

Critérios para identificação e diagnóstico de anomalias em fachadas cerâmicas através da termografia infravermelha quantitativa

Criteria for identification and diagnosis of anomalies in ceramic facades through quantitative infrared thermography

Elton Bauer 

Raynnara Ribeiro Dias Lucenas 

Elier Pavon 

Resumo

A termografia na inspeção de fachadas de edifícios permite a avaliação de anomalias em tempo real e sem contato. Entretanto, é necessário desenvolver critérios para a análise quantitativa das anomalias, para melhorar o mapeamento e a análise da gravidade. Para determinar e validar alguns desses critérios, avaliou-se neste estudo a ocorrência de descolamento cerâmico em um edifício por meio de inspeção termográfica. Foram inspecionadas as orientações de fachada norte, sul, leste e oeste em revestimento cerâmico. Os termogramas foram avaliados mediante o cálculo dos parâmetros Delta-T e Delta-Tcor. Avaliou-se também a influência das diferentes condições de fluxo de calor nos ciclos de aquecimento e arrefecimento quanto à capacidade de detecção e avaliação das anomalias. Os resultados apontam que o fluxo de calor influencia diretamente na capacidade de detecção e que orientações com maior incidência de radiação apresentam maior facilidade de detecção. Os resultados de Delta-T e Delta-Tcor, avaliados de forma conjunta, apresentam convergências, o que indica que o Delta-Tcor é um critério de análise satisfatório, aplicável a outros edifícios com diferentes condições de fluxo de calor.

Palavras-chave: Termografia. Fachada. Fluxo de calor. Descolamento cerâmico.

Abstract

Thermography in the inspection of building facades allows the evaluation of anomalies in real time and without contact. However, it is necessary to develop criteria for the quantitative analysis of anomalies, to improve the mapping and analysis of severity. To determine and validate some of these criteria, this study evaluated the occurrence of ceramic detachment in a building through thermographic inspection. The north, south, east and west facade orientations in ceramic coating were inspected. The thermograms were evaluated by calculating the Delta-T and Delta-Tcor parameters. The influence of different heat flow conditions on the heating and cooling cycles was also evaluated in terms of the ability to detect and evaluate anomalies. The results indicate that the heat flux directly influences the detection capacity and that orientations with a higher incidence of radiation are easier to detect. The Delta-T and Delta-Tcor results, evaluated together, show convergence, which indicates that the Delta-Tcor is a satisfactory analysis criterion, applicable to other buildings with different heat flux conditions.

Keywords: Thermography. Facade. Heat flow. Ceramic detachment.

¹Elton Bauer

¹Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

²Raynnara Ribeiro Dias Lucenas

²Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

³Elier Pavon

³Universidade Federal do Oeste da
Bahia
Barreiras - BA - Brasil

Recebido em 11/08/22

Aceito em 02/10/22

Introdução

Os ensaios não destrutivos são empregados na inspeção de materiais, equipamentos e edifícios para dar precisão às informações obtidas e preservar a integridade dos objetos avaliados (KYLILI *et al.*, 2014; KIRIMTAT; KREJCAR, 2018). Nas inspeções de fachadas de edifícios, podem-se utilizar diferentes tecnologias para investigar o nível de degradação e auxiliar na previsão de vida útil do sistema, entre as quais se encontra a termografia infravermelha (DULING; HORAK; CLOETE, 2008; SOUZA *et al.*, 2018a, 2018b, 2018c). A termografia infravermelha se dedica à aquisição e ao processamento de informações térmicas por meio do emprego de dispositivos de medição sem contato e em tempo real. Essa técnica é empregada, com certa facilidade e rapidez, na obtenção dos dados de temperatura em uma imagem. Permite a análise no objeto-alvo e sua vizinhança, bem como o monitoramento do elemento investigado (MALDAGUE, 2001).

A utilização da termografia infravermelha, como ensaio não destrutivo, é aplicada por permitir o monitoramento da distribuição de temperaturas de determinada superfície à medida que o calor se propaga no espaço e à medida que evolui no tempo. As patologias são avaliadas considerando-se a amplitude de temperatura de anomalias térmicas fora do padrão de distribuição esperado (VAVILOV, 2014).

A termografia pode ser empregada como ferramenta na inspeção de edifícios, para o mapeamento de danos de fachadas, pois permite a observação de anomalias não detectadas em inspeção visual, e ainda confere maior precisão às avaliações de grau de dano e de áreas degradadas. A câmera termográfica realiza a mensuração da radiação infravermelha emitida pelo objeto-alvo, que é convertida em sinal elétrico, transformada em níveis visíveis de imagem. Os termogramas representam as temperaturas nas superfícies do objeto-alvo, e cada cor representa uma faixa de temperaturas (MALDAGUE, 2001; MADRUGA *et al.*, 2010; BAUER *et al.*, 2014; SILVA, 2014; PANT *et al.*, 2021; ABNT, 2021).

Na identificação das anomalias, a termografia é classificada quanto à abordagem do estímulo térmico empregado de forma ativa ou passiva (MALDAGUE, 2001). A termografia ativa consiste na utilização de estímulo térmico artificial e controlado, sendo mais empregada em estudos realizados em laboratório (BAUER *et al.*, 2016a; HUH *et al.*, 2018). Na abordagem passiva, utilizam-se as diferenças de temperaturas, oriundas principalmente da incidência solar, entre o objeto-alvo e o meio envolvente. O emprego da termografia passiva em fachadas é devido tanto pela extensa área a monitorar, como pela dificuldade ou impossibilidade de aplicar algum estímulo térmico uniforme. É possível também uma abordagem quantitativa na termografia passiva, desde que se desenvolvam critérios para análise em diferentes condições de fluxo térmico na fachada (BARREIRA; ALMEIDA; MOREIRA, 2017; BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018). As anomalias encontradas com maior frequência nas fachadas podem ser identificadas em inspeções termográficas passivas (BAUER; PAVON, 2015; BAUER *et al.*, 2016b).

Avaliações em campo estão sempre sujeitas à influência das características climatológicas, além de outras variáveis que condicionam o fluxo térmico, as quais devem ser consideradas no momento da inspeção e da análise quantitativa dos termogramas (ABNT, 2021). O fluxo térmico ou fluxo de calor, que consiste na transferência de calor que ocorre através da fachada, é classificado em direto, quando ocorre do exterior do edifício para o interior, e inverso, quando ocorre do interior do edifício para o exterior (PAVON, 2017). Alterações na incidência solar e na temperatura ambiente, que são comuns no transcorrer do dia, levam a condições de análise distintas, o que exige expertise do termografista. É fundamental a definição de protocolos e de rotinas de análise que permitam análises conclusivas, em diferentes condições de fluxo térmico. Essas alterações no fluxo térmico também variam em função da incidência solar, para cada orientação cardinal das fachadas.

Os termogramas podem ser analisados de forma qualitativa ou quantitativa. Quando as imagens são avaliadas apenas de forma visual, com identificação de pontos quentes e pontos frios nos termogramas, a análise é considerada qualitativa. Nesse caso, são necessários padrões de falha para identificação das anomalias. A análise quantitativa é aplicada quando, além de identificar e localizar uma anomalia, há o objetivo de classificar e avaliar o grau de dano. Na avaliação quantitativa são determinados os parâmetros termográficos (emissividade e temperatura aparente refletida) que conferem maior precisão aos dados de temperatura do objeto-alvo (MALDAGUE, 2001; KIRIMTAT; KREJCAR, 2018).

Com base no comportamento das temperaturas nos termogramas, é possível avaliar a presença de anomalias nas fachadas como descolamentos cerâmicos, fissuras e umidade (EDIS; FLORES-COLEN; BRITO, 2015; BAUER; PAVON, 2016; BARREIRA; ALMEIDA; MOREIRA, 2017; BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018; GARRIDO *et al.*, 2020; BARREIRA *et al.*, 2020). Também se podem investigar avaliações de eficiência energética (KAYMAZ, 2019; GALADANCI *et al.*, 2020; GIL-VALVERDE *et al.*, 2021), sistemas de isolamento de edificações (NASIR; HASSAN, 2020; NERMIN *et al.*, 2021) e presença de defeitos e elementos ocultos (LAI; LEE; POON, 2015; MAC *et al.*, 2019; PULITI; MONTAGGIOLI; SABATO, 2021).

Avaliação de anomalias

Quando da avaliação de descolamentos cerâmicos em diferentes condições de fluxo térmico, Bauer e Pavón (2015) identificaram qualitativamente a presença de descolamento cerâmico na fachada de um edifício em condições de fluxo térmico direto e inverso.

No estudo da influência das dimensões de descolamentos em revestimentos cerâmicos, na avaliação termográfica de protótipos de parede, Tanaka e Pavón (2021) avaliaram defeitos previamente localizados no protótipo em ambiente externo e em diferentes orientações cardeais. Os resultados obtidos apontaram que defeitos com maiores áreas apresentam maior probabilidade de serem detectados, facilitando a investigação de sistemas de revestimento de fachadas.

Na avaliação das larguras de fissuras em uma parede de concreto de uma casa histórica, por meio da termografia infravermelha, Su (2020) investigou a detecção de fissuras com base no processamento dos termogramas e na análise estatística desse processamento.

A investigação de Bauer, Milhomem e Aidar (2018) empregou a termografia passiva quantitativa para determinar o grau de dano da fissura e, em conjunto, a simulação higrótérmica, como ferramenta para auxiliar na compreensão do fluxo de calor. Os resultados apontaram a efetividade da inspeção termográfica na determinação do grau de dano, e da simulação higrótérmica, como uma pré-etapa da inspeção, auxiliando na determinação do momento de realização da investigação.

Na investigação de delaminações em pontes de concreto, por meio de termografia passiva, Mac *et al.* (2019) avaliaram a influência da relação largura-profundidade na detecção de defeitos. Observa-se nesse estudo que, para inspeções realizadas durante o dia, relações largura-profundidade maiores ou iguais a 1,9 são detectáveis, e, no período da noite, a referência é de relações iguais ou superiores a 2,5. Neste período, a detecção é mais crítica, com detecção mais simplificada para maiores delaminações localizadas em menores profundidades.

Para a adequada aplicação em campo da termografia para a inspeção de fachadas, é necessário desenvolver critérios quantitativos de análise. O objetivo deste estudo de campo foi avaliar e definir esses critérios, de modo a consolidar uma rotina de análise para as principais condições de captura dos termogramas, associados a diferentes condições de fluxo de calor na fachada.

A detecção e a avaliação de anomalias são possíveis devido à perturbação gerada, localmente, no fluxo térmico. A maior facilidade ou dificuldade do transporte de calor, ocasionado pela presença de anomalia, gera comportamentos distintos das temperaturas, que são captados na superfície no termograma. O emprego da temperatura como critério de investigação de anomalias é utilizado, tanto de forma qualitativa como quantitativa, nas etapas de localização, classificação, avaliação e gravidade dos danos (KROMANIS; KRIPAKARAN, 2014, 2021; MURPHY; YARNOLD, 2018).

A avaliação termográfica de anomalias em revestimentos de fachadas é usual em abordagens qualitativas, em que se busca somente identificar regiões com anomalias. O emprego de abordagens quantitativas, quando se busca detectar e avaliar as anomalias, exige a definição de critérios de análise que padronizem as análises e facilitem a comparação entre diferentes anomalias, expostas a condições de fluxo de calor distintas (EDIS; FLORES-COLEN; BRITO, 2014; BARREIRA; ALMEIDA; MOREIRA, 2017; KAYMAZ, 2019). Como a inspeção de edifícios não emprega estímulos térmicos artificiais, as condições variáveis ao longo do dia podem gerar circunstâncias que não são as ideais e que podem impossibilitar a identificação e a avaliação das anomalias.

Metodologia

A investigação consiste num estudo de campo desenvolvido num edifício selecionado e analisado detalhadamente quanto a suas condições de degradação, e teve como principal objetivo desenvolver e propor critérios de análise quantitativa que possam ser padronizados para as inspeções termográficas de fachada.

Amostra de estudo

O edifício investigado está localizado em Brasília, Brasil, e é composto de seis pavimentos e sistema construtivo em estrutura de concreto armado e vedação em blocos cerâmicos. O revestimento das fachadas do edifício, apresentado na Figura 1, consiste em placas cerâmicas. O edifício tem 45 anos de idade, está sujeito ao processo de envelhecimento natural resultante da interação com o meio envolvente e agentes de degradação, e se apresenta em condições de uso (ZANONI, 2015).

A investigação aborda a inspeção termográfica das fachadas norte, sul, leste e oeste. Essas orientações recebem incidência diferenciada de radiação solar ao longo do dia, o que leva a distintos comportamentos de aquecimento e resfriamento dos elementos. Como a inspeção termográfica é passiva, essas evoluções determinaram a resposta observada nos termogramas. Para os edifícios de Brasília, a fachada norte está submetida a maior incidência de radiação ao ano, seguida das orientações leste e oeste, nesta ordem (NASCIMENTO *et al.*, 2016; BAUER *et al.*, 2020). Para o estudo, foi selecionada uma anomalia para cada orientação de fachada.

A localidade de Brasília, segundo a classificação de Köppen, apresenta clima tropical (A) com inverno seco (W) (RUBEL; KOTTEK, 2010; MAZZEO *et al.*, 2020). A inspeção termográfica do edifício foi realizada no mês de março, na estação de outono. A evolução das temperaturas superficiais, obtidas por simulação higrômica ao longo do dia, pode ser observada para as diferentes orientações, conforme apresentado na Figura 2.

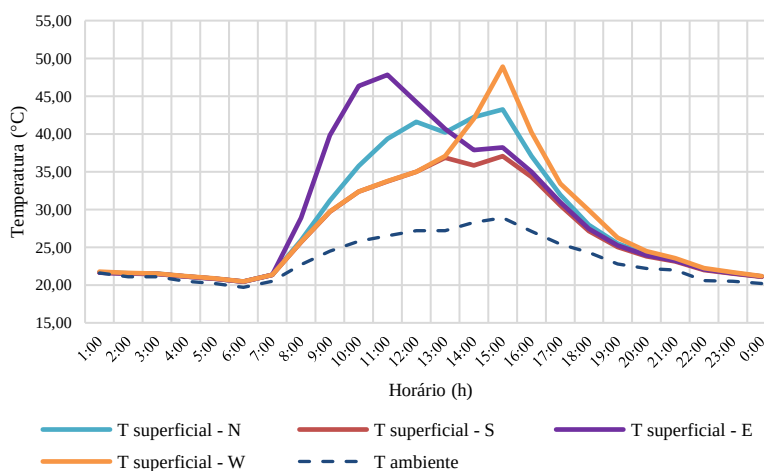
As temperaturas superficiais são influenciadas não apenas pela incidência de radiação solar, mas também pelas variações na temperatura ambiente, que auxilia na compreensão da dinâmica das trocas de calor nas fachadas. Sob incidência da radiação solar, a temperatura superficial se incrementa ao longo do dia, alcançando seu valor máximo por volta das 15h para todas as orientações, exceto a orientação leste, que apresenta valor máximo por volta das 11h. Depois disso, ocorre um declínio gradativo das temperaturas.

Figura 1 - Imagens digitais das orientações cardeais de fachada (a) norte e (b) leste



Figura 2 - Temperaturas superficiais e temperatura ambiente

Perfil diário de temperatura



Na investigação termográfica passiva, as variações de temperatura durante o dia modificam os fluxos térmicos que influem na detecção das anomalias. O estudo da dinâmica do fluxo de calor ao longo do tempo, nas diferentes orientações de fachadas, é associado às condições de identificação e avaliação de anomalias térmicas pela termografia (PAVON, 2017; AIDAR, 2019). Na abordagem passiva, o fluxo de calor e as temperaturas superficiais variam de forma contínua e dinâmica. A detecção das anomalias precisa levar em consideração essas condições não controladas, que alteram o padrão de detecção e avaliação para cada situação.

A simulação higrótérmica realizada por meio do uso do software WUFI Pro 5.3® (Wärme-Und Feuchtetransport Institutionär) permite a avaliação do comportamento higrótérmico da envoltória do edifício com base nos requisitos e critérios da norma EN 15026 (DEUTSCHES..., 2007). O resultado da simulação fornece dados horários de temperaturas superficiais e entre camadas do sistema. A simulação pode ser dividida em três etapas. A primeira consiste na caracterização do edifício, clima e elemento construtivo a ser simulado. A segunda etapa é referente ao processamento da simulação e obtenção dos dados de saída, e a última corresponde ao tratamento e análise dos dados de temperatura (superficial, interna, ambiente) do sistema investigado.

O clima exterior do edifício é definido segundo o arquivo do ano meteorológico do tipo TMY (*typical meteorological year*), da base EPW/ANTAC, composto de dados climáticos horários, totalizando 8.760 dados para 1 ano. O arquivo climático de Brasília empregado tem como base a variável temperatura e apresenta várias grandezas, tais como velocidade de vento, precipitação e radiação (RORIZ, 2012; ZANONI, 2015; EYE *et al.*, 2017).

Os dados obtidos da simulação permitem associar os comportamentos da simulação com os dados investigados nos termogramas. A análise busca evidenciar a evolução do fluxo de calor por meio da determinação do gradiente de temperaturas (G_{Temp}), conforme a Equação 1. O G_{Temp} é associado diretamente ao fluxo de calor que atravessa o sistema, na região onde geralmente se apresentam defeitos investigados com a inspeção termográfica. Pelo gradiente, pode-se caracterizar o fluxo de calor, seja de forma direta (de fora para dentro do edifício, no aquecimento), seja de forma inversa (de dentro para fora do edifício, no arrefecimento), em qualquer momento do dia (PAVON, 2017).

$$G_{Temp} = T_{sprev} - T_{bc}, \quad \text{Eq. 1}$$

onde:

G_{Temp} : gradiente de temperaturas (°C);

T_{sprev} : temperatura da superfície do revestimento cerâmico (°C); e

T_{bc} : temperatura da interface entre bloco cerâmico e sistema de revestimento (°C).

Contrastes termográficos

Diferentes formas de análise são aplicadas para auxiliar na interpretação e avaliação dos termogramas. Diversas pesquisas foram desenvolvidas utilizando funções de contraste (BAUER *et al.*, 2016; HUH *et al.*, 2018), representação gráfica (LAI *et al.*, 2010; MAC *et al.*, 2019), análise de componentes principais (MILOVANOVIĆ; GASI; GUMBAREVIC, 2020; EBRAHIMI *et al.*, 2021), fatoração de matriz negativa (EDIS; FLORES-COLEN; BRITO, 2014), algoritmos para detecção automática de anomalias (GARRIDO *et al.*, 2019) e ferramentas matemáticas, tais como simulações numéricas (SFARRA *et al.*, 2017), entre outros.

Essas metodologias permitem maior nível de caracterização das anomalias, automatizam o processo de análise dos termogramas e minimizam a probabilidade de erros de análise. Porém, ressalta-se que, para inspeções em campo de grandes elementos, várias dessas técnicas não são aplicáveis. Isso ocorre devido à variabilidade dos resultados em análise (variações contínuas dos agentes climáticos, radiação e temperaturas) e pelo elevado custo da inspeção, uma vez que o equipamento necessita de várias imagens, no decorrer do dia, para uma análise conclusiva. Embora existam técnicas de análise termográfica muito precisas e robustas, quando se faz a inspeção da fachada, se tem o objetivo de uma avaliação rápida e com o menor custo associado. Essa abordagem é pouco explorada nas pesquisas avançadas de termografia, sendo necessário estabelecer critérios práticos que viabilizem a termografia passiva quantitativa para a inspeção de fachadas.

As funções de contraste são os principais parâmetros utilizados nas análises. Maldague (2001), em suas investigações, utiliza as funções de contraste para avaliar a visibilidade do defeito, melhorar a qualidade da imagem e identificar e classificar os defeitos com precisão. Entre as funções apresentadas por Maldague (2001) está o contraste absoluto, considerado o mais aplicado nos estudos na área de termografia infravermelha (CERDEIRA *et al.*, 2011; FREITAS; FREITAS; BARREIRA, 2014; BAUER *et al.*, 2016a; HUH *et al.*, 2018).

O contraste absoluto ou Delta-T avalia a diferença de temperatura superficial entre a anomalia e a região vizinha sem anomalia, conforme a Equação 2. Pode-se afirmar que o contraste absoluto é um dos principais parâmetros empregados na detecção de descolamento cerâmico nas fachadas (MALDAGUE, 2001; BAUER; PAVON, 2015; EDIS; FLORES-COLEN; BRITO, 2015; BAUER *et al.*, 2016a).

$$C^a(t) = T_{def}(t) - T_s(t), \quad \text{Eq. 2}$$

onde:

$C^a(t)$: contraste absoluto e diferença de temperatura no instante de tempo t ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{def}(t)$: temperatura do defeito no instante de tempo t ($^{\circ}\text{C}$); e

$T_s(t)$: temperatura da superfície sem defeito no instante de tempo t ($^{\circ}\text{C}$).

O *running contrast* proposto por Maldague (2001) é obtido dividindo-se o contraste absoluto pela temperatura da região sem defeito, conforme apresenta a Equação 3. Como o contraste absoluto varia diretamente com a variação de temperatura da superfície, o objetivo é obter um indicador que seja corrigido em relação a essas variações (BAUER *et al.*, 2016a). O contraste corrido, que consiste na correção do contraste absoluto em função de um parâmetro comum para todas as anomalias, permite a comparação entre anomalias submetidas a diferentes condições de fluxo térmico. A Equação 3 apresenta esse parâmetro (MALDAGUE, 2001).

$$C^r(t) = \frac{C^a(t)}{T_s(t)}, \quad \text{Eq. 3}$$

onde:

$C^r(t)$: contraste corrido (*running contrast*);

$C^a(t)$: contraste absoluto; e

$T_s(t)$: temperatura da superfície de referência no tempo t ($^{\circ}\text{C}$).

Análise dos termogramas e temperaturas

O termograma é a representação gráfica da imagem do alvo e permite a determinação dos contrastes. Cada pixel do termograma corresponde a uma posição em coordenadas (x,y) de temperaturas do objeto-alvo.

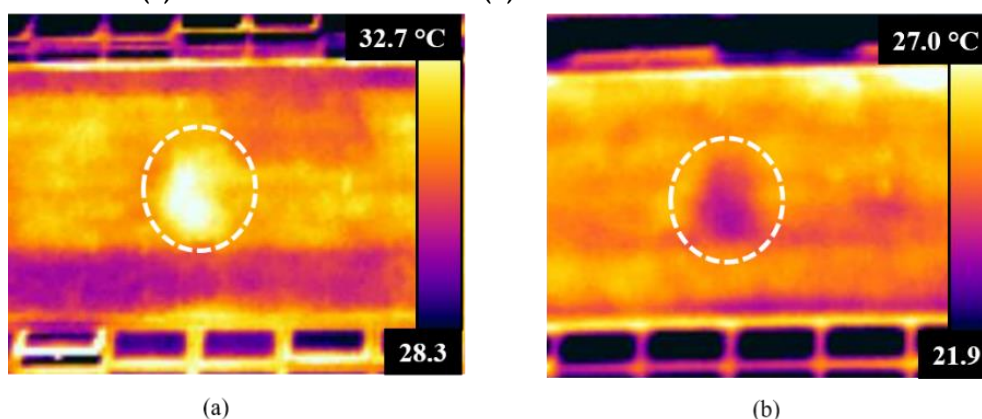
Na inspeção termográfica, busca-se efetuar somente uma captura de imagens que seja adequada para as análises. Obviamente, ao se trabalhar com termografia passiva, as condições para a tomada das imagens devem ser muito bem definidas. A inspeção precisa ser realizada com agilidade e rapidez, buscando intervalos de tempo que permitam que toda a fachada esteja exposta a similares condições climáticas no momento da captura do termograma, com o intuito de ter o mesmo referencial de análise. A investigação de anomalias em fachadas pode ser realizada com a aplicação de ferramentas mais simplificadas, como os contrastes absoluto e corrido (EDIS; FLORES-COLEN; BRITO, 2013; PAVON, 2017; PEREIRA; BRITO; SILVESTRE, 2020).

A principal dificuldade na investigação passiva de anomalias se relaciona com a determinação das condições de fluxo térmico mais adequadas para a obtenção dos termogramas (EDIS; FLORES-COLEN; BRITO, 2013; BAUER *et al.*, 2016b). Como o fluxo térmico nessas condições não é controlado, a variação de horário da inspeção (dia ou noite) gera alterações nas temperaturas do termograma, o que exige cuidados do termografista nas análises e impõe a necessidade de uma definição de parâmetros de análise quantitativa que auxiliem na padronização e no aumento da precisão dos resultados de Delta-T obtidos.

Inspeção termográfica da fachada

A análise da evolução das temperaturas superficiais e dos gradientes de temperatura (Equação 1) fornece indicações úteis para auxiliar na definição das condições de captura dos termogramas. Busca-se investigar a evolução dos contrastes termográficos, identificando condições ideais para as análises, bem como situações em que as análises se alteram, quer pela inversão do sentido, quer pela redução do fluxo de calor. Da análise das temperaturas superficiais obtidas na simulação higrótérmica, são definidos os momentos da inspeção. Os ciclos de aquecimento e arrefecimento são determinados em função da temperatura ambiente. São considerados o ciclo de aquecimento, que ocorre no período da manhã (das 7h40 às 10h40), e o de arrefecimento, que ocorre no período da tarde e noite (das 16h50 às 20h).

Figura 3 - Anomalia (a) sob fluxo de calor direto e (b) sob fluxo de calor inverso



A investigação desses ciclos justifica-se devido ao fato de o fluxo de calor influenciar na visualização da anomalia, favorecendo ou dificultando sua detecção e avaliação. Em relação ao sentido do fluxo, a Figura 3 exemplifica o comportamento, pois, para o fluxo direto, a região da anomalia é identificada como a de maior temperatura (Figura 3a), e, para o fluxo inverso, a anomalia já é visualizada como a de menor temperatura (Figura 3b). Ao observar o comportamento das temperaturas nesses dois momentos, é possível caracterizar a anomalia e avaliar se é possível a detecção em diferentes condições de temperaturas.

Segundo Pavon (2017), a definição dos horários de inspeção, no momento de aquecimento, é realizada com base no gradiente de temperatura. Os valores superiores a 0,6 °C permitem a identificação dos descolamentos cerâmicos. Para o arrefecimento, o gradiente de temperatura já necessita ser inferior a -2,5 °C. Identificou-se que as fachadas norte e leste tiveram forte incremento de temperaturas superficiais pela manhã (Figura 2). A fachada oeste teve seu pico de temperatura pela tarde, por volta das 15h (Figura 2). A fachada sul, que não recebeu radiação direta no dia de análise, acompanha a tendência da evolução da temperatura ambiente com pico entre 14h e 15h. A partir dessa análise se propõem os horários de inspeção das 7h40, 8h30, 9h40, 10h40, 16h50, 17h30, 18h20, 19h10 e 20h.

O código utilizado para a identificação das anomalias inspecionadas são Ad(N) para a orientação norte, Ad(S) para a fachada sul e Ad(E) e Ad(W) para as orientações leste e oeste respectivamente. Embora a fachada oeste receba a incidência da radiação no período da tarde, as inspeções a partir das 16h50 já contemplam a fase de arrefecimento, com queda das temperaturas superficiais.

Alguns parâmetros essenciais são determinados, sendo os climáticos temperatura ambiente e umidade relativa do ar, através do psicrômetro Extech MO297 com termômetro acoplado. A temperatura aparente refletida consiste na radiação emitida por objetos vizinhos sobre o objeto-alvo, que, somada a sua própria radiação, pode gerar erros nas medições de temperatura, por não ser compensada, sendo obtida através do método do papel de alumínio corrugado, apresentado na E1862 (AMERICAN..., 2014a). Também é definida a emissividade do revestimento cerâmico, parâmetro essencial, pois caracteriza a eficiência de emissão de radiação de certa superfície, sendo determinada pelo método da fita preta, segundo a E1933 (AMERICAN..., 2014b). Na inspeção, é utilizada uma câmera infravermelha modelo FLIR T400, com faixa de temperatura variando de 20 °C a 120 °C, com precisão de 2%, resolução de 320x240 pixels, faixa espectral de 7,5 µm a 13 µm. A lente empregada é de 15 graus, resultando em IFOV de 0,820 mrad.

Temperaturas avaliadas pelos termogramas

Os contrastes são calculados tomando por base as zonas com e sem presença anomalias. Assim, define-se a temperatura de referência sem anomalia (T_{SAref}) e a temperatura na superfície da anomalia (T_{CA}). Para as análises dos termogramas, utiliza-se o software FLIR Tools nas análises qualitativas e quantitativas, com o qual é realizada a mensuração das temperaturas para detecção, localização e avaliação das anomalias (KROMANIS; KRIPAKARAN, 2021).

A identificação das anomalias é feita inicialmente por uma varredura qualitativa no termograma, onde se identifica a região mais quente ou mais fria dependendo do sentido do fluxo de calor. Como exemplifica a Figura 4, que representa a zona de estudo, a Figura 4a mostra que é possível identificar a região da anomalia. A anomalia é então circunscrita por um retângulo (Figura 4b), e os dados de temperatura dos pixels são exportados para uma planilha. Estabelece-se que a zona de estudo é uma anomalia se a amplitude entre as

temperaturas máxima e mínima dessa região for superior a 2 °C. Deve ser colocado que o retângulo é posicionado nas bordas da anomalia, e todos os pixels da área são analisados.

A temperatura da anomalia (T_{CA}) é determinada ao se traçar um retângulo sobre a anomalia, conforme a Figura 4b. Os dados de temperatura dos pixels dessa área são exportados para uma planilha e se toma o valor da mediana como T_{CA} para o caso do fluxo direto e do fluxo inverso. Diversos estudos utilizam o perfil de temperatura (Figura 4c) sobre zonas com defeito para observar o comportamento de distribuição das temperaturas e caracterizar o defeito em função do contraste (Delta-T) (LAI *et al.*, 2010; LAI; LEE; POON, 2015; HUH *et al.*, 2018).

O critério para determinação da zona sem anomalia é que esta apresente uniformidade no comportamento de distribuição das temperaturas e aponte amplitude inferior a 2 °C. Essa zona também deve ser próxima à anomalia (menos de 0,5 m). A quantificação é feita pela ferramenta “área” no software FLIR Tools, sendo obtidas temperaturas para cada pixel, que são tratadas removendo-se *outliers*, usando a técnica do intervalo interquartil. Emprega-se a mediana como temperatura de referência (T_{SAref}) para a determinação dessa variável.

Contrastes termográficos aplicados

O cálculo do Delta T é apresentado na Equação 4, sendo determinado para cada anomalia e para cada horário (tempo). Conforme o sentido do fluxo de calor, o Delta-T pode ser positivo ou negativo, sendo determinado conforme mostra a Equação 4.

$$\Delta T(t) = T_{CA}(t) - T_{SAref}(t), \quad \text{Eq. 4}$$

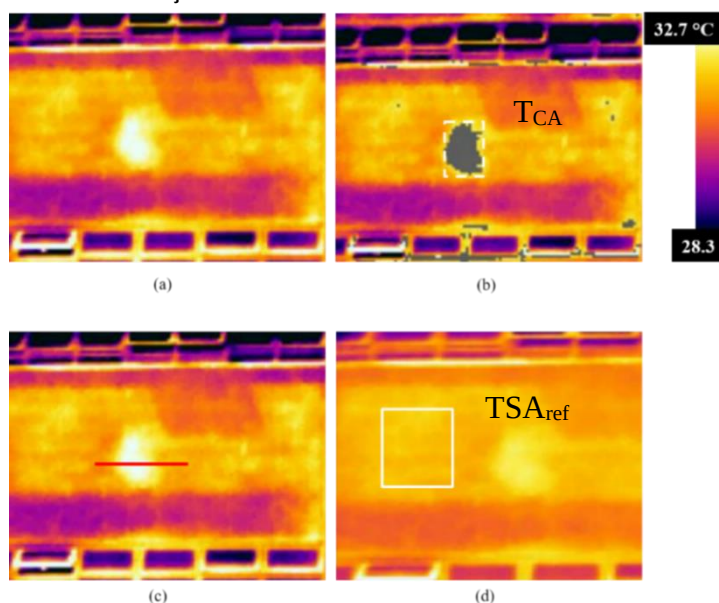
onde:

$\Delta T(t)$: contraste absoluto no instante de tempo t (°C);

$T_{CA}(t)$: temperatura do defeito no instante de tempo t (°C); e

$T_{SAref}(t)$: temperatura da superfície sem defeito no instante de tempo t (°C).

Figura 4 - Zonas sem anomalia e com anomalia no fluxo direto - (a) anomalia Ad (N), (b) zona de determinação da T_{CA} , (c) perfil de temperatura traçado sobre a anomalia para determinação da dimensão e (d) zona de determinação da T_{SAref}



O Delta-T é dinâmico, aumentando ou diminuindo em razão da variação do fluxo de calor. Com isso, a identificação diretamente pelo Delta-T pode não ser a mesma para fluxos de calor de magnitude e direção distintas. Buscando balizar o contraste para todas as avaliações (horários), propõe-se a aplicação do *running contrast*, conforme a Equação 3, obtido dividindo-se o Delta-T pela temperatura da região sem anomalias e é definido como Delta_{Tcor}, conforme a Equação 5.

$$\Delta T_{cor}(t) = \frac{\Delta T(t)}{T_{SRef}(t)}, \quad \text{Eq. 5}$$

onde:

Delta_{Tcor}(t): contraste corrigido;

Delta_T(t): contraste absoluto (°C); e

T_{SRef}(t): temperatura da zona sem anomalia no instante t (°C).

Resultados e discussões

Delta-T

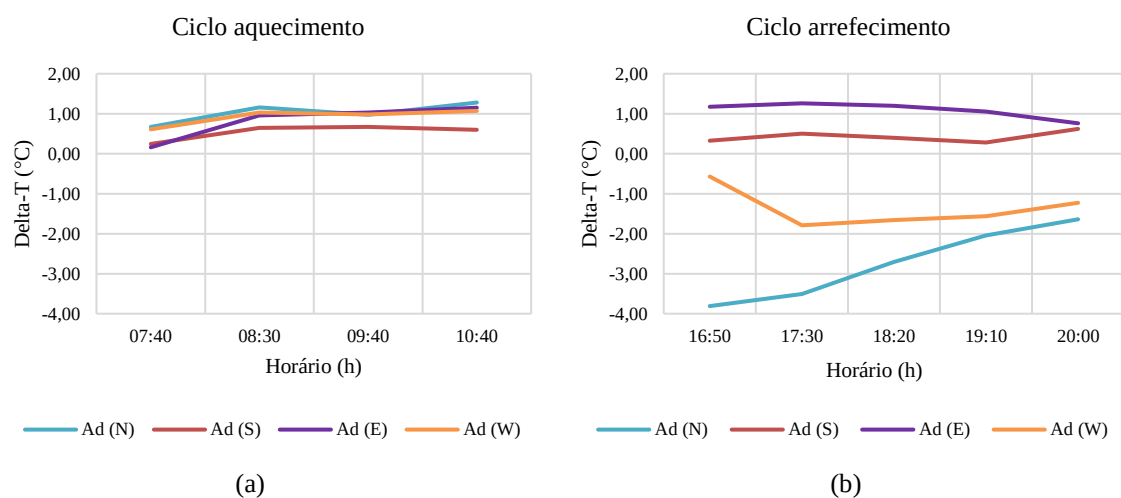
Os dados de Delta-T foram obtidos segundo a Equação 4 e apresentados na Figura 5 para todas as anomalias e horários de inspeções. A temperatura das regiões sem anomalias (T_{SRef}) é influenciada diretamente pelas condições de exposição, como radiação solar e temperatura ambiente. No arrefecimento, quando a incidência de radiação solar passa a ser reduzida em algumas orientações, os resultados de Delta-T apresentam decréscimo dos valores e, no aquecimento, para orientações como leste e norte, que recebem incidência direta de radiação, observa-se o aumento dos valores de Delta-T. É possível observar que cada anomalia apresenta um comportamento específico de Delta-T, isso devido às diferenças físicas entre as anomalias e as condições de fluxo de calor.

No aquecimento, a partir da incidência direta do sol, identifica-se um crescimento do Delta-T, sendo observado desde a primeira inspeção (7h40), mostrando o comportamento da anomalia em alterar o fluxo de calor e as temperaturas do revestimento. De modo geral, no horário da manhã, para todas as anomalias investigadas, os valores de Delta-T são positivos e apresentam crescimento na primeira hora de incidência solar e, depois, tendência de estabilização. No horário da tarde, obtêm-se os maiores valores (em módulo) de Delta-T nos primeiros horários, sendo eles negativos para as anomalias Ad(N) e Ad(W) que recebem incidência solar. As anomalias Ad(E) e Ad(S), que não recebem incidência solar nesse período, apresentam valores de Delta-T praticamente constantes.

Observa-se a tendência de estabilização do valor do Delta-T com o aquecimento ou a redução na evolução do arrefecimento, sendo explicada pela redução do fluxo de calor nesses dois processos. No final do ciclo de aquecimento, as temperaturas (T_{SRef} e T_{CA}) se aproximam, com o aquecimento geral do revestimento. Ao final do ciclo de arrefecimento, as temperaturas (T_{SRef} e T_{CA}) também se estabilizam, uma vez que o revestimento cerâmico sem estímulo de calor (radiação) tende a equilibrar suas temperaturas com a do ambiente. Esse comportamento afeta diretamente o valor do Delta-T em cada momento da inspeção e é uma variável importante. A avaliação das temperaturas T_{SRef} e T_{CA} já é investigada também em laboratório, e os resultados balizam as análises nas inspeções em campo (BAUER *et al.*, 2016a).

A orientação norte é a que recebe a maior quantidade de radiação total, sendo exposta por maior tempo à radiação solar, o que caracteriza condições específicas de temperaturas e fluxo de calor (Figura 2). É justificável que o pico de temperaturas ocorra entre 12h e 15h. Assim, no ciclo de aquecimento investigado se observa para a anomalia Ad(N) um incremento de Delta-T (aproximadamente 1,50 °C) com a evolução do ciclo (Figura 5a). Para o ciclo de arrefecimento, a fachada norte apresenta comportamento muito diferenciado do aquecimento. Para a anomalia Ad(N), observa-se um grande valor de Delta-T no início do ciclo de arrefecimento investigado (-3,81 °C) (Figura 5b), o qual se reduz ao longo dos horários analisados. A fachada sul não recebeu incidência direta do sol no dia investigado. Conforme se visualiza na Figura 2, a temperatura da superfície da fachada sul possui evolução paralela com a temperatura ambiente e atinge seu máximo entre as 12h e as 15h. Observando os valores de Delta-T, verifica-se um patamar no aquecimento para os horários observados para a anomalia Ad(S) (Figura 5a). Nesse caso, observa-se que o Delta-T da anomalia Ad(S) é de 0,60 °C. O arrefecimento, em geral, se caracteriza pela queda contínua das temperaturas, conforme se observa a anomalia Ad(S) (Figura 5b), que atinge o valor de 0,50 °C. Apesar da menor intensidade de fluxo a que essa orientação está sujeita, é possível identificar os descolamentos cerâmicos em diferentes horários de inspeção termográfica, devido ao fato de não ser necessária a incidência direta do sol para a identificação das anomalias.

Figura 5 - Gráficos de Delta-T para as anomalias no ciclo de (a) aquecimento e de (b) arrefecimento



A anomalia Ad(E), segundo a Figura 2, apresenta pico de temperatura às 11h e, segundo o que pode ser observado na Figura 5a, apresenta maior valor de Delta-T na inspeção das 10h40 (momento mais próximo do horário de pico de temperatura). No ciclo de aquecimento dessa anomalia, observa-se um crescimento dos valores de Delta-T, e, no arrefecimento, é possível identificar um decrescimento, chegando ao valor de 0,76 °C no último momento de inspeção (20h).

No ciclo de aquecimento, observa-se para Ad(W) um crescimento dos valores de Delta-T e, no arrefecimento, o decrescimento. Segundo o que é apresentado na Figura 2, o pico de temperaturas para a orientação oeste ocorre às 15h e, a partir desse momento, há redução dos valores de temperatura, que coincide com o momento de realização das inspeções. Observa-se também nesse momento a redução dos valores de Delta-T.

A fachada com orientação oeste, porém, recebe a incidência direta no período vespertino, quando tem seu ciclo de aquecimento, com pico entre as 13h e as 16h (Figura 2). Porém, para manter uma análise padrão dos critérios, mantém-se a determinação dos ciclos de aquecimento e arrefecimento nos mesmos momentos.

Observa-se ser possível a detecção e avaliação das anomalias, entretanto, em determinadas condições de fluxo, a detecção pode ser dificultada.

Gradientes de temperatura

O gradiente de temperatura é avaliado para auxiliar na determinação do momento de realização das inspeções termográficas e como ferramenta na interpretação dos termogramas, pois momentos com maiores gradientes tendem a apresentar maiores contrastes nos termogramas (PAVON, 2017; AIDAR, 2019). A Figura 6 apresenta os resultados do gradiente de temperatura para as orientações de fachada. A radiação solar afeta a temperatura superficial do revestimento e influencia na dinâmica do fluxo de calor ao longo da fachada. Pelos dados da simulação higratérmica, observa-se que, a partir do momento em que a radiação incide sobre a fachada, ocorre alteração no gradiente de temperatura, que passa de valores negativos para positivos, indicando a direção do fluxo de calor (Figura 6).

Na Figura 6 se observa que os resultados dos gradientes de temperatura obtidos através da simulação higratérmica correspondem aos comportamentos da temperatura real dos revestimentos.

Considerando os valores de referência, determinados em laboratório por Pavón (2017), no ciclo direto do fluxo térmico têm-se os horários das 8h às 15h para as orientações norte, sul e oeste, e das 8h às 12h para orientação leste, com melhores condições para identificação e avaliação das anomalias. Os resultados de G_{Temp} superiores a 0,6 °C, que possibilitam a identificação e a avaliação de anomalias através da termografia infravermelha, é o critério empregado para determinar os horários de inspeção.

No ciclo inverso do fluxo de calor, considerando como referência de valores inferiores a -2,5 °C, observa-se na Figura 6 que esses valores não foram atingidos para todas as orientações de fachada (PAVON, 2017). Porém, os resultados obtidos entre as 17h e as 20h apresentaram os maiores fluxos de calor registrados no período de fluxo inverso. Apesar de no ciclo de arrefecimento o valor de referência -2,5 °C não ser atingido, é possível realizar a identificação e a avaliação das anomalias.

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos quanto ao comportamento das anomalias investigadas neste estudo, em função do Delta-T e gradiente de temperaturas, considerando os ciclos de aquecimento e arrefecimento.

Figura 6 - Gradientes de temperatura das orientações cardeais de fachadas

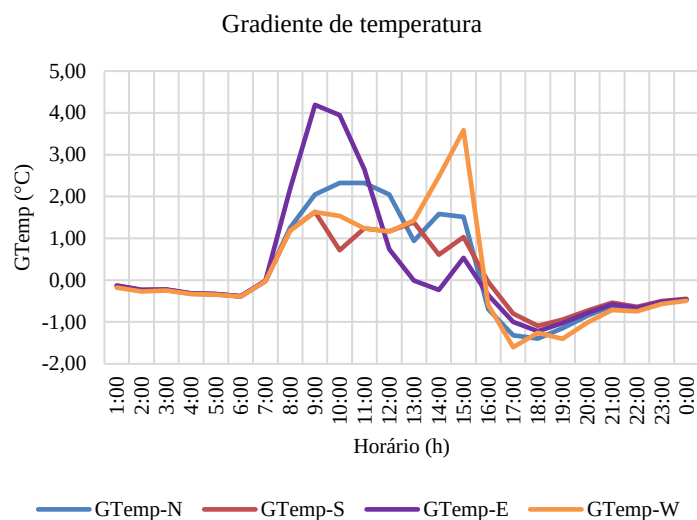
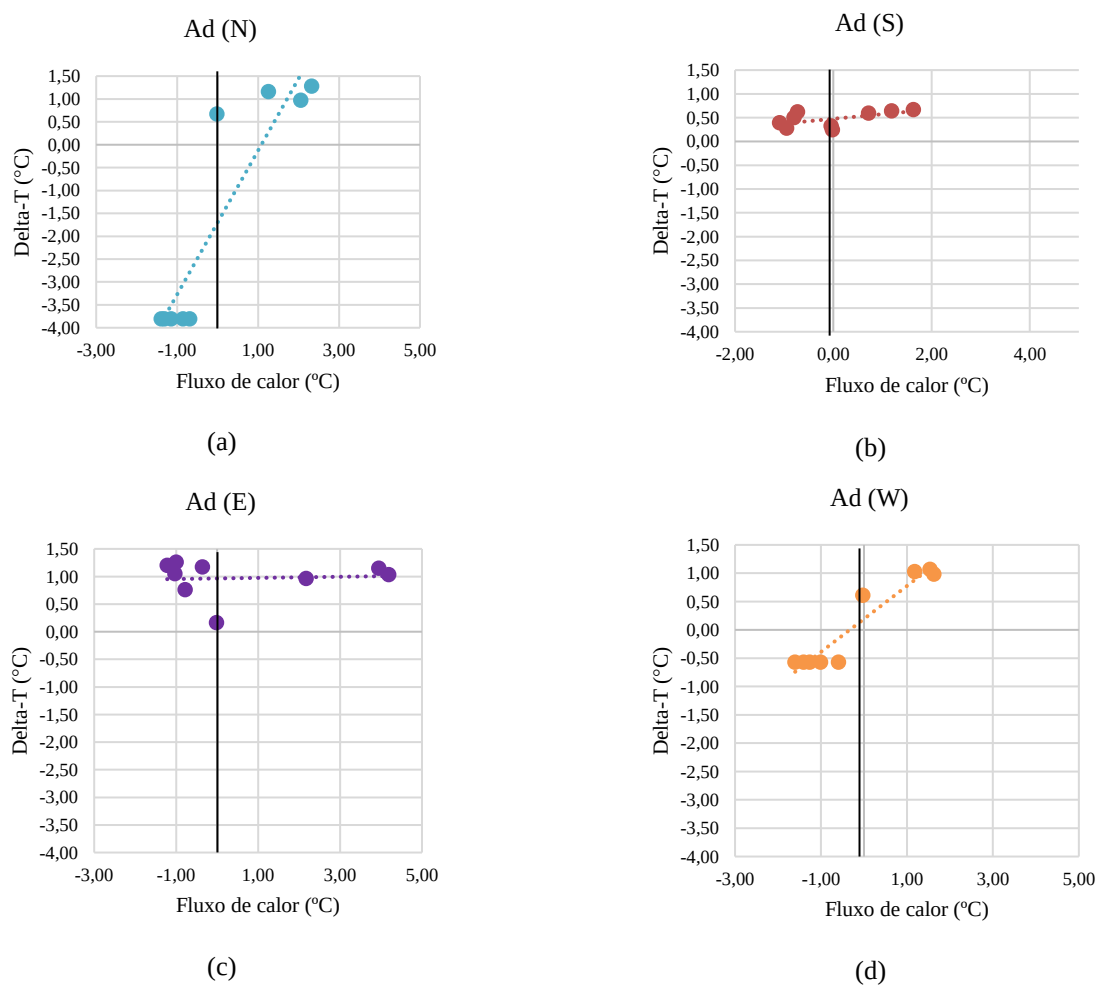


Figura 7 - Gradientes de temperaturas e Delta-T das anomalias investigadas



A distribuição dos dados apresenta dispersão e mostra que as anomalias investigadas, em diferentes orientações, apresentam pouca relação entre os resultados de Delta-T e gradientes de temperatura. Isso aponta que diferenças nas condições de fluxo térmico afetam os resultados de Delta-T e geram comportamentos distintos nas temperaturas das anomalias, ou seja, o gradiente de temperaturas não é um parâmetro de definição para o Delta-T. Podem-se empregar os dados de fluxo térmico e gradiente de temperaturas como ferramentas auxiliares na avaliação dos comportamentos de temperatura superficial, porém os termogramas avaliam temperaturas superficiais, e vários fatores podem gerar divergências de comportamentos. Observa-se, por meio da análise da Figura 7, que todas as anomalias apresentam resultados dispersos, o que mostra como as condições de fluxo térmico podem afetar a interpretação dos resultados de Delta-T, além de influenciar na identificação e na avaliação das anomalias.

Delta-T corrigido

O Delta-T_{cor} pode ser interpretado como o Delta-T variante por graus celsius na superfície, em diferentes condições de temperatura, nos horários de inspeção. A proposição do Delta-T_{cor} como critério de análise quantitativa é devida ao fato de este se apresentar como uma constante mais universal, que tem relação com o fluxo térmico, diferente do Delta-T, além de permitir a comparação entre anomalias em função das diferentes orientações de fachada. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos para cada anomalia investigada, nos ciclos de aquecimento e arrefecimento.

A Figura 8a apresenta os resultados obtidos no ciclo de aquecimento. Observa-se que todos os resultados de Delta-T_{cor} são positivos, demonstrando que o fluxo de calor ocorre do exterior para o interior do edifício, caracterizando o aquecimento da superfície do revestimento de fachada. Na Figura 8b, no ciclo de arrefecimento, observam-se resultados negativos para as anomalias Ad(N) e Ad(W), caracterizando o período em que a incidência de radiação apresenta mudança e redução de intensidade, o que chega a alterar o sentido do fluxo térmico.

As anomalias Ad(N) e Ad(W) apresentam no aquecimento distribuição de resultados de Delta-T_{cor} semelhantes. Observa-se na Figura 8a que as curvas se sobrepõem; o mesmo ocorre com as anomalias Ad(E) e Ad(S), que apresentam resultados muito próximos, e ocorre sobreposição das curvas, principalmente nos horários de 8h30 e 9h40.

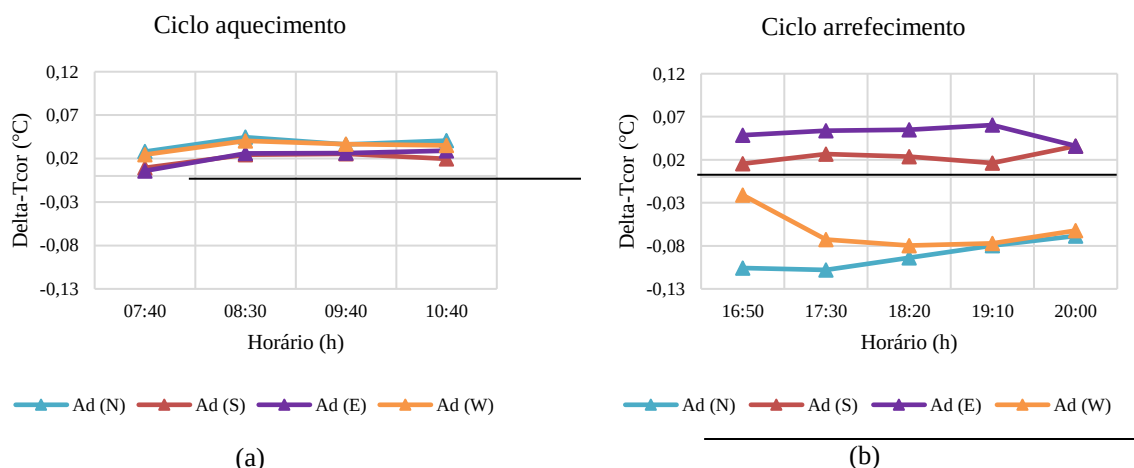
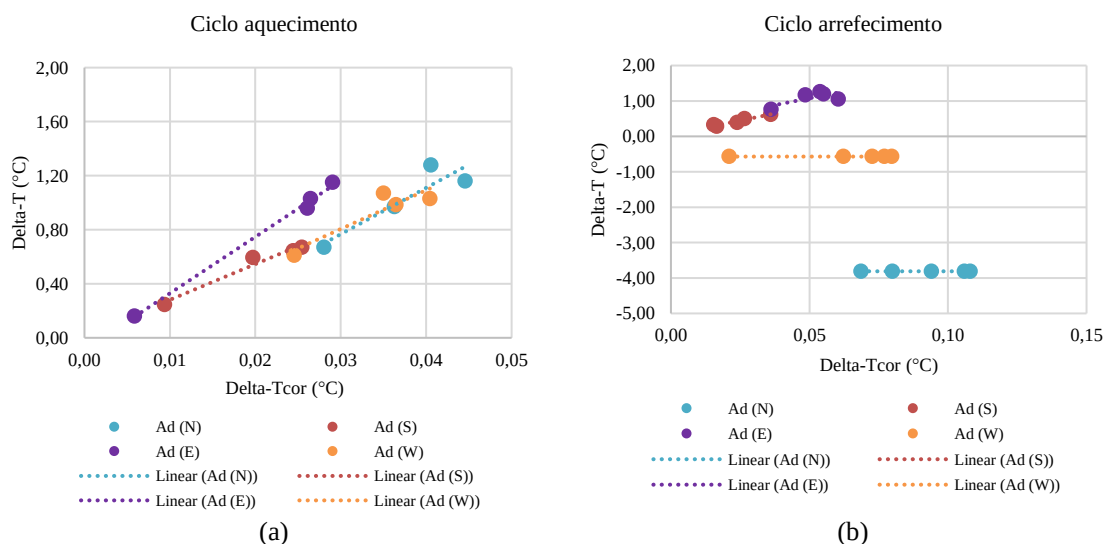
No ciclo de arrefecimento os resultados são mais dispersos, sendo observados resultados semelhantes para as anomalias Ad(E) e Ad(S), assim como no ciclo de aquecimento; porém, apresentam resultados variando $\pm 0,05$ °C. As anomalias Ad(N) e Ad(W) apresentam comportamento semelhante, com dados de Delta-T_{cor} negativos maiores no período entre 16h50 e 17h30. Após esse período, observa-se a estabilização dos dados para ambas as anomalias.

As anomalias Ad(N) e Ad(W) apresentam distribuição de Delta-T_{cor} semelhante ao Delta-T, no ciclo de aquecimento e no arrefecimento, acarretando resultados negativos devido à influência da inversão do fluxo térmico. Em relação às diferenças entre Delta-T_{cor} e Delta-T, tem-se que a variação está em torno de $\pm 0,08$ °C, apresentando convergência dos resultados, e também a proposição do Delta-T_{cor} como critério de análise quantitativa cumpre com a função de permitir a avaliação das anomalias.

A Figura 9 aponta os resultados obtidos ao se avaliar a relação entre os dados de Delta-T e de Delta-T_{cor} para cada anomalia investigada. Observa-se, segundo análise da Figura 9a, que no ciclo de aquecimento todas as anomalias apresentam tendência de evolução linear dos resultados. Isso aponta que o aquecimento apresenta tendência de evolução dos resultados, enquanto no arrefecimento a tendência é de estabilização e redução.

Capacidade de detecção das anomalias

Quando se comparam os ciclos de aquecimento e arrefecimento, observam-se maior capacidade de visualização no ciclo de aquecimento e maiores variações de visualização no arrefecimento. Considerando os resultados apresentados na Tabela 1, é possível definir um valor de Delta-T a partir do qual é possível a visualização das anomalias. No ciclo de aquecimento, têm-se para a anomalia Ad(N) 0,97 °C, para Ad(S) 0,59 °C, para Ad(E) 0,96 °C e para Ad(W) 0,98 °C. Observa-se que para as anomalias Ad(N), Ad(E) e Ad(W) o valor de Delta-T adotado como referência na visualização da anomalia é muito próximo, com variação de apenas $\pm 0,02$ °C. A anomalia Ad(S) apresenta a maior variação, com -0,37 °C. No ciclo de arrefecimento a anomalia Ad(N) apresenta -1,64 °C, a Ad(S) 0,50 °C, a Ad(E) 0,76 °C e a Ad(W) -1,23 °C.

Figura 8 - Delta-T_{cor} das anomalias nos ciclos de aquecimento e arrefecimentoFigura 9 - Relação entre os resultados de Delta-T e Delta-T_{cor} para as anomalias nos ciclos de aquecimento e arrefecimento

As anomalias identificadas por meio do critério de capacidade de visualização (sendo igual ou superior a 1 °C da TSA_{ref}), nos diferentes horários de inspeção, são consideradas na determinação do Delta-T e Delta-T_{cor} de referência. Adota-se o valor que melhor evidencie a presença das anomalias e que englobe os Delta-T e Delta-T_{cor} obtidos. A Tabela 2 apresenta um resumo destes critérios, quanto ao valor mínimo de referência de Delta-T e Delta-T_{cor}, a partir do qual possível visualizar e avaliar as anomalias.

Segundo a Tabela 2, os critérios quantitativos que representam a presença de anomalias em diferentes condições de fluxo térmico seriam no ciclo de aquecimento Delta-T superior a 0,59 °C e Delta-T_{cor} superior a 0,020 °C/°C. No ciclo de arrefecimento determina-se Delta-T superior a 0,50 °C e Delta-T_{cor} superior a 0,026 °C/°C, sendo este valor satisfatório para identificar anomalias nas diferentes orientações de edifícios localizados em Brasília.

A metodologia desenvolvida e os critérios quantitativos definidos neste estudo podem ser aplicados em diferentes localidades com condições de fluxo térmico distintas. Indica-se que em locais com condições climáticas muito diferentes de Brasília se realize uma verificação dos critérios e se eles conseguem satisfazer as necessidades de investigação das anomalias. Diante disso, se constatado não ser possível identificar e avaliar as anomalias com os critérios quantitativos deste estudo, pode-se empregar a metodologia desenvolvida para definir os critérios quantitativos a serem aplicados à localidade específica.

Tabela 1 - Detecção das anomalias em função da visualização e do gradiente de temperaturas

Anomalias	Ciclo	Horário (h)	Visualização da anomalia	Gradiente (°C)	Delta-T (°C)	Delta-Tcor (°C/°C)
Ad (N)	AQ	07:40	OK	-0,02	0,67	0,028
		08:30	OK	1,26	1,16	0,045
		09:40	OK	2,05	0,97	0,036
		10:40	OK	2,32	1,28	0,041
	AR	16:50	OK	-0,69	-3,81	-0,106
		17:30	OK	-1,31	-3,51	-0,108
		18:20	OK	-1,40	-2,71	-0,094
		19:10	OK	-1,15	-2,04	-0,080
Ad (S)	AQ	07:40	OK	-0,02	0,24	0,009
		08:30	OK	1,19	0,65	0,024
		09:40	OK	1,63	0,67	0,025
		10:40	OK	0,72	0,59	0,020
	AR	16:50	OK	-0,04	0,32	0,015
		17:30	OK	-0,80	0,50	0,026
		18:20	OK	-1,09	0,40	0,024
		19:10	NO	-0,95	0,28	0,016
Ad (E)	AQ	07:40	NO	-0,02	0,16	0,006
		08:30	OK	2,18	0,96	0,026
		09:40	OK	4,19	1,03	0,026
		10:40	OK	3,95	1,15	0,029
	AR	16:50	OK	-0,35	1,17	0,048
		17:30	OK	-1,00	1,26	0,054
		18:20	OK	-1,22	1,20	0,055
		19:10	OK	-1,03	1,05	0,060
Ad (W)	AQ	07:40	NO	-0,02	0,61	0,025
		08:30	OK	1,18	1,03	0,040
		09:40	OK	1,63	0,98	0,036
		10:40	OK	1,54	1,07	0,035
	AR	16:50	NO	-0,59	-0,57	-0,021
		17:30	OK	-1,60	-1,79	-0,073
		18:20	OK	-1,26	-1,66	-0,080
		19:10	OK	-1,40	-1,57	-0,077
		20:00	OK	-1,01	-1,23	-0,062

Tabela 2 - Definição do critério de análise Delta-T e Delta-T_{cor} de referência

Orientação cardeal da fachada	Anomalias	Delta-T (°C)	Delta-Tcor referência (°C/°C)
Norte	Ad (N)	0,97	0,036 (AQ)
		-1,64	-0,068 (AR)
Sul	Ad (S)	0,59	0,020 (AQ)
		0,50	0,026 (AR)
Leste	Ad (E)	0,96	0,026 (AQ)
		0,76	0,036 (AR)
Oeste	Ad (W)	0,98	0,036 (AQ)
		-1,23	-0,062 (AR)

Propostas de análise quantitativa para inspeções termográficas de fachada

A abordagem quantitativa proposta elenca a sequência de uma análise a partir das etapas mencionadas, a serem empregadas na avaliação de anomalias de descolamentos cerâmicos e como referência na obtenção e avaliação dos termogramas:

- (a) análise da dinâmica do fluxo de calor das fachadas e incidência de radiação solar sobre o edifício, podendo ser empregada a carta solar, dados de insolação ou simulação higrótérmica;

- (b) avaliação qualitativa dos termogramas para identificação de pontos mais frios ou quentes, que caracterizem anomalias térmicas. Em seguida, quantificam-se as temperaturas superficiais, de modo a avaliar se os comportamentos de temperatura caracterizam a presença de anomalias. Temperaturas iguais ou superiores a 2 °C da região amostrada da fachada caracterizam zonas de anomalias. A análise quantitativa considera a distribuição de temperaturas por pixels de zonas sobre a anomalia no termograma. A partir dessa zona se determina a temperatura mediana da anomalia, adotada como T_{CA} ;
- (c) análise da distribuição de temperaturas das regiões sem anomalia para determinação da TSA_{ref} e obtenção do comportamento padrão quando não há presença de anomalias. Nesta etapa, avalia-se a temperatura dos pixels de uma zona localizada sobre a região sem presença de anomalia (sendo esta zona localizada a menos de 0,5 m da zona da anomalia). Os dados de temperatura são analisados considerando o intervalo interquartil para reduzir a interferência de *outliers*, e determina-se a TSA_{ref} sendo a temperatura mediana da zona sem presença de anomalia;
- (d) emprego da TSA_{ref} na determinação do Delta-T (Equação 4) e Delta- T_{cor} (Equação 5), uma vez que permite a avaliação com referência ao comportamento padrão de temperaturas e a perturbação gerada pelo defeito no ciclo de aquecimento e arrefecimento; e
- (e) determinação dos critérios quantitativos Delta-T e Delta- T_{cor} , a partir da qual é possível caracterizar a presença de anomalias do tipo descolamento cerâmico. Neste estudo, o critério de análise obtido é o Delta- T_{cor} de 0,020 °C/°C.

Conclusões

Este estudo propõe recomendações de análise por meio de termografia quantitativa para inspeção termográfica de fachadas com descolamento de placas cerâmicas. As anomalias investigadas foram verificadas em um edifício específico, porém os resultados obtidos e a metodologia proposta se mostram adequados e podem ser aplicados a diferentes edifícios e condições de fluxo de calor. Portanto, nesse contexto, com o presente estudo, pode-se concluir que:

- (a) a simulação higrótérmica pode ser empregada para realização de estudo preliminar quanto aos gradientes superficiais para melhor compreensão da dinâmica do fluxo térmico na fachada;
- (b) o emprego do gradiente para avaliação em campo e em elementos de grande extensão, tais como fachadas, não se mostra tão efetivo quando comparado aos estudos realizados em laboratório. Não foi observada relação direta entre maiores valores de gradiente e maiores resultados de Delta-T e Delta- T_{cor} ;
- (c) a avaliação dos descolamentos cerâmicos, tendo como referência as zonas sem presença de anomalia, por meio da TSA_{ref} , mostra-se efetiva quanto aos resultados de Delta-T e Delta- T_{cor} obtidos. O Delta- T_{cor} é proposto como parâmetro universal para avaliação das anomalias, pois apresenta resultados mais convergentes que o Delta-T, e também permite uma avaliação mais precisa das anomalias; e
- (d) os resultados de Delta-T e de Delta- T_{cor} apontam para uma relação entre esses contrastes. Para anomalias diferentes submetidas a condições de fluxo diferentes, mostram que é possível empregar o Delta- T_{cor} como ferramenta de análise quantitativa. Isso ocorre porque este indicador associa diferentes valores de TSA_{ref} , em condições distintas de fluxo de calor.

Referências

- AIDAR, L. A. G. **Metodologia de inspeção e análise de termogramas para estudo de fachadas em revestimento cerâmico**. 2019. 209 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1862-14**: standard practice for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers. West Conshohocken, 2014a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1933-14**: standard practice for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers. West Conshohocken, 2014b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16969**: ensaios não destrutivos: termografia infravermelha: princípios gerais. Rio de Janeiro, 2021.
- BARREIRA, E. *et al.* Quantitative infrared thermography to evaluate the humidification of lightweight concrete. **Sensors**, v. 20, p. 1664, 2020.

- BARREIRA, E.; ALMEIDA, R.; MOREIRA, M. An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage point in buildings. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 224-235, 2017.
- BAUER, E. *et al.* Analysis of building facade defects using infrared thermography: laboratory studies. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 93-104, 2016a.
- BAUER, E. *et al.* Critérios para a aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias em fachadas de edifícios. **Revista Politécnica**, Salvador, v. 21, p. 266-277, 2014.
- BAUER, E. *et al.* Critérios para identificação de destacamentos cerâmicos em fachadas de edifícios com termografia por infravermelho. In: DELGADO, J. (ed.). **Recent Developments in Building Diagnosis Techniques. Building Pathology and Rehabilitation**. Cingapura: Springer, 2016b.
- BAUER, E. *et al.* Estudo da degradação de fachada de edifício em Brasília/DF: elaboração de curva dose-resposta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, Fortaleza, 2020. **Anais [...]** Fortaleza, 2020.
- BAUER, E.; MILHOMEM, M.; AIDAR, L. Evaluating the damage degree of cracking in facades using infrared thermography. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 8, n. 3, p. 517-528, 2018.
- BAUER, E.; PAVÓN, E. Criteria for identification of ceramic detachments in building facades with infrared thermography. **Developments in Building Diagnosis Techniques**, v. 5, p. 51-68, 2016.
- BAUER, E.; PAVON, E. Termografia de infravermelho na identificação e avaliação de manifestações patológicas em edifícios. **Revista Concreto Construções**, v. 79, p. 93-98, 2015.
- CERDEIRA, F.; VÁZQUEZ, J. C.; GRANADA, E. Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes. **Journal Energy and Buildings**, v. 43, p. 1845-1851, 2011.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 15026**: hygrothermal performance of building components and building elements: assessment of moisture transfer by numerical simulation. Berlin, 2007.
- DULING, J. M.; HORAK, E.; CLOETE, C. Service life prediction beyond the “Factor Method”. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDINGS MATERIALS AND COMPONENTS, 11., Istanbul, 2008. **Proceedings [...]** Istanbul, 2008.
- EBRAHIMI, S. *et al.* Robust principal component thermography for defect detection in composites. **Sensors**, v. 21, p. 2682, 2021.
- EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. D. Passive thermographic inspection of adhered ceramic claddings: limitations and conditioning factors. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 27, p. 737-747, 2013.
- EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Building thermography: detection of delamination of adhered ceramic claddings using the passive approach. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 34, p.1-13, 2015.
- EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 187-197, jan. 2014.
- EYE, V. F. *et al.* Quantificação da ação do clima na degradação de fachadas em argamassa empregando a simulação higrótérmica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 12., São Paulo, 2017. **Anais [...]** São Paulo, 2017.
- FREITAS, S. S. D.; FREITAS, V. P. D.; BARREIRA, E. Detection of façade plaster detachments using infrared thermography: a non-destructive technique. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 80-87, 2014.
- GALADANCI, A. S. *et al.* Energy investigation framework: understanding buildings from an energy perspective view. **Journal of Building Engineering**, v. 28, p. 101046, 2020.
- GARRIDO, I. *et al.* Algorithms for the automatic detection and characterization of pathologies in heritage elements from thermographic images. In: CIPA INTERNATIONAL SYMPOSIUM “DOCUMENTING THE PAST FOR A BETTER FUTURE”, 29., Ávila, 2019. **Proceedings [...]** Ávila, 2019.
- GARRIDO, I. *et al.* IRT and GPR Techniques for moisture detection and characterisation in buildings. **Sensors**, v. 20, n. 22, p. 6421-6458, 2020.

- GIL-VALVERDE, R. *et al.* Three-dimensional characterization of air infiltration using infrared thermography. **Journal Energy and Buildings**, v. 233, p. 110656, 2021.
- HUH, J. *et al.* Detectability of delamination in concrete structure using active infrared thermography in terms of signal-to-noise ratio. **Journal Applied Sciences**, v. 8, n. 10, p. 1986, 2018.
- KAYMAZ, E. **Monitoring thermal bridges by infrared thermography**. In: ALALOUCHE, C. *et al.* (ed.), *Advanced studies in energy efficiency and built environment for developing countries*. Cham: Springer, 2019.
- KIRIMTAT, A.; KREJCAR, O. A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: advances and prospects. **Energy & Buildings**, v. 176, p. 390-406, 2018.
- KROMANIS, R.; KRIPAKARAN, P. Performance of signal processing techniques for anomaly detection using a temperature-based measurement interpretation approach. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 11, p. 15-34, 2021.
- KROMANIS, R.; KRIPAKARAN, P. Predicting thermal response of bridges using regression models derived from measurement histories. **Computers & Structures**, v. 136, p. 64-77, 2014.
- KYLILI, A. *et al.* Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: a review. **Applied Energy**, v. 134, p. 531-549, 2014.
- LAI, W. L. *et al.* Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 740-746, Oct. 2010.
- LAI, W. W.-L.; LEE, K.-K.; POON, C.-S. Validation of size estimation of debonds in external wall's composite finishes via passive Infrared thermography and a gradient algorithm. **Construction and Building Materials**, v. 87, p. 113-124, jul. 2015.
- MAC, V. H. *et al.* Detection of delamination with various width-to-depth ratios in concrete bridge deck using passive IRT: Limits and applicability. **Materials**, v. 12, n. 23, p. 3996, 2019.
- MADRUGA, F. J. *et al.* Infrared thermography processing based on higher-order statistics. **NDT & E International**, v. 43, n. 8, p. 661-666, 2010.
- MALDAGUE, X. **Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing**. New York: Wiley, 2001.
- MAZZEO, D. *et al.* Worldwide geographical mapping and optimization of stand-alone and grid-connected hybrid renewable system techno-economic performance across Köppen-Geiger climates. **Applied Energy**, v. 276, p. 115507, 2020.
- MILOVANOVIĆ, B.; GAŠI, M.; GUMBAREVIĆ, S. Termografia de componentes principais para detecção de defeitos em concreto. **Sensors**, v. 20, p. 3891, 2020.
- MURPHY, B.; YARNOLD, M. Temperature-driven structural identification of a steel girder bridge with an integral abutment. **Engineering Structures**, v. 155, p. 209-221, 2018.
- NASCIMENTO, M. *et al.* Estudo da degradação por ação de agentes climáticos nas fachadas de edifícios. In: EURO-AMERICAN CONGRESS REHABEND - CONSTRUCTION PATHOLOGY, REHABILITATION TECHNOLOGY AND HERITAGE MANAGEMENT, Burgos, 2016. **Proceedings [...]** Burgos, 2016.
- NASIR, M. H. A.; HASSAN, A. S. Thermal performance of double brick wall construction on the building envelope of high-rise hotel in Malaysia. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101389, 2020.
- NERMIN, M. *et al.* Acoustic and thermal performance of sustainable fiber reinforced thermoplastic composite panels for insulation in buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 40, p. 102747, 2021.
- PANT, S. *et al.* Evaluation and selection of video stabilization techniques for UAV-based active infrared thermography application. **Sensors**, v. 21, n. 5, p. 1604, 2021.
- PAVÓN, E. **Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho**. Brasília, 2017. 250 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- PEREIRA, C.; BRITO, J. D.; SILVESTRE, J. D. Harmonising the classification of diagnosis methods within a global building inspection system: proposed methodology and analysis of fieldwork data. **Engineering Failure Analysis**, v. 115, p. 104627, 2020.

- PULITI, M.; MONTAGGIOLI, G.; SABATO, A. Automated subsurface defects' detection using point cloud reconstruction from infrared images. **Automation in Construction**, v. 129, p. 103829, 2021.
- RORIZ, M. Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC. **Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. São Carlos – São Paulo, Brasil, 2012.
- RUBEL, F.; KOTTEK M. Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 19, p. 135-141, 2010.
- SFARRA, S. *et al.* Evaluation of the state of conservation of mosaics: simulations and thermographic signal processing. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 117, p. 287-315, 2017.
- SILVA, M. N. B. **Avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada: aplicação ao caso de Brasília/DF**. Brasília, 2014. 198 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.
- SOUZA, J. *et al.* Analysis of the influencing factors of external wall ceramic claddings' service life using regression techniques. **Engineering Failure Analysis**, v. 83, p. 141-155, 2018a.
- SOUZA, J. *et al.* Application of a graphical method to predict the service life of adhesive ceramic external wall claddings in the city of Brasília, Brazil. **Journal of Building Engineering**, v. 19, p. 1-13, 2018b.
- SOUZA, J. *et al.* Service life prediction of ceramic tiling systems in Brasília-Brazil using the factor method. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 38-49, 2018c.
- SU, T. C. Assessment of Cracking Widths in a Concrete Wall Based on TIR Radiances of Cracking. **Sensors**, v. 20, n. 17, p. 4980, 2020.
- TANAKA, D.; PAVON, E. Influência das dimensões dos descolamentos de revestimentos cerâmicos na avaliação com termografia de infravermelho. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 133-146, jul./set. 2021.
- VAVILOV, V. Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing. **NDT & E International**, v. 61, p. 16-23, 2014.
- ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Brasília, 2015. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao DMMPROJECT: DEGRADATION, MEASUREMENT AND MODELING pela disponibilidade da base de dados de simulação aplicada ao estudo. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e pelo Decanato de Pós-Graduação (DPG) da Universidade de Brasília (UnB).

Elton Bauer

Curadoria de dados, Aquisição de financiamento, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação, Visualização, Redação - rascunho original.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil | Universidade de Brasília | Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte | Brasília - DF - Brasil | CEP 70910-900 | Tel.: (61) 3107-1004 | E-mail: elbauerlem@gmail.com

Raynnara Ribeiro Dias Lucenas

Conceitualização, Análise formal, Aquisição de financiamento, Investigação, Visualização, Redação - revisão e edição.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pós Graduação em Estruturas e Construção Civil | Universidade de Brasília | Tel.: (61) 99579-7324 | E-mail: lucenasraynnara@gmail.com

Elier Pavon

Metodologia, Supervisão, Validação.

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologias | Universidade Federal do Oeste da Bahia | Rua Professor José Seabra de Lemos, 316, Recanto dos Pássaros | Barreiras -BA - Brasil | CEP 47808-021 | Tel.: (77) 3614-3116 | E-mail: elierpavon@gmail.com

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.