/2022 | Revisado: 24/03/2022 | Aceito: 30/03/2022 | Publicado: 07/04/2022

Lucas Amorim Amaral Menezes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7022-2886>

Universidade de Pernambuco, Brasil

E-mail: laam1@poli.br

Yêda Vieira Póvoas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1907-415X>

Universidade de Pernambuco, Brasil

E-mail: yeda.povoas@gmail.com

Diego José Araújo Viégas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7385-5147>

Universidade de Pernambuco, Brasil

E-mail: diegoaraujoviegas@hotmail.com

Resumo

A termografia infravermelha pode mostrar, de forma não destrutiva, manifestações patológicas antes de tornarem-se visíveis e mais danosas, devido à existência de incoerências nos padrões de temperatura dos elementos da estrutura que apresentem as manifestações patológicas. A avaliação térmica com base na termografia é a percepção da temperatura superficial de um corpo pelo mecanismo de transferência de calor, pois todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica. Esse estudo objetiva analisar qualitativamente a utilização do ensaio térmico digital para detectar a ocorrência de corrosão em postes de concreto armado situados na orla da cidade de Olinda-PE. Os ensaios foram realizados em 10 postes no período das 14 às 15 horas, com verificação no face frontal (com ação direta dos respingos de névoa salina) e também na face oposta. O equipamento utilizado foi uma câmera termográfica, FLIR E-60. O ambiente dos ensaios tem classe de agressividade ambiental IV (muito forte), com risco de deterioração elevada. Na análise dos ensaios é possível verificar que os produtos da corrosão conduzem mais calor, apresentando uma temperatura mais elevada que o concreto, portanto, a procura pela ocorrência de corrosão está ligada à detecção de temperaturas mais elevadas do que as verificadas como tendência no concreto. Os ensaios mostraram que uma temperatura elevada em trincas no concreto podem ser uma indicação da ocorrência de corrosão de armaduras, assim como, através da análise dos termogramas, foram identificados indícios de corrosão nas estruturas analisadas.

Palavras-chave: Termografia infravermelha; Manifestação patológica; Corrosão; Termogramas.

Abstract

The infrared thermography can show, in a non-destructive way, pathological manifestations before them becoming visible and more harmful, due to the existence of inconsistencies in the thermal patterns of the elements of the structure that exhibit pathological manifestations. The thermal evaluation with basis on thermography is the perception of the superficial temperature of a body through the heat transfer mechanism), once every body with temperature above absolute zero emits thermal radiation. This study aims to qualitatively analyze the use of digital thermal experiment in order to detect the occurrence of corrosion in posts made of reinforced concrete located on Olinda's beachfront (PE). The experiments were performed on 10 posts between 14 and 15 o'clock, with verification on the front side (with direct activity of salty spray), and on the back side. The equipment used was a thermal camera, FLIR E-60. The surroundings of the experiments have environmental aggressiveness level IV (very intense), with elevated risk of deterioration. In the experiment analysis, it is possible to verify that the corrosion products conduct more heat, presenting a higher temperature than on the concrete, therefore, the search for the occurrence of corrosion is related to the detection of temperatures higher than the ones verified as a tendency in concrete. The experiments showed that an elevated temperature in concrete cracks may be an indication of the occurrence of corrosion on reinforcements, as well as, through the analysis of thermograms were identified indications of corrosion on the analyzed structure.

Keywords: Infrared thermography; Pathological manifestations; Corrosion; Thermograms.

Resumen

De manera no destructiva, la termografía infrarroja puede evidenciar manifestaciones patológicas antes de que se tornen visibles y más perjudiciales, debido a la existencia de incoherencias en los patrones de temperatura de los elementos de la estructura que pudieran presentar las manifestaciones patológicas. La evaluación térmica basada en la termografía es una percepción de la temperatura superficial de un cuerpo mediante el mecanismo de transferencia térmica, ya que todo cuerpo con una temperatura superior al cero absoluto emite radiación térmica. El objetivo de este estudio es analizar cualitativamente el uso del ensayo térmico digital para detectar corrosión en postes de hormigón armado situados en la periferia de la ciudad de Olinda-PE. Los ensayos se realizaron en 10 postes entre las 2 y las 3 de la tarde, con verificación tanto en la cara frontal (con acción directa de las salpicaduras de niebla salina) como en la cara opuesta. El dispositivo utilizado fue una cámara termográfica, modelo FLIR E-60. El ambiente de los ensayos presenta clase IV de agresividad ambiental (muy fuerte), con riesgo de deterioro elevado. En el análisis de los ensayos puede verificarse que los productos de la corrosión conducen más calor, con una temperatura más elevada que el hormigón; por lo tanto, buscar instancias de corrosión se vincula a la detección de temperaturas más elevadas que las verificadas como tendencia en el hormigón. Los ensayos demuestran que una temperatura elevada en grietas del hormigón puede indicar corrosión en las armaduras, al igual que se identificaron indicios de corrosión en las estructuras analizadas a través del análisis de los termogramas.

Palabras clave: Termografía infrarroja; Manifestación patológica; Corrosión; Termogramas.

1. Introdução

É inegável que a durabilidade e a vida útil das estruturas são grandes preocupações na área da engenharia civil. A atualização da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), no ano de 2014 em substituição a antiga versão de 2003, incorporou critérios e tópicos relativos a estas temáticas, indicando uma tendência de maiores preocupações. A NBR 6118 (ABNT, 2014), aborda sobre os projetos de estruturas de concreto e conforme indicação normativa, as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante a sua vida útil.

A avaliação térmica com base na termografia infravermelha é a percepção da temperatura superficial de um corpo pelo mecanismo de transferência de calor (radiação), uma vez que todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica (Usamentiaga *et al.*, 2014). Segundo Holst (2000), deverá haver um diferencial de temperatura entre o alvo e o meio, pois somente neste caso será possível ocorrer uma diferenciação entre eles.

De acordo com Incropera e Dewitt (2003), sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, ocorre, necessariamente, transferência de calor. Os mecanismos de transferência de calor são: radiação, condução e convecção. Para a identificação de estruturas e manifestações patológicas de uma edificação pode-se utilizar o mecanismo de radiação empregando a termografia digital (sem contato) ou de condução, por meio de termopares (com contato) (Lopes *et al.*, 2019).

A identificação da patologia após sua manifestação visual restringe as alternativas de correção e de minimização do problema, às vezes comprometendo a durabilidade da estrutura. Algumas patologias como a corrosão são bastante discretas até o momento da sua manifestação visual, logo, a necessidade de um método de pesquisa mais ágil e eficaz torna-se imprescindível, a fim de garantir a identificação da patologia antes dela tornar-se extremamente danosa à estrutura (Brique, 2016).

O objetivo deste estudo é identificar a corrosão em postes de concreto armado com a utilização da termografia infravermelha, assimilando e incorporando a utilização de análise térmica digital como método não destrutivo e sem contato para a identificação de manifestações patológicas. Com a utilização real, busca-se também a apresentação de um avanço tecnológico para o setor da construção civil.

2. Referencial Teórico

Nesta seção, apresenta-se, de forma objetiva os conceitos teóricos principais para este estudo, sendo eles a manifestação patológica da corrosão de armaduras e a técnica da termografia infravermelha.

2.1 Corrosão

A corrosão de armaduras em concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, onde o eletrólito apresenta características de resistividade elétrica consideravelmente mais altas do que as dos eletrólitos típicos que estão em um meio aquoso comum, não confinado a uma rede de poros, como é o caso do concreto (Cascudo, 1997). A armadura encontra-se no interior do concreto com pH em torno de 12,5, em meio altamente alcalino. Esta alcalinidade é devido basicamente a uma solução saturada de hidróxido de cálcio, sendo esta oriunda das reações de hidratação do cimento nas primeiras idades. Em idades avançadas o concreto continua, via de regra, propiciando um meio alcalino. Desta forma, a armadura presente no interior do concreto, em meio alcalino, está protegida do fenômeno da corrosão, devido à presença de uma capa ou película protetora de caráter passivo, que envolve essa armadura (Zomorodian *et al.*, 2021).

No entanto, existem diversos agentes agressivos que podem alterar o pH do concreto e promover a despassivação da armadura. A partir do momento em que a armadura não se encontra mais protegida, a corrosão se desenvolve e para que isso aconteça é necessário que haja no concreto uma célula eletroquímica e também a presença da água e do oxigênio presente no ar.

O mecanismo da corrosão do aço no concreto pode ser definido pelo modelo proposto por Tuutti (1982), que subdivide o processo em duas fases, a iniciação e a propagação. A iniciação corresponde ao período de tempo que vai desde a execução da estrutura até a ação do agente agressivo em atravessar o concreto do cobrimento, alcançar a armadura e despassivá-la. A fase da propagação, consiste no desenvolvimento da corrosão até que se alcance um grau inaceitável do processo (Cascudo, 1997).

Existem duas condições básicas que podem afetar a película passiva de proteção da armadura, descaracterizando-a. Uma delas é a presença de quantidade significativa de íons cloreto, que podem surgir tanto do meio externo e atingir a armadura por difusão, quanto podem já estar no interior do concreto. A outra condição é a diminuição da alcalinidade do concreto, que surge devido principalmente às reações de carbonatação ou penetração de substâncias ácidas no concreto (Ferreira *et al.*, 2017). Em casos especiais, a queda na alcalinidade pode ser oriunda da lixiviação do concreto.

A corrosão causada pela ação dos íons cloretos na estrutura age em ataques localizados à película passiva, conhecida como corrosão por pites. Conforme Favretto *et al.* (2021), a porosidade do concreto é de suma importância no transporte dos cloretos, já que a porosidade aberta caracteriza a permeabilidade da pasta, e o tamanho dos poros interfere na velocidade de transporte.

A corrosão das armaduras causada através da carbonatação que também promove a despassivação da armadura, reduzindo o pH do concreto é conhecida como corrosão generalizada. A redução do pH ocorre essencialmente pela ação do gás carbônico do ar, além de outros gases ácidos como o dióxido de enxofre e o gás sulfídrico. Uma característica muito importante do processo de carbonatação é a existência de duas zonas com pH diferentes, uma com pH próximo a 9 (carbonatada) e outra com pH maior que 12 (não carbonatada), isso ocorre devido a uma avanço do processo que separa essas zonas (“frente de carbonatação”) (Vogler *et al.*, 2020).

Alguns fatores influenciam a carbonatação, por exemplo, a relação água/cimento, pois quanto maior ela é, mais poroso é o concreto e maior também é a facilidade de entrada do gás carbônico e conseqüentemente a profundidade de carbonatação.

A umidade relativa do ar entre 50% e 70% é considerada ótima para o processo de carbonatação e é importante ressaltar que para que ele ocorra é necessário que os poros do concreto estejam parcialmente preenchidos com água, pois, na falta ou excesso da mesma, a difusibilidade dos gases ácidos é comprometida (Benítez et al., 2019).

Conforme Cascudo (1997), quando despassivada, a armadura fica vulnerável à corrosão, podendo ocorrer devido à chegada da frente de carbonatação, a ação dos cloretos, ou ainda pela ação simultânea dos dois fatores. Inicia-se então, pelo modelo proposto por Tuutti (1982), a propagação do fenômeno, desde que tenham elementos básicos para isto, sendo eles, o eletrólito, a diferença de potencial e o oxigênio.

A corrosão é, portanto, uma manifestação patológica frequente e danosa às estruturas de concreto armado, pois pode causar desde problemas estéticos até problemas estruturais (Garrido Vasquez *et al.*, 2016). Os problemas estéticos, como as manchas superficiais de tonalidade marrom e fissuração paralela à armadura do concreto, desvalorizam o local. Nascimento & Fontes (2021), afirmam ainda que, as fissuras são portas de entrada para agentes agressivos.

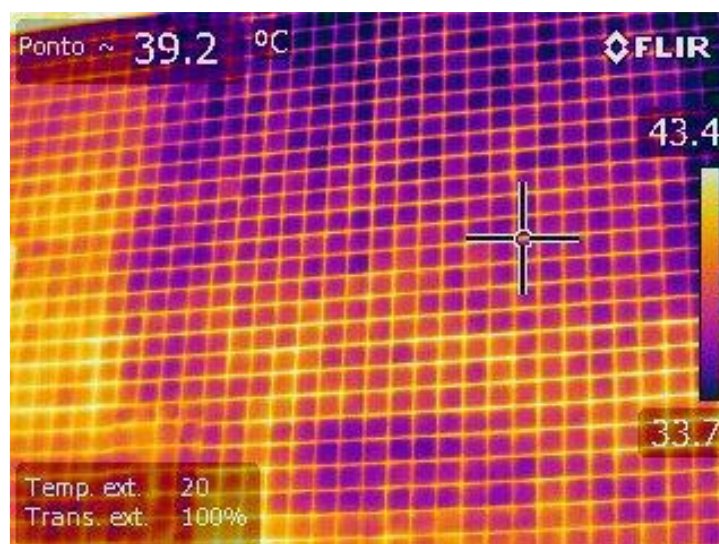
Dentre os problemas mais graves da corrosão podem ser citados: a formação de um produto expansivo, a perda de aderência da armadura, o destacamento do revestimento e a redução da seção da armadura que podem conduzir a um possível colapso da estrutura (Aslani & Dehestani, 2020).

2.2 Termografia Infravermelha

A termografia infravermelha é uma técnica científica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de dispositivos de obtenção de imagens térmicas sem contato. A imagem gerada é chamada de termograma ou imagem térmica, sabendo que, devido à emissão da radiação infravermelha dos objetos é possível a obtenção destas imagens. O conceito de avaliação térmica com base na termografia é então devido à percepção da temperatura superficial de um corpo pelo mecanismo de transferência de calor (radiação), uma vez que todo corpo com temperatura acima do zero absoluto emite radiação térmica (ITC, 2014).

Segundo Da Silva et al. (2021), os sistemas de termografia infravermelha captam a radiação térmica e convertem em um termograma que possui uma escala policromática (cores) ou monocromática (cinza). Usualmente, no termograma, há indicação das temperaturas limites (maior e menor) visualizadas e a distribuição da temperatura superficial do objeto, em tempo real, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1 - Termograma de uma fachada em revestimento cerâmico



Fonte: Patriota Junior et al. (2020).

A intensidade da radiação emitida depende de dois fatores: a temperatura do objeto e a capacidade do objeto de emitir radiação, conhecida por emissividade. No que se refere a radiação infravermelha, quanto mais quente está o objeto, maior a radiação para uma mesma emissividade. A captação das imagens de calor (termogramas), não visíveis pelo olho humano, é desenvolvida através da câmera termográfica que é o aparelho essencial para a realização do ensaio, tornando mais ágil a inspeção e a detecção das manifestações patológicas de forma não destrutiva (Burity Filho et al., 2021).

Apesar da referência à radiação, o utilizador desta tecnologia está interessado em temperatura. Como a relação entre radiação e temperatura é uma lei física, torna-se possível que as câmeras termográficas apresentem valores de temperaturas devido à conversão interna da medição da radiação e assim, os termogramas são gerados (Rocha & Póvoas, 2017).

As câmeras termografias possuem uma lente e detectores de radiação que são sensores que captam a energia radiante na faixa do infravermelho e direcionam esse sinal elétrico para ser processado e convertido em imagens térmicas (Viégas, 2015). Para desenvolver a análise dos termogramas utilizam-se, softwares, como por exemplo, o FLIR Tools que possibilita realizar: variações das paletas (colorações), uso de isoterma para enfatizar a temperatura de algum local, mudança da ferramenta de medição (ponto, caixa, elipse e linha). No entanto, esse software não é capaz de modificar o foco óptico da imagem, a faixa de temperatura e a composição da imagem.

O software FLIR Tools permite também a utilização da tecnologia MSX, que funde imagens térmicas e fotos digitais para criar imagens térmicas proporcionando uma visualização da imagem térmica em 3D e em conjunto com a isoterma facilitam a detecção do foco da manifestação patológica (Viégas, 2015).

Existem diversos fatores que influenciam nas análises dos resultados e podem induzir conclusões erradas caso não sejam adotados cuidados antes e durante a realização do ensaio. Na análise dos termogramas existe o risco de confundir alterações no objeto com irregularidades na temperatura superficial devido à fatores externos, sendo eles: condições térmicas do objeto e do meio em que se encontram, presença de fontes de calor externas e as condições necessárias para a medição (Sakamoto & Fioriti, 2017).

Conforme Viégas (2015), são condições necessárias para a medição: emissividade do objeto adotada, temperatura do ar, distância entre a câmera e o objeto, temperatura refletida e umidade relativa. Estas condições devem ser introduzidos na câmera e são tomadas como parâmetros. Algumas vezes é necessário regular os parâmetros a fim de minimizar efeitos prejudiciais durante a análise, como por exemplo, a baixa emissividade do material ou a distância muito grande entre o objeto e a termocâmara. A temperatura refletida é aquela admitida para todas as superfícies emissoras no meio adjacente ao objeto em estudo, enquanto que a temperatura atmosférica é a natural entre objeto e câmera. Sendo este parâmetro necessário para compensar as radiações refletidas pelo objeto e a emitida pela atmosfera.

A emissão da radiação eletromagnética de um material depende de uma propriedade denominada emissividade (ϵ), que fornece uma medida da capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro. Esta propriedade depende fortemente da superfície do material e de seu acabamento, com valores na faixa $0 < \epsilon < 1$, sendo 0 o refletor perfeito e 1 o emissor perfeito ou corpo negro (Aquino Rocha *et al.*, 2017).

A medição da radiação realizada pela câmera térmica depende da temperatura e da emissividade do corpo que está sendo analisado, portanto, a informação do valor da emissividade é fundamental para uma estimativa precisa da temperatura e do fluxo radiante medido (Rocha & Póvoas, 2017). É importante ressaltar que os materiais comumente utilizados na construção civil, como argamassa, pedra e concreto, possuem altos valores de emissividade, geralmente superiores a 0,8.

A emissividade pode ser determinada em campo por um método que consiste em colocar sobre a superfície do objeto a ser analisado, uma fita isolante de emissividade conhecida ($\epsilon = 0,95$). A temperatura da fita é medida pela termocâmara de acordo com este valor de emissividade. Altera-se então a emissividade introduzida no equipamento até que a temperatura da

superfície do objeto, sem a fita, registre a mesma temperatura observada com a fita. Realizando este processo encontra-se a emissividade da superfície do objeto a ser analisado (Viégas, 2015).

Para o cálculo da temperatura aparente refletida pode-se utilizar o método direto ou o método refletor (FLIR SYSTEMS, 2014). Por outro lado, quando é alterado o valor da temperatura refletida (TR) na câmera, nota-se que os valores da temperatura do objeto não sofrem alterações muito significativas. Por exemplo, se o operador realizar um teste com um objeto qualquer no mesmo local, sob as mesmas condições ambientais em que foi verificada a TR de 15°C, e utilizar nessa medição o valor da temperatura do ar, do dia da verificação, de 35°C como valor da TR, será observada uma variação de somente 1,2°C entre os dois resultados da temperatura média do objeto (Marinoski *et al.*, 2010). Com isso, um artifício para realizar um ajuste da TR durante medições em campo, é aplicar a esta variável o mesmo valor da temperatura do ar.

Barbosa (2014) afirma que, a atmosfera que existe entre a câmera termográfica e o objeto alvo tende a atenuar a radiação devido à absorção de gases e ao espelhamento de partículas. Em analogia, embora a atmosfera normalmente transmita muito bem a luz visível, alguns fatores como nevoeiro, nuvens, chuva e neve podem impedir a visualização de objetos distantes. O mesmo princípio aplica-se à radiação infravermelha, dessa forma, se nenhuma correção for aplicada, o erro associado à temperatura medida por termografia é proporcional à distância entre o termovisor e o objeto.

A distância entre o objeto e a termocâmera deve ser medida e inserida para compensar então o fato de parte da radiação emitida pelo objeto ser absorvida pela atmosfera. Outros dois parâmetros que devem ser medidos e inseridos na termocâmera são a umidade relativa do ar e a temperatura do ar, que podem ser medidos com o auxílio de um termohigrômetro digital (Patriota Junior *et al.*, 2020).

3. Metodologia

3.1 Caracterização da área de estudo

O local da realização dos ensaios foi a orla de Olinda-PE ao longo da Av. Ministro Paulo Freire, iniciando no encontro com a Rua do Farol. Tomando como marco inicial de medição o poste da orla próximo ao colégio Jussara Ferreira, seguindo as medições nos postes subsequentes ao longo da orla. A Figura 2 aponta o referencial geográfico onde foram realizados os ensaios, na orla de Olinda.

Figura 2 - Referencial geográfico do local dos ensaios em Olinda-PE.



Fonte: <https://maps.google.com.br>

O horário das medições realizadas foi entre às 14h e 15h. É importante ressaltar que o supracitado intervalo foi escolhido com base no estudo de Viégas (2015), onde foi verificado que após a realização das medições das 6:00 às 18:00, em três fachadas de edifícios em diferentes dias e com diferentes revestimentos que os melhores horários para medição nesta região são das 9h às 10h e das 14h às 15h.

Para o desenvolvimento deste estudo é importante situar o ambiente ensaiado a nível de corrosão. Devido à localização do ensaio ser na orla, os postes estão sujeitos a ataques por íons cloretos e Olinda é uma cidade fortemente urbanizada, indicando susceptibilidade também a carbonatação. Ou seja, as condições ambientais do local favorecem o desenvolvimento da corrosão, além de apresentar elevadas temperaturas e umidade relativa do ar próxima a condição ótima para o desenvolvimento da manifestação patológica (Casculo, 1997).

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), o ambiente dos ensaios tem classe de agressividade ambiental IV, ou seja, muito forte, com risco de deterioração elevada. A Figura 3 apresenta um dos postes analisados neste estudo, com corrosão aparente e mancha indicativa da manifestação patológica na tonalidade marrom.

Figura 3 - Corrosão em poste de concreto armado na orla de Olinda-PE.



Fonte: Autores.

3.2 Procedimento metodológico

Alguns procedimentos sequenciais foram realizados para a avaliação da corrosão de armaduras em postes de concreto armado. As etapas de execução neste estudo foram: visita à orla de Olinda para a análise visual de postes de concreto armado, visando à detecção ou não de corrosão visível; realização de relatório fotográfico e ensaio de termografia infravermelha em 10 postes da orla, no horário entre 14h e 15h, realizando, em cada poste, na face frontal (com ação direta dos respingos de névoa salina) e também na face oposta; Análise dos resultados através dos termogramas obtidos com o software FLIR Tools.

Vale ressaltar que a amostra de 10 postes não é a ideal estatisticamente para a análise, no entanto, durante a execução desse estudo, a câmera termográfica necessitou de manutenção, ficando indisponível para uso. Sabe-se também que, para realizar comparações entre medições temporalmente muito distantes, perde-se o parâmetro comparativo e avaliativo para a termografia infravermelha. Por isso, foi definido realizar o estudo com esta amostra de 10 postes.

O equipamento utilizado foi uma câmera termográfica, FLIR E-60 (Figura 4). Para sua utilização é necessário inserir o valor de emissividade do objeto, a temperatura ambiente, a umidade relativa e a distância de medição (Viégas, 2015). A câmera termográfica capta os raios infravermelhos e, utilizando os dados de entrada, apresenta como resposta a temperatura superficial do objeto analisado.

Figura 4 - Câmera termográfica, FLIR E-60.



Fonte: Autores.

A faixa de temperatura na qual o equipamento opera varia entre -20°C e 650°C . A câmera termográfica gera imagens e termogramas que apresentam as temperaturas superficiais através de cores. O aparelho possui lâmpada de LED, utilizada para iluminar ambientes escuros, e ponteiro laser, para marcar locais. A iluminação fornece detalhes para o aperfeiçoamento MSX (FLIR SYSTEMS, 2014). Outras características são apresentadas no Tabela 1.

Tabela 1 - Características do equipamento utilizado, FLIR E-60.

Modelo	FLIR E-60
Resolução IR	320 x 240 pixels
Sensibilidade Térmica	$< 0.05^{\circ}\text{C}$
Precisão	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%$ de leitura
Câmera de vídeo sem iluminação	3.1 MP
Peso	0,825 kg

Fonte: FLIR SYSTEMS (2014).

No que se refere aos parâmetros de entrada da termocâmera para a realização dos ensaios, a emissividade foi determinada conforme o método da fita isolante, anteriormente descrito (Viégas, 2015), para a temperatura aparente refletida,

foi utilizado o artifício do ajuste simplificado (Marinoski *et al.*, 2010), com a aproximação deste parâmetro com o valor idêntico ao da temperatura ambiente. Para este, assim como para a umidade relativa, foi utilizado um termo-higrômetro digital para medição (Figura 5).

Figura 5 - Termo-higrômetro digital.



Fonte: Autores.

A análise dos termogramas resultantes dos ensaios realizados foram desenvolvidas com o auxílio do software FLIR Tools e suas ferramentas acessórias de análises como as variações de paletas de cores, o uso de isotermas, fluxo de calor e a fusão de imagens digital e térmica.

4. Resultados e Discussões

Na análise dos ensaios, a princípio, é possível verificar que os produtos da corrosão que geram uma mancha marrom na parte externa do concreto conduzem mais calor, apresentando uma temperatura mais elevada que o concreto. Desta maneira, a procura pela ocorrência de corrosão está ligada à detecção de temperaturas possivelmente mais altas do que as verificadas na camada exterior. O ensaio mostrou também que uma temperatura elevada em trincas com relação ao concreto pode ser uma indicação da ocorrência de corrosão de armaduras, sendo esse conhecimento válido e aplicável, sobretudo, nos casos de corrosão por ataque de cloretos, uma vez que pites são formados. Neste caso, a utilização da termografia infravermelha pode ajudar a detectar a localização destes pites.

É importante ressaltar que, observando os termogramas, existem pontos com diferenças de temperatura. Mas, para uma mesma medição, em um mesmo poste, com os mesmos parâmetros e as mesmas condições climáticas, as diferenças na temperatura são indicativas de condições internas da estrutura, na maioria dos casos, manifestações patológicas. Sendo assim, pela reação corrosiva formar um produto expansivo e liberar calor, os pontos com valores de temperatura acima dos normais, podem representar corrosão, visto que nos postes analisados já era possível ver a corrosão visível.

Na análise dos termogramas obtidos nos ensaios realizados, foi possível observar dois padrões distintos de resultados. Sendo eles diferenciados de acordo com o nível de corrosão no qual os postes de concreto armado se encontravam.

Um dos padrões que foi verificado, apresentou-se em postes em que a corrosão visível era bastante inicial. A Figura 6 apresenta a imagem digital de um poste com este tipo de padrão e a Figura 7 representa o termograma do poste indicado na Figura 6.

Figura 6 – Imagem digital – Poste 03.



Fonte: Autores.

Figura 7 - Termograma – Poste 03.



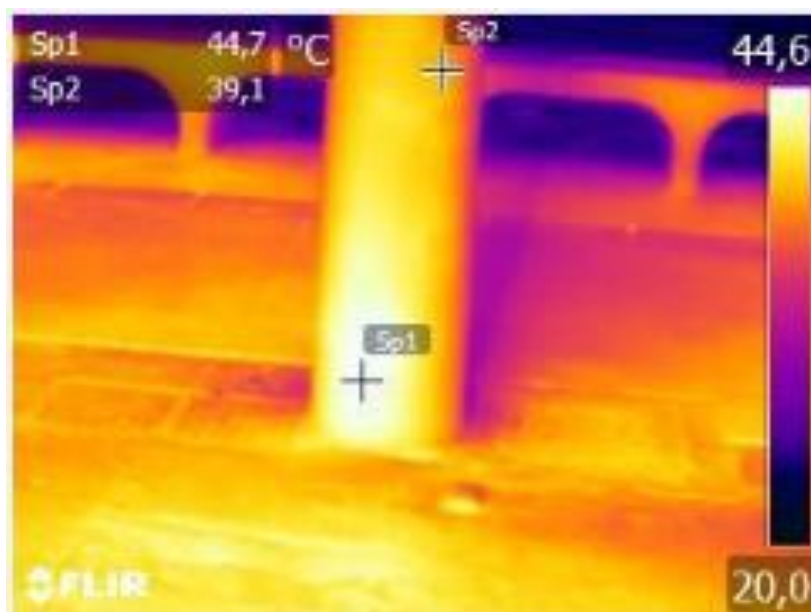
Fonte: Autores.

Analisando o termograma, apresentado na Figura 7, pode ser concluído que a diferença $\Delta T = 1,8^{\circ}\text{C}$ (Sp1-Sp2) pode indicar corrosão devido ao fenômeno de “lavagem” das chuvas que carregam os íons cloreto para a superfície. Essa análise leva em consideração o fato que a corrosão ocorre com os agentes agressivos avançando da superfície para o interior da estrutura.

O que foi verificado na Figura 7, a nível de análise de termogramas, assemelhou-se em postes cujo a corrosão era inicial, por isso foi considerado como um dos padrões observados.

É importante ressaltar a utilização do software FLIR Tools para análise dos termogramas. A Figura 8 representa a imagem térmica resultante de um dos postes e a Figura 9, a análise do fluxo de calor deste mesmo termograma, onde a área em vermelho, representa esse fluxo com as temperaturas maiores que nos demais pontos.

Figura 8 - Termograma – Poste 09.



Fonte: Autores

Figura 9 - Termograma – Poste 09 – Análise do fluxo de calor.



Fonte: Autores.

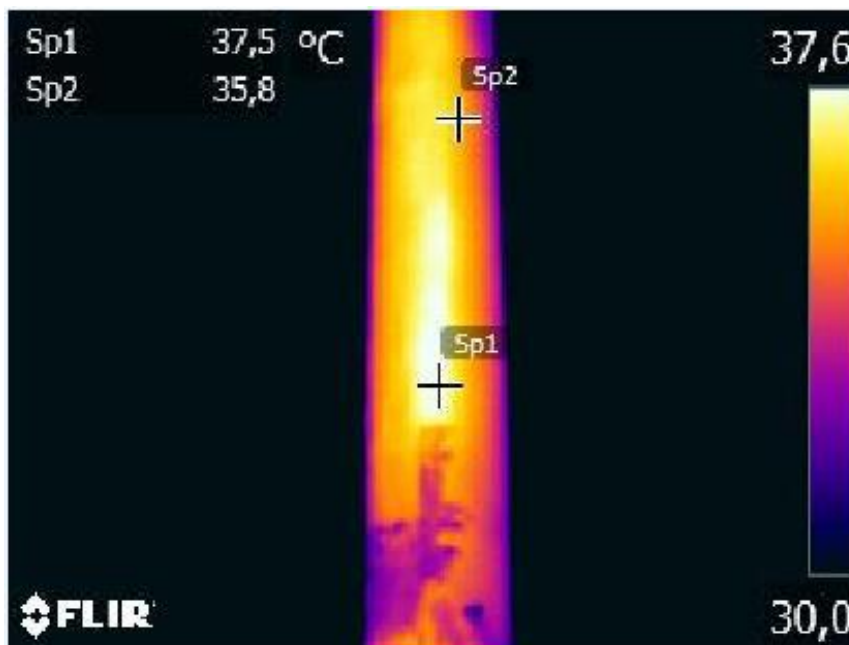
Outro padrão verificado na análise dos termogramas foi em postes cujo a corrosão já se apresentava de maneira significativa. A imagem digital de um poste com este tipo de padrão é apresentada na Figura 10. Nesses casos, a diferença de temperatura nas estruturas foi mais evidente e ainda mais conclusiva a nível de processo corrosivo, visto que, foi formado um alinhamento dos pontos com maiores temperaturas, justamente onde se encontram as armaduras corroídas dos postes de concreto armado, conforme o termograma representado na Figura 11.

Figura 10 – Imagem digital – Poste 08.



Fonte: Autores.

Figura 11 - Termograma – Poste 08.



Fonte: Autores.

Analisando o termograma, apresentado na Figura 11, é possível verificar a presença de dois pontos Sp1 e Sp2 praticamente alinhados, com temperaturas mais elevadas em relação aos outros pontos da estrutura e alinhados com a armadura do poste.

Este tipo de termograma visto na Figura 11, foi considerado um outro padrão neste estudo porque foi verificado de forma similar em outros postes com níveis de corrosão significativos de forma visual.

Realizando uma análise entre os dois padrões verificados, é possível notar que os termogramas que representam postes com corrosão pouco visível apresentam variações de temperatura menores e menos uniformemente distribuídas que os postes com a corrosão manifestada de forma significativa. Este fato é esperado e justificado porque quanto mais avançado o processo corrosivo maior é a diferença nos padrões das estruturas.

5. Conclusões

Ao final do estudo, o ensaio da termografia infravermelha, mostrou-se satisfatório na análise da corrosão em postes de concreto armado de forma não destrutiva e sem contato, como foi desejado na elaboração do objetivo da pesquisa.

Cabe ressaltar que seria interessante para este estudo poder complementar os ensaios de termografia realizados com outros ensaios para incorporação nas análises, como a aspersão do indicador fenolftaleína para confirmação de ação da profundidade da frente de carbonatação e também a aspersão do indicador nitrato de prata para indicar a presença excessiva de íons cloretos nos postes de concreto armado. No entanto, esses ensaios não foram realizados, tendo em vista que são semi-destrutivos e causariam danos ao patrimônio público da cidade de Olinda.

Os resultados do estudo mostraram através da análise dos termogramas que partes da estrutura estão corroídas, apresentando-se em dois padrões distintos de acordo com o estágio da manifestação patológica, quando inicialmente visível ou em estágio avançado.

Para trabalhos futuros, aconselha-se a adoção de uma amostra maior de estruturas para elevar a significância estatística das análises. Sugestiona-se também a realização dos ensaios de termografia infravermelha além da via pública à beira mar, podendo ser selecionada uma via paralela, para comparação dos níveis corrosivos das estruturas.

Referências

- C Aquino Rocha, J.; Silva, M.; Póvoas, Y. & Monteiro, E. (2017). Análise da Profundidade de Fissuras em Concreto com Termografia Infravermelha. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, 2(3), 58-65.
- Aslani, F. & Dehestani, M. (2020). Probabilistic impacts of corrosion on structural failure and performance limits of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 265, 120316.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118 (2014):* Projetos de estrutura de concreto - Procedimento. 2014.
- Barbosa, P. G. (2014). *Uma contribuição para o design do conforto: avaliação da difusividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto utilizando a termografia infravermelha* (Dissertação de Mestrado em Design, Universidade do Estado de Minas Gerais).
- Benítez, P.; Rodrigues, F.; Talukdar, S.; Gavilán, S.; Varum, H. & Spacone, E. (2019). Analysis of correlation between real degradation data and a carbonation model for concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 95, 247-259.
- Brique, S. K. (2016). *Emprego da termografia infravermelha no diagnóstico de falhas de aderência de peças cerâmicas utilizadas em fachadas de edifícios* (Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina).
- Burity Filho, R. L.; Luna, Y. H. D. M.; Lima Filho, M. R. F. & Athayde Júnior, G. B. (2021). Aplicação da termografia na identificação de infiltrações e tubulações para condução de água fria e água quente embutidas em alvenaria. *Research, Society and Development*, 10(8).
- Cascudo, O. (1997). *O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas*. Pini.
- Da Silva, W. P. A.; Lordsleem Júnior, A. C.; Ballesteros Ruiz, R. D. & Aquino Rocha, J. H. (2021) Inspection of pathological manifestations in buildings by using a thermal imaging camera integrated with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): a documental research. *Revista ALCONPAT*, 11(1), 123-139.

- Favretto, F.; Magalhães, F. C.; Guimarães, A. T. DA C.; Climent, M. A. & Real, M. DE V. (2021). Modelos de estimativa do grau de saturação do concreto a partir das variáveis ambientais aplicados à análise de confiabilidade de estruturas de concreto armado atacadas por íons cloreto. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26(3).
- Ferreira, P.; Meira, G.; Barbosa, D.; Carvalho, M.; & Andrade, J. (2017). Influência do grau de corrosão das armaduras na eficiência do método de realcalinização para tratamento de estruturas de concreto carbonatadas. *Holos*, 7, 69-80.
- FLIR SYSTEMS. (2014). *Manual do equipamento ThermaCAM® E320*.
- Garrido Vazquez, E.; Naked Haddad, A.; Linhares Qualharini, E.; Amaral Alves, L. & Amorim Féo, I. (2016). Pathologies in reinforced concrete structures, sustainable construction. In: Delgado J. (eds). *Sustainable Construction. Building Pathology and Rehabilitation*. Springer, Singapore, 213-228.
- Holst, G. C. (2000). *Common Sense approach to thermal imaging*. Winter Park (FL): JCD Publishing.H
- Incropera, F. P & Dewitt, D. P. (2003). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: John Wiley & Sons.
- INFRARED TRAINING CENTER – ITC. (2014). *Manual do usuário – Certificação Nível 1*.
- Lopes, M. H; Perez, S. B. S & Brito, J. N. (2019). Inspeção termográfica no antigo prédio DCTEF-USFJ. In: *IX COEN – Congresso de Engenharias da UFSJ – Interconexão*. Minas Gerais.
- Marinoski, D. L.; Souza, G. T. DE; Sangoi, J. M. & Lamberts, R. (2010) Utilização de Imagens em Infravermelho para Análise Térmica de Componentes Construtivos. In: *XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC*. Canela, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Nascimento, E, R, S. & Fontes, M, D, S. (2021). Patologias das estruturas de concreto armado. *Revista Fatec de Tecnologia e Ciências*, 6(1).
- Patriota Júnior, A.; Batista, P. & Póvoas, Y. (2020) Verificação de Descolamento Cerâmico de Fachada por Meio da Termografia Infravermelha. *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, 5(3), 10-16.
- Rocha, J. H. A. & Póvoas, Y. V. (2017). A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: Revisão do estado da arte. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 200-214.
- 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.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of Steel in Concrete*. Swedish Cement and Concrete Reserarch Institute, Stockhom.
- Usamentiaga, R.; Venegas, P.; Guerediaga, J.; Vega, L.; Molleda, J. & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7), 12305-12348.
- Viégas, D. J. A. (2015). *Utilização de Termografia Infravermelha em Fachadas Para Verificação de Descolamento de Revestimento* (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife – PE)
- Vogler, N.; Lindemann, M.; Drabetzki, P. & Kühne, H. C. (2020). Alternative pH-indicators for determination of carbonation depth on cement-based concretes. *Cement and Concrete Composites*, 109, 103565.
- Zomorodian, A.; Bagonyi, R. & Al-Tabbaa, A. (2021). The efficiency of eco-friendly corrosion inhibitors in protecting steel reinforcement. *Journal of Building Engineering*, 38, 102171.