

Investigação termográfica para caracterização de fissuras em fluxo de aquecimento e resfriamento: estudos de laboratório

Thermographic investigation for characterization of cracks in heating and cooling flux: laboratory studies

Matheus de Souza Silva 

Elton Bauer 

Resumo

A fissuração pode ser investigada por termografia de infravermelho, pois defeitos em uma superfície apresentam temperaturas diferentes em relação as regiões sem defeito. A temperatura da fissura é dependente das suas dimensões, abertura e profundidade, nas quais podem ser identificadas pela termografia. Avalia-se o comportamento das temperaturas em regime controlado de aquecimento e resfriamento de fissuras em função de diferentes profundidades e quais as condições mais adequadas para identificar as fissuras. Propõe-se a observação da evolução de temperatura no aquecimento e resfriamento de uma placa de argamassa que possui fissuras com diferentes profundidades. A variação de temperatura da placa no aquecimento e resfriamento é monitorada por termogramas e termopares presentes na superfície e interior da placa em regiões próximas às fissuras. Identifica-se, pela aplicação de contraste termográfico Delta-T, que fissuras de maior profundidade possuem maior Delta-T, em módulo, durante o aquecimento, enquanto fissuras de menor profundidade possuem maior Delta-T no resfriamento. As fissuras são melhor identificadas na fase de resfriamento, pois no fim do aquecimento as fissuras de menor profundidade não são identificadas.

Palavras-chave: Fissura. Argamassa. Termográfica. Delta-T. Dano.

Abstract

Cracking can be investigated by infrared thermography, as defects on a surface have different temperatures compared to regions without defects. The temperature of the crack depends on its dimensions, opening and depth, which can be identified by thermography. The possibility of classifying crack damage according to different depths by thermography in heating and cooling regimes and indicating which conditions are most suitable for identifying cracks is evaluated. It is proposed to observe the temperature evolution during the heating and cooling of a mortar slab that has cracks with different depths. The temperature variation of the plate during heating and cooling is monitored by thermograms and thermocouples present on the surface and interior of the plate in regions close to the cracks. It is identified, through the application of Delta-T thermographic contrast, that cracks of greater depth have a greater Delta-T, in modulus, during heating, while cracks of shallower depth have a greater Delta-T during cooling. Cracks are best identified during the cooling phase, as shallower cracks are not identified at the end of heating.

Keywords: Crack. Mortar. Thermography. Delta-T. Damage.

¹Matheus de Souza Silva

¹Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

²Elton Bauer

²Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

Recebido em 18/04/23

Aceito em 26/09/23

Introdução

A degradação das fachadas é um tema de estudo associado aos aspectos de desempenho, vida útil e manutenção dos edifícios. A degradação é associada a um grande grupo de fatores, dentre os quais os agentes e os mecanismos de degradação possibilitam o desenvolvimento de anomalias capazes de afetar o desempenho de um sistema construtivo ou do edifício (BSI, 2011).

Uma das anomalias de maior predominância nas fachadas em argamassa é a fissuração. Sua ocorrência está relacionada com um grande número de causas prováveis, no qual, investigações de degradação em revestimentos de argamassa na cidade de Brasília, Brasil, indicam que a fissuração representa mais da metade do total das anomalias presentes nas fachadas (Bauer *et al.*, 2020; Bauer; Souza; Mota, 2021). Além da maior ocorrência a fissura é uma das anomalias de maior gravidade, pois permite ação de outros agentes agressivos, como penetração de chuva, e o desenvolvimento de outros defeitos, como eflorescência, pulverulência e incrementação do descolamento (Flores-Colen; Brito; Freitas, 2010; Santos, 2018; Silva; Gaspar; De Brito, 2014).

As fissuras têm várias causas e podem surgir ainda no processo de construção. Podem ocorrer também pela ação dos agentes de degradação, como é o caso das fissuras que ocorrem no topo dos edifícios, tendo como causa as temperaturas decorrentes da grande incidência de radiação solar (Dias *et al.*, 2021; Silva; De Brito; Gaspar, 2016). Devido ao dano que as fissuras podem causar aos revestimentos de fachada em argamassa, se deve investigar seus impactos, pois apresentam grande influência na redução de desempenho dos revestimentos.

As fissuras em revestimentos de argamassa podem ser identificadas e investigadas por termografia. A identificação ocorre pelo fato que os defeitos alteram localmente o fluxo de calor nas fachadas, o que gera temperaturas diferentes no defeito em relação a área livre de dano (Carretero-Ayuso; Moreno-Cansado; De Brito, 2017).

A termografia é uma técnica de aquisição de imagem e análise de informações térmicas, obtidas a partir da medição da radiação emitida e refletida de um objeto, permitindo obter sua temperatura (ITC, 2008). A técnica apresenta a temperatura da superfície do objeto alvo em um termograma, que é uma imagem que representa as temperaturas em uma escala de cores (Barreira; Almeida; Pereira, 2019; ITC, 2008; Maldague, 2001). A termografia pode ser realizada à distância, sem que haja necessidade de contato, e disponibiliza os resultados imediatamente, o que permite efetuar inspeções de forma rápida das fachadas dos edifícios (Bauer *et al.*, 2016a, 2016b; Garrido *et al.*, 2021; ITC, 2008; Tejedor *et al.*, 2017).

A termografia é classificada quanto à forma de aquecimento, sendo passiva ou ativa. A termografia passiva acontece quando não há nenhum estímulo térmico induzido além do disposto pelo ambiente (Maldague, 2001). Já termografia ativa ocorre por meio de aquecimento induzido (Ibarra-Castanedo *et al.*, 2017). A termografia ativa geralmente implica na aquisição de uma série de termogramas durante, ou após, o aquecimento por um intervalo de tempo, em que os defeitos são identificados com base na evolução das temperaturas (Edis; Flores-Colen; De Brito, 2015a). Em condições de inspeções termográficas em edificações, a termografia geralmente acontece de forma passiva, na qual o aquecimento é oriundo da radiação solar direta, difusa e refletida (Aidar, 2019). Existem casos que a termografia ativa é usada na inspeção de fachadas. A razão para o uso da termografia ativa ocorre quando os elementos da fachada apresentam condutividade térmica semelhante entre si, de modo que o aquecimento por radiação solar não é o suficiente para provocar diferença de temperatura entre eles (Glavaš *et al.*, 2019).

A investigação de termografia pode ser qualitativa ou quantitativa. A investigação qualitativa consiste em identificar regiões de maior e menor temperatura de um termograma e verificar se indicam defeitos, através comparação com a temperatura padrão do objetivo observado (ITC, 2008; Paoletti *et al.*, 2013). A investigação quantitativa consiste em uma abordagem mais específica, na qual se busca entender o comportamento térmico do objeto investigado e seus possíveis defeitos quando submetido ao aquecimento ou resfriamento (Bauer *et al.*, 2016a). São necessários parâmetros como emissividade e temperatura refletida, pois nessa abordagem o valor preciso da temperatura é fundamental para a investigação e não somente identificar se há zonas quentes ou frias no termograma (Edis; Flores-Colen; De Brito, 2015a; Hart, 1992; Sfarra; Barreira; Lagüela, 2021).

A investigação quantitativa utiliza as temperaturas observadas no termograma como critério para identificar e determinar a gravidade de um defeito e, em alguns casos, é possível classificar seu grau de dano, quanto as suas dimensões, abertura e profundidade, por meio da aplicação do contraste termográfico Delta-T, conforme a Equação 1 (Bauer *et al.*, 2015; Garrido *et al.*, 2022; Maldague, 2001). A aplicação do Delta-T nas investigações termográficas de fachadas é utilizada para a identificação de fissuras, regiões úmidas e descolamento de revestimento cerâmico, onde o Delta-T é a diferença da temperatura do defeito em relação a

região livre de dano (Bauer; Milhomem; Aidar, 2018; Bauer; Pavon, 2015; Edis; Flores-Colen; De Brito, 2014a).

$$\Delta T = T_d - T_{nd} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Delta T: diferença entre a temperatura da fissura e da região livre de defeito (°C);

T_d: Temperatura média do defeito (°C); e

T_{nd}: Temperatura média da região sem defeito (°C).

Devido a termografia ser capaz de identificar defeitos, onde a temperatura depende da sua dimensão, propõe-se estudar o comportamento da temperatura de fissuras, com diferentes profundidades, em condições controladas de aquecimento e resfriamento. A investigação observa a resposta do contraste termográfico em relação à profundidade da fissura e avalia as condições de mensurar a abertura.

Comportamento termográfico das fachadas

A temperatura na superfície das fachadas é influenciada por um conjunto de variáveis, como radiação direta, radiação refletida e incidência de vento, que estão relacionadas à altura. Regiões mais próximas à base do edifício possuem temperatura superior às regiões de maior altura devido à maior incidência de radiação refletida, proveniente do solo ou de edificações vizinhas (Aidar, 2019). As regiões mais altas possuem maior incidência de vento, o que contribui a ter temperaturas inferiores comparada com as regiões próximas à base (Kahsay; Bitsuamlak; Tariku, 2019). Investigações de termografia realizadas em fachadas de revestimento cerâmico na cidade de Brasília observam tendências semelhantes, sendo que as regiões próximas à base das edificações possuem temperatura superior às regiões mais altas, independentemente da orientação da fachada (Aidar; Bauer, 2019).

Elementos constituintes das fachadas, como esquadrias, pilares e vigas, podem ser identificados pela termografia. O fluxo de calor na superfície das fachadas é dependente dos materiais que constituem o sistema, pois cada material possui condutividade térmica distinta, o que interfere no fluxo de calor e, conseqüentemente, na temperatura superficial observada no termograma (Glavaš *et al.*, 2019; Lucenas; Bauer; Pavón, 2021). A diferença de temperatura entre os elementos da fachada é observada em investigações de termografia realizadas em fachadas de argamassa para identificação de fissuras na cidade de Goiânia, Brasil. Constata-se que a termografia é clara na diferenciação entre a temperatura dos revestimentos de argamassa sobre a estrutura, pilares e vigas, e sobre a alvenaria. Durante o resfriamento, o revestimento de argamassa sobre alvenaria apresenta temperatura superior em comparação ao revestimento sobre estrutura (Freitas; Carasek; Cascudo, 2014).

Regiões úmidas das fachadas podem ser detectadas por termografia, pois variações no teor de umidade estão relacionadas com a mudança de temperatura da superfície. A região úmida resfria por evaporação e apresenta temperatura inferior em relação à região não úmida, no qual a temperatura obtida na termografia é referente a evaporação superficial (Barreira; Almeida; Delgado, 2016). Investigações de umidade em fachadas de revestimento cerâmico por termografia indicam que, em regime de aquecimento, as regiões úmidas apresentam menor temperatura e durante o resfriamento possuem maior temperatura em relação a região seca (Edis; Flores-Colen; De Brito, 2014a).

O descolamento cerâmico de fachadas pode ser identificado por termografia, pois, para esse defeito, a termografia é uma técnica consolidada e com métodos investigativos definidos. Na identificação de descolamento cerâmico, a região com defeito possui temperatura superior às regiões sem defeito durante o aquecimento, já durante o resfriamento ocorre o oposto (Edis; Flores-Colen; De Brito, 2015b). No aquecimento há aumento da variação de temperatura entre a região com e sem defeito, sendo o descolamento cerâmico mais visível no período inicial do aquecimento, que corresponde ao instante de maior Delta-T (Bauer *et al.*, 2016c; Edis; Flores-Colen; De Brito, 2014b). Investigações de termografia em fachadas de revestimento cerâmico na cidade de Brasília, Brasil, estabelecem critérios de identificação de descolamento cerâmico, nos quais os valores de Delta-T, obtidos no aquecimento e resfriamento, iguais ou superiores a 2 °C, em módulo, são indicativos de descolamento (Bauer, 2023).

A temperatura das fissuras de diferentes dimensões apresenta variação em relação a região sem defeito, onde a profundidade e abertura da fissura estão diretamente relacionadas com as variações do Delta-T, em regime de aquecimento ou resfriamento (Bauer *et al.*, 2016a; Liu *et al.*, 2003). Investigações de termografia aplicadas em fachadas de argamassa, na investigação de fissuras da cidade de Brasília, Brasil, indicam que as fissuras

possuem menor temperatura em regime de aquecimento e maior temperatura em regime de resfriamento, em comparação com a região sem defeito (Bauer *et al.*, 2016b). A aplicação do Delta-T permite mensurar o grau de dano de fissuras em revestimentos de argamassa e atribuir gravidade, onde os valores de Delta-T máximo, em módulo, obtidos nos regimes de aquecimento e resfriamento, estão relacionados com as dimensões da fissura (Bauer *et al.*, 2016c; De Freitas; Freitas; Barreira, 2014; Kylili *et al.*, 2014).

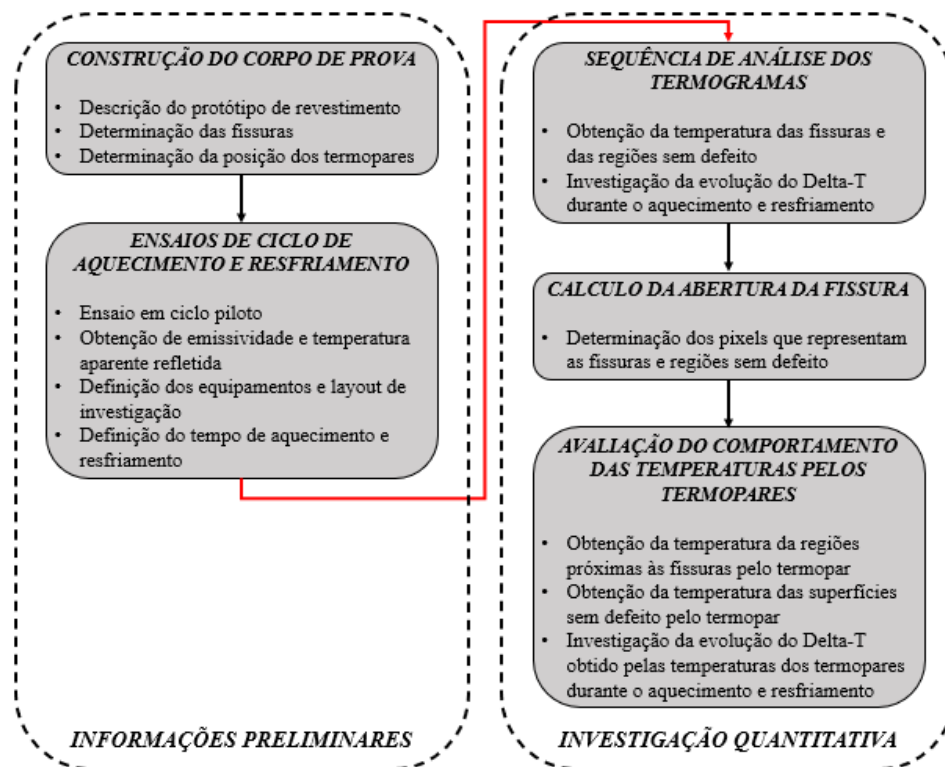
Para o uso da termografia na inspeção de fissuras em fachadas de argamassa é de fundamental importância investigar os padrões de temperatura e métodos de análise de termográfica quantitativa na classificação do dano de fissuras em função da profundidade e suas condições de identificação no aquecimento e resfriamento. Os resultados gerados pela termográfica quantitativa na investigação de anomalias demonstra a possibilidade de apontar o dano causado pelos defeitos, no qual auxilia na inspeção de fachadas (Bauer *et al.*, 2016b; Paoletti *et al.*, 2013).

Métodos

A investigação do padrão de temperatura das fissuras é efetuada por termografia quantitativa, onde é desenvolvida em um corpo de prova, no qual são definidas duas fissuras com profundidades de 10 mm e 20 mm. São definidas duas etapas, uma de aquecimento e outra de resfriamento, nas quais os termogramas são obtidos permitindo a análise pertinente. A avaliação termográfica é efetuada tanto de forma quantitativa, Delta-T, como pela avaliação das temperaturas na região da fissura (T_d) e região sem defeito (T_{nd}). Com a intenção de quantificar as temperaturas, são instalados termopares, estrategicamente posicionados próximos às fissuras, o que permite uma avaliação independente das tendências observadas.

A metodologia é dividida em cinco etapas, como descreve a Figura 1, onde há duas delas referentes a dados preliminares, para estabelecer os parâmetros e rotina da investigação termográfica, e três referentes a investigação quantitativa, aplicação Delta-T por termografia e termopar e mensuração da abertura fissura. As etapas da metodologia são descritas em detalhe a seguir.

Figura 1 - Fluxograma metodologia de investigação de fissuras por termografia



Construção do corpo de prova

O corpo de prova em argamassa é construído a partir de uma placa rígida em argamassa de cimento e areia. Sobre a placa base é moldado uma camada de argamassa de revestimento, na qual são definidas as fissuras.

A preparação dos corpos de prova teve parte do posicionamento adequado, tanto dos termopares como da lâmina de polipropileno, que irá definir cada fissura. As Figuras 2(a) e 2(b) mostram o posicionamento dos termopares nas profundidades especificadas, 10 mm e 20 mm, localizados ao lado da posição de cada fissura. A Figura 2(c) mostra a posição da lâmina de polipropileno para definição da fissura.

O processo de moldagem envolve a produção de uma argamassa convencional de revestimento, cimento e areia, que é aplicada manualmente na forma, conforme ilustra a Figura 3(a). Ao final do lançamento é realizado o acabamento da superfície, onde se obtém uma superfície plana e lisa, conforme a Figura 3(b). Após 8 da moldagem, são removidas as lâminas de polipropileno, obtendo-se então a configuração final do corpo de prova com as respectivas fissuras, conforme ilustra a Figura 3(c). Para o desenvolvimento dos ensaios, na fase de aquecimento e posterior resfriamento, as placas são seladas lateralmente com poliestireno expandido, de forma a induzir que o fluxo de calor seja predominante no sentido da espessura da placa, conforme mostra a Figura 3(d).

Os termopares são empregados para acompanhamento das temperaturas internas e externas. A posição dos mesmos, definida no preparo e moldagem dos corpos de prova, correspondem à mesma posição da profundidade das fissuras, 10 e 20 mm, sendo posicionados a uma distância próxima dessas mesmas fissuras, 15 mm, Figura 4(b). De modo a investigar as possíveis alterações de temperaturas, também se posiciona termopares na face frontal, na interface entre a argamassa e a placa base, e na face posterior do corpo de prova, Figura 4 (b). Os termopares empregados são do tipo K

Para que se possa investigar o comportamento termográfico das fissuras, as mesmas são planejadas de forma linear com profundidades distintas. Não foram geradas por efeitos de carregamento ou retração, e sim, definidas logo após a moldagem com a remoção das fitas de polipropileno. Essa opção é empregada para se obter uma maior precisão da configuração e uniformidade da profundidade. O Quadro 1 apresenta a definição e dimensão das duas fissuras investigadas.

Figura 2 - (a) Forma para moldagem da camada de argamassa; (b) Detalhe de posicionamento do termopar na mesma profundidade da fissura; (c) Lâmina de polipropileno para obtenção da fissura nas profundidades definidas

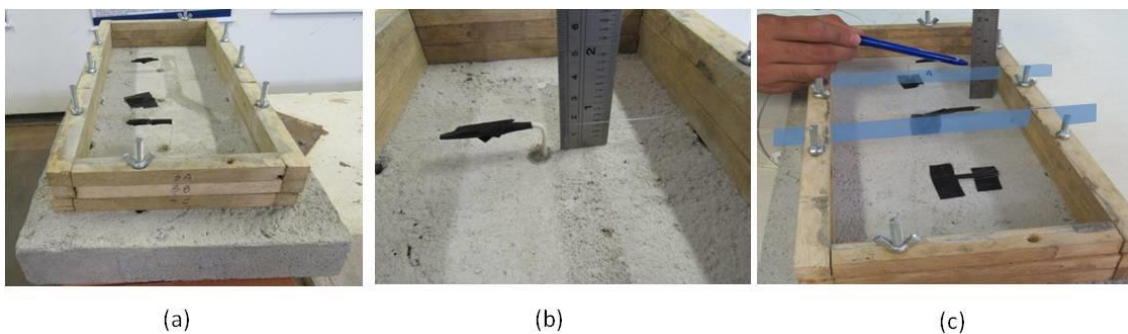


Figura 3 - (a) Moldagem da camada de argamassa; (b) Condição da camada após o acabamento na moldagem; (c) Aspecto final das fissuras de estudo no corpo de prova

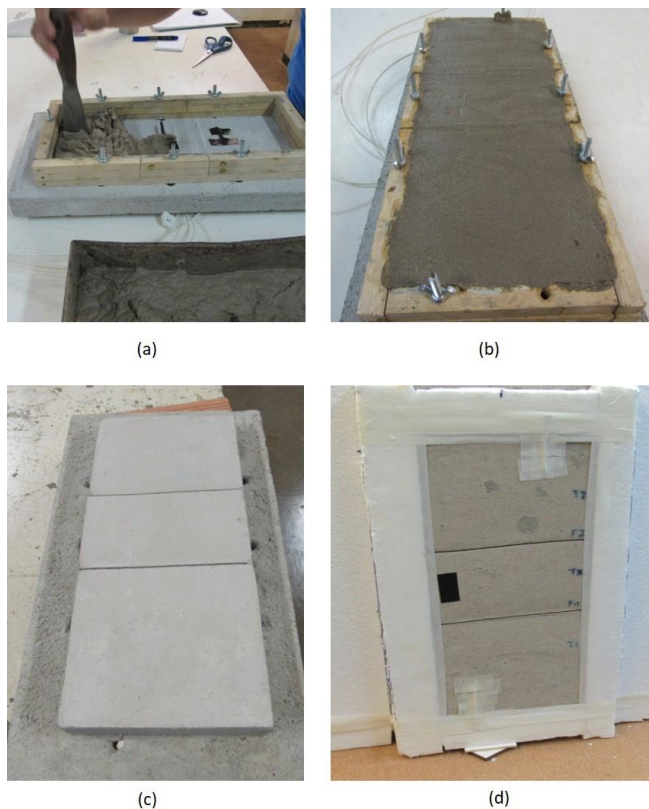
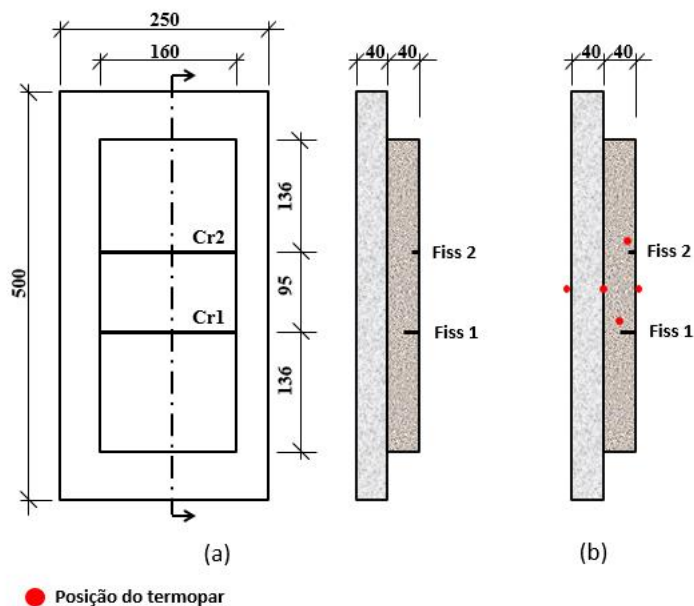


Figura 4 - (a) Detalhe corpo de prova construído para a investigação observando-se as fissuras Fiss 1 e Fiss 2; e (b) Posicionamento dos termopares para monitoramento das temperaturas



● Posição do termopar

Nota: medidas em milímetros.

Quadro 1 - Identificação das dimensões das fissuras

Fissura	Abertura (mm)	Profundidade (mm)
Fiss 1	1,8	20
Fiss 2	1,8	10

Ensaio de ciclo de aquecimento e resfriamento

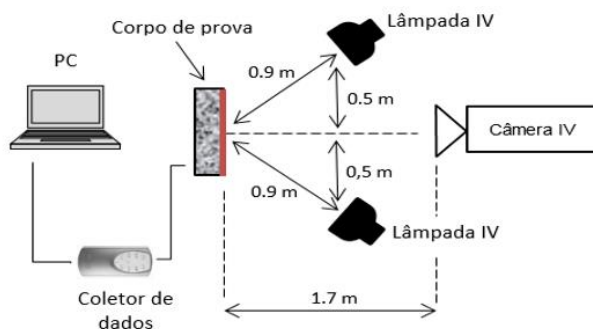
Para o aquecimento do corpo de prova, emprega-se um aparato experimental na placa de ensaios, onde é aplicado o aquecimento por meio de um conjunto de 6 lâmpadas de infravermelho com uma potência total de 1500 W. A duração das etapas de aquecimento e resfriamento é de 120 minutos. O início do resfriamento acontece pelo desligamento das lâmpadas. As temperaturas observadas partem de 25 °C, atingindo em torno de 45 °C na superfície da placa ao final do aquecimento. As temperaturas também são registradas a cada 2 minutos das etapas de aquecimento e resfriamento pelo conjunto de termopares tipo K, com unidade de registro e aquisição PICO USB TC-08. A Figura 5(a) mostra o layout do aparato empregado, no qual a câmera de infravermelho é posicionada a 1,7 m de distância do corpo de prova. As fontes de calor estão a 0,9 m do corpo de prova e distanciadas em 0,5 m do campo de visão da câmera, apontadas para o centro do corpo de prova, possibilitando aquecimento uniforme. As Figuras 5(b) ilustra o conjunto experimental de monitoramento termográfico e aquecimento do corpo de prova. A Figura 5(c) ilustra a visualização da fonte de calor apontada para o corpo de prova.

A aquisição dos termogramas é feita de forma contínua, a cada 4 minutos, durante o aquecimento e resfriamento. É empregada a câmera termográfica FLIR T-400 com faixa espectral de 7,5 a 13,0 μm , com uma faixa de temperatura de -20 a 120 °C. Na câmera é acoplada uma lente de 15°, o que resulta num IFOV de 0,82 mrad, que é o campo de visão da câmera termográfica, que está em função da abertura da lente e de sua resolução.

Para obtenção da temperatura aparente refletida e emissividade, dados necessários para a termografia, é efetuado um ciclo piloto de aquecimento e resfriamento que permite a definição desses parâmetros. A temperatura aparente refletida é determinada pelo método da lâmina de alumínio corrugada, conforme E1862 (ASTM, 2002a). A emissividade é determinada pelo método da emissividade conhecida, conforme prescreve a E1993 (ASTM, 2002b). A emissividade e a temperatura aparente refletida são apresentadas no Quadro 2. A umidade relativa e a temperatura do ar são obtidas empregando-se o medidor EXTECH MO297.

A sequência do experimento inicia com o posicionamento da placa e da câmara termográfica alimentada com os parâmetros de entrada levantados no ciclo piloto. O Quadro 2 apresenta os dados que são inseridos no software da câmara termográfica para a realização de termografia quantitativa. Inicia-se a aquisição dos termogramas obtendo inicialmente 2 imagens para o sistema em repouso. Paralelamente, liga-se o aquisitor de dados iniciando as medições com os termopares. Na sequência, liga-se as lâmpadas iniciando o ciclo direto de aquecimento. Aos 120 minutos as lâmpadas são desligadas, continuando-se a obtenção dos termogramas e das temperaturas dos termopares durante o ciclo de resfriamento. Ao atingir os 240 minutos é finalizado o experimento.

Figura 5 - (a) Layout da investigação termográfica ativa; (b) observação do conjunto experimental submetido a aquecimento; e (c) observação lateral da placa e fontes de calor no ciclo de aquecimento



(a)



(b)



(c)

Quadro 2 - Identificação dos dados de entrada para termografia quantitativa

Parâmetros de entrada	
Emissividade	0,95
Temperatura aparente refletida (°C)	26,0
Distância câmera em relação ao alvo (m)	1,7
Temperatura ambiente (°C)	25,0
Umidade relativa do ar (%)	60,0

Sequência de análises dos termogramas

As temperaturas obtidas pelos termogramas mostram as respectivas evoluções com a progressão dos ciclos de aquecimento e resfriamento. Se determina na fissura a temperatura do defeito (T_d). Na região sem o dano, próxima a fissura, se obtém a temperatura sem dano (T_{nd}). As temperaturas T_d e T_{nd} são determinadas em 4 linhas transversais à fissura, com o emprego do software Flir Tools, conforme descreve a Figura 6. As temperaturas nessas linhas são exportadas em planilha, obtendo-se as temperaturas pixel a pixel ao longo da linha. A temperatura da fissura (T_d) é obtida pela média da temperatura dos pixels da fissura para as 4 linhas, conforme a Figura 6. Para a temperatura sem defeito (T_{nd}), se identifica um patamar de temperaturas relativamente constantes nessas zonas laterais à fissura. Isso permite obter a temperatura média que identifica a zona sem defeito (T_{nd}) com a média das 4 linhas para esse patamar. Essa análise é efetuada para cada termograma, sendo que são obtidos termogramas a cada 4 minutos dos 120 minutos para o aquecimento e para o resfriamento. Ao se obter T_d e T_{nd} se calcula o Delta-T aplicando a Equação 1.

Calculo da abertura da fissura

A avaliação da abertura da fissura por termografia leva em consideração, para a metodologia investigativa, a distância entre a câmera e o alvo, o valor de IFOV da câmera e a quantidade de pixels que representam o defeito, conforme a Equação 2 (Pavón, 2017). O produto dessas 3 variáveis corresponde a abertura da fissura. Os pixels correspondentes à fissura são quantificados a partir das extremidades que representam a região vizinha livre de dano.

$$L = D \cdot IFOV \cdot N^{\circ}Pixels \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

L: abertura da fissura (mm);

D: Distância da câmera termográfica para o alvo (m);

IFOV: Ângulo de abertura da lente (mrad.); e

Nº pixels: número de pixels correspondentes a fissura (n.u.).

Avaliação do comportamento das temperaturas pelos termopares

A análise pelos termopares busca corroborar as avaliações efetuadas pela análise termográfica. A temperatura da face externa que recebe influência direta do aquecimento é denominada, T_{front} . A temperatura nos termopares posicionados na mesma profundidade de cada fissura é denominada respectivamente de temperatura da fissura 1, T_{fiss1} , e temperatura da fissura 2, T_{fiss2} , conforme identifica a Figura 4(b). Todas essas temperaturas permitem uma análise particularizada do fluxo de calor e dos fenômenos que ocorrem durante o aquecimento e o resfriamento. Uma análise importante a ser efetuada, de forma análoga ao Delta-T por termografia, é a obtida pelos termopares, Delta- T_{tmc} . O mesmo avalia a evolução da diferença de temperatura entre T_{front} e T_{fiss} , e é determinado para cada fissura e para cada instante, conforme a Equação 3.

$$Delta-T_{tmc} = T_{front} - T_{fiss} \quad \text{Eq. 3}$$

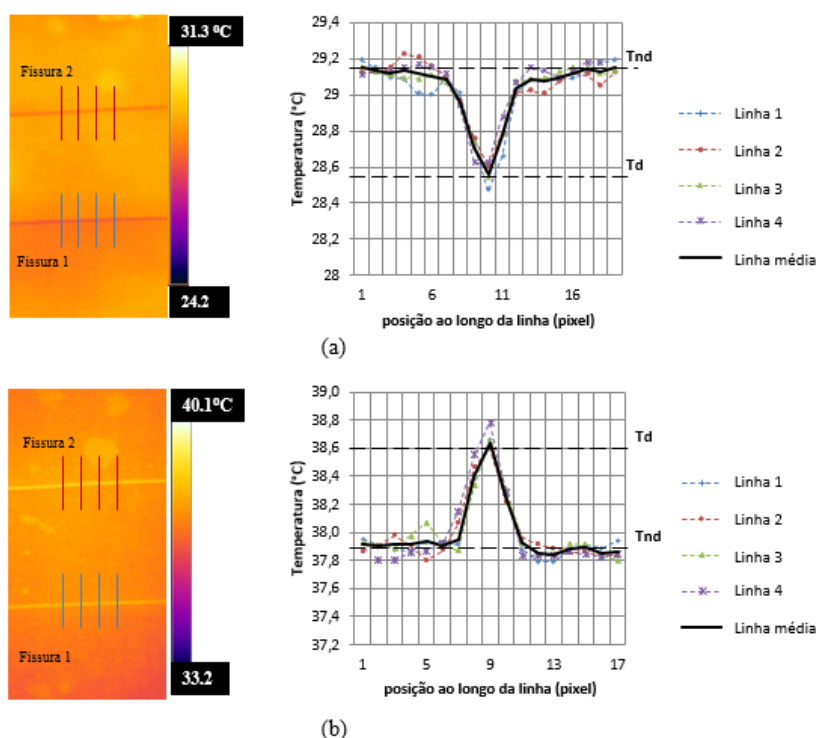
Onde:

Delta- T_{tmc} : Diferença de temperatura entre a termopar próximo a fissura e o termopar da superfície (°C);

T_{front} : Temperatura da superfície frontal da placa obtida pelo termopar (°C); e

T_{fiss} : Temperatura próxima a fissura obtida por termopar (°C).

Figura 6 - (a) Perfil de temperatura no aquecimento observado no software Flir Tools; (b) perfil de temperatura no resfriamento observado no software Flir Tools



Resultados

A investigação em análise busca observar se fissuras com diferentes profundidades são passíveis de identificação e de atribuição de grau de dano na análise termográfica nos ciclos de aquecimento e resfriamento.

As temperaturas atribuídas ao T_d e T_{nd} no aquecimento e resfriamento podem identificar as fissuras a partir dos valores de Delta-T, nos quais sofrem alteração a depender da profundidade da fissura. A identificação das fissuras pelo Delta-T também é possível de observar analogamente com os termopares.

Ciclo de aquecimento e resfriamento

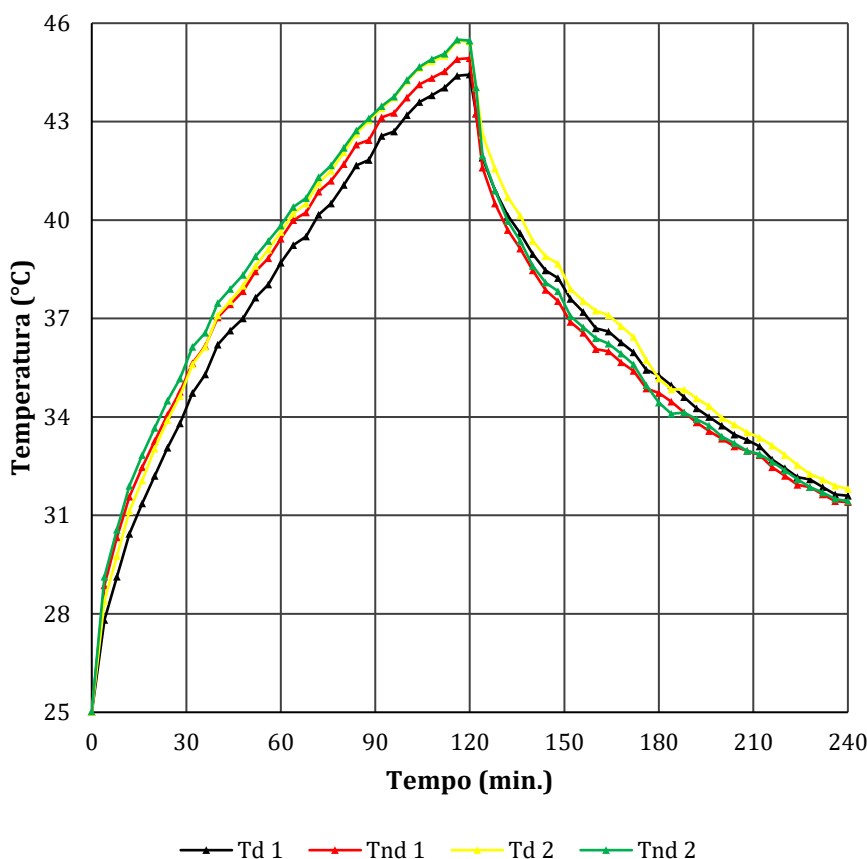
A observação da evolução da temperatura de T_d e T_{nd} é apresentada na Figura 7. Identifica-se a resposta de elevação das temperaturas pelo aquecimento e, a partir dos 8 minutos, já existe uma diferença nítida entre T_d e T_{nd} em ambas as fissuras. Se constata que no transcurso de todo o ciclo de aquecimento, T_{nd} é superior a T_d , ou seja, a fissura tem temperaturas menores. Também se observa um certo grau de paralelismo entre as curvas no transcurso de todo o ciclo.

Para o ciclo de resfriamento, a partir dos 120 minutos, se identifica uma reordenação das tendências a partir dos 128 minutos. A partir desse instante as temperaturas de T_d passam a ser superiores a T_{nd} . Esse comportamento se mantém em quase todo o ciclo de resfriamento em que as fissuras estão mais quentes. Já ao final do ciclo, evidencia-se uma aproximação entre T_d e T_{nd} , o que denota uma tendência ao equilíbrio, pois as temperaturas tendem para uma estabilização próxima à temperatura do ambiente. Isso se comprova pelas temperaturas próximas, T_d e T_{nd} , ao final do ciclo de resfriamento.

Avaliação de Delta-T

O Delta-T é uma das principais avaliações na termografia quantitativa, no qual, para maiores diferenças de temperatura entre o defeito e da região sem defeito, há maiores valores de Delta-T. Assim, tanto a identificação da região da anomalia, fissura, como também a avaliação do grau de dano pode ser considerada a partir dessa análise.

Figura 7 - Evolução de temperatura ao longo do ciclo de aquecimento e resfriamento das fissuras e da região livre de dano da avaliação por termografia



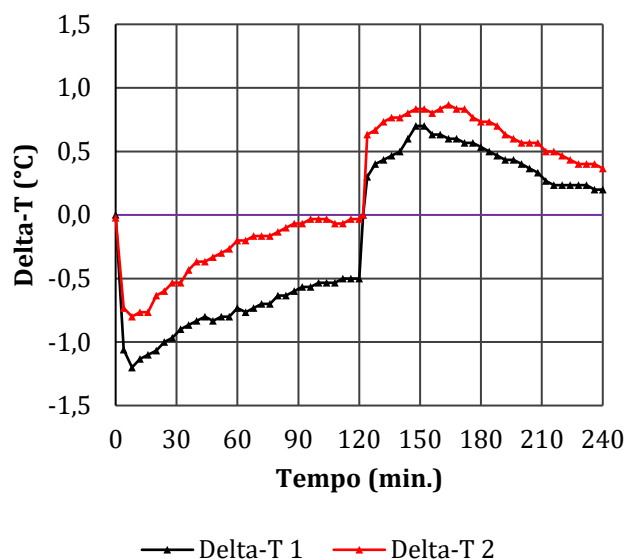
Os valores de Delta-T para as investigações de termografia são apresentados na Figura 8. No ciclo de aquecimento, o Delta-T é negativo, pois a temperatura T_d é menor que a T_{nd} . Se identifica que, partindo do repouso, o Delta-T se incrementa rapidamente já no instante de 8 minutos. A partir daí, com o incremento do aquecimento, o Delta-T tende a aumentar, uma vez que as temperaturas T_d e T_{nd} se aproximam. Para o resfriamento, a partir do tempo de 130 minutos, se observa uma inversão de comportamento. O Delta-T passa a ser positivo, pois T_{nd} se apresenta com valores inferiores a T_d . Com a evolução do resfriamento, o Delta-T reduz em razão da queda das temperaturas pela tendência de equilíbrio no corpo de prova.

Na análise do comportamento termográfico das fissuras, observa-se que, durante o aquecimento, a fissura 1 apresenta valores de Delta-T superiores, em módulo, quando comparada com a fissura 2 ao longo de todo o ciclo, no qual o Delta-T 1 é em torno de 0,6 °C mais negativo do que o Delta-T 2. Essa observação tipifica um padrão de comportamento entre os valores de Delta-T das fissuras, no qual fissuras de maior profundidade apresentam maiores valores de Delta-T, em módulo, durante o aquecimento.

O Delta-T 2 apresenta valores muito próximos de 0 a partir dos 80 minutos de aquecimento, indicando que para a fissura 2, T_{d2} e T_{nd2} estão muito próximas. Nessa condição não se consegue avaliar a fissuração por termografia. Todavia para os tempos anteriores é perfeitamente evidente que o Delta-T é mensurável. Pode-se afirmar que, com o incremento de temperatura, a tendência do Delta-T é tornar-se nulo, pois o fluxo de calor na superfície do revestimento é reduzido, fazendo com que a região com e sem defeito possuam temperatura semelhante. Esse comportamento é mais evidente para fissuras de menor profundidade.

O Delta-T 1, embora reduza os valores, em módulo, não chega a um valor nulo. Possivelmente se o aquecimento se prolongasse por mais tempo, esse equilíbrio seria alcançado. Na presente investigação, ao final do aquecimento, possui valores próximos à -0,5 °C, indicando que ao longo de todo ciclo a temperatura T_{d1} é menor que a T_{nd1} .

Figura 8 - Evolução de Delta-T das fissuras no ciclo de aquecimento e resfriamento



Na fase de resfriamento os valores de Delta-T apresentam maior proximidade entre si em comparação com a fase de aquecimento, no qual ao longo do ciclo os valores de Delta-T seguem de modo paralelo. No resfriamento a fissura 2 possui T_{d2} superior à T_{d1} da fissura 1, o que conduz para maiores valores de Delta-T em todo o resfriamento. Isso demonstra que, durante o resfriamento, fissuras mais próximas da superfície possuem Delta-T superior às fissuras de maior profundidade.

Os valores de Delta-T das fissuras 1 e 2 indicam que, para diferentes condições de aquecimento e resfriamento, a identificação das fissuras se diferencia. Comparando o comportamento do Delta-T, se observa que o Delta-T da fissura 1 é superior, em módulo, durante o aquecimento e o Delta-T da fissura 2 é superior no resfriamento, o que indica que a fissura 2 possui maior temperatura que a fissura 1 em ambos os ciclos. Caso o período de análise fosse maior, seguramente a fissura 1 alcançaria o equilíbrio, Delta-T nulo, na fase de resfriamento antes da fissura 2.

Abertura da fissura

O grau de dano, objeto da inspeção termográfica de fachadas, é avaliado pela profundidade da fissura e por sua abertura. Embora tanto a fissura 1 como a fissura 2 possuam o mesmo valor de abertura, 1,8 mm, se busca estudar se a determinação termográfica dessa dimensão é influenciada pelos condicionantes dos ciclos de aquecimento e resfriamento.

Para o ciclo de aquecimento, a abertura das fissuras 1 e 2 apresenta variações de dimensão quando avaliadas por termografia empregando a equação 2, Tabela 1. O valor de abertura das fissuras mais próximo ao determinado no corpo de prova é o valor de 2,4 mm. Valores maiores indicam imprecisão na avaliação ou condições termográficas que levam a maiores incertezas. Tanto a fissura 1 como a fissura 2 apresentam essa maior divergência ao final do aquecimento e ao início do resfriamento, nos tempos de 120 a 140 minutos. Se identifica nas Figuras 7 e 8 que nesses momentos ocorre a inversão dos ciclos, fim do aquecimento e início do resfriamento, com inversão do Delta-T. Essa condição de proximidade das temperaturas T_d e T_{nd} deve influenciar na precisão das medidas levando a um erro maior. Na evolução do resfriamento ocorre uma definição mais precisa, até o final do ensaio.

Os valores de abertura da fissura 1 e fissura 2 diferem apenas no início do aquecimento e resfriamento, momento em que o Delta-T é máximo, em módulo. As diferenças entre os valores de Delta-T das fissuras não indicam maior ou menor precisão na identificação da abertura, pois ao fim do aquecimento o Delta-T 1 é em torno de 16 vezes maior, em módulo, que o Delta-T 2, porém, para ambas as fissuras, é atribuído 3,3 mm de abertura.

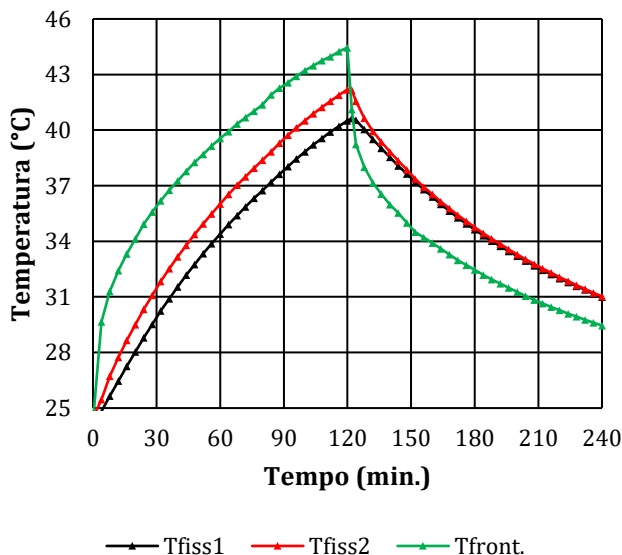
Avaliação do termopar

A investigação com os termopares busca comparar as tendências como os comportamentos observados na investigação termográfica. Três termopares, posicionados na superfície, T_{front} , na posição da fissura 1, T_{fiss1} , e na posição da fissura 2, T_{fiss2} , são apresentados na Figura 9. Se observa que T_{front} é superior durante o ciclo de aquecimento, obviamente sendo resultado do processo e do transporte de calor no sistema. A T_{fiss1} , sendo relativa a uma maior profundidade, possui uma evolução de temperatura mais baixa. T_{fiss2} , sendo mais superficial, possui temperaturas mais elevadas, todavia inferiores à da superfície, T_{front} , durante o aquecimento. Essa evolução é similar ao observado nos termogramas. Para o resfriamento, a partir dos 120 minutos, a T_{front} é inferior às demais em função da inversão do fluxo de calor. As demais temperaturas T_{fiss1} e T_{fiss2} tem comportamento muito similar, não havendo distinção de evolução entre ambas.

Tabela 1 - Identificação da abertura das fissuras 1 e 2 por meio da equação 2. Onde Aq. é ciclo de aquecimento, Re. é o ciclo de resfriamento e L a abertura

Ciclo	Tempo (min.)	Td 1 (°C)	Td 2 (°C)	Tnd 1 (°C)	Tnd 2 (°C)	Delta-T 1 (°C)	Delta-T 2 (°C)	L 1 (mm)	L 2 (mm)
Aq.	12	30,4	31,1	31,6	31,9	-1,13	-0,77	2,4	3,3
Aq.	20	32,2	33,0	33,3	33,7	-1,07	-0,63	2,4	3,3
Aq.	40	36,2	37,1	37,0	37,1	-0,83	-0,37	2,4	2,4
Aq.	60	38,7	39,6	39,4	39,8	-0,73	-0,20	3,3	3,3
Aq.	80	41,1	42,1	41,7	42,2	-0,63	-0,13	2,4	2,4
Aq.	100	43,2	44,2	43,7	44,3	-0,53	-0,03	2,4	2,4
Aq.	120	44,4	45,4	44,9	45,5	-0,50	-0,03	3,3	3,3
Re.	132	40,1	40,7	39,7	40,0	0,43	0,73	3,3	4,1
Re.	140	39,0	39,4	38,5	38,6	0,50	0,77	3,3	3,3
Re.	160	36,7	37,2	36,1	36,4	0,63	0,83	2,4	2,4
Re.	180	35,3	35,2	34,7	34,4	0,53	0,73	2,4	2,4
Re.	200	33,7	34,0	33,3	33,4	0,40	0,57	2,4	2,4
Re.	220	32,4	32,8	32,2	32,4	0,23	0,47	2,4	2,4
Re.	240	31,6	31,8	31,4	31,4	0,20	0,37	2,4	2,4

Figura 9 - Evolução de temperatura ao longo do ciclo de aquecimento e resfriamento das regiões próximas as fissuras e da superfície frontal pela avaliação por termopar



O ΔT_{tmc1} e ΔT_{tmc2} , determinados conforme a Equação 3, a partir das temperaturas nos termopares, são apresentados na Figura 10. Embora a magnitude de valores seja muito diferente da observada nas avaliações termográficas, Figura 8, a tendência dos comportamentos é muito similar. Isso evidencia que as medidas de temperatura obtidas na superfície pelos termogramas, avaliam o mesmo fenômeno corroborando os resultados observados nas investigações. As diferenças nas ordens de grandezas das temperaturas medidas pelos termopares e em relação as obtidas na termografia podem ser associadas à precisão menor dos termopares e pelo fato dos termopares interiores estarem inseridos na argamassa e não na região das fissuras. Todavia, ao se obter um perfil de comportamento similar entre o ΔT e o ΔT_{tmc} , o modelo de comportamento termográfico é validado e as relações de comportamento podem ser estabelecidas, conforme a Figura 8 e Figura 10.

Discussão

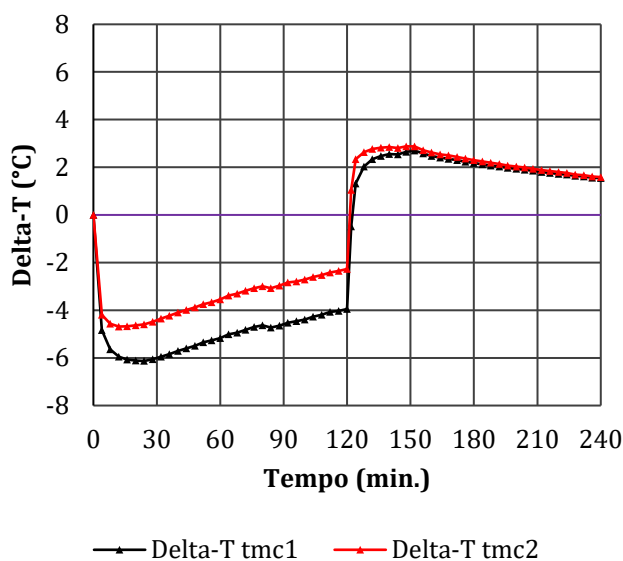
Nas investigações termográficas o ΔT é um dos principais contrastes que permite tanto a identificação do dano como também, em alguns casos, avaliar a gravidade do defeito. O uso corrente do mesmo, em inspeções que buscam avaliar questões de umidade, descolamento ou ainda corrosão das estruturas, dentre outras, mostra a ampla possibilidade de aplicação nas análises termográficas (Barreira; Almeida; Delgado, 2016; Bauer *et al.*, 2016c). O entendimento do comportamento do ΔT sob regimes de aquecimento e resfriamento é uma etapa obrigatória que permite balizar tanto as avaliações como também os critérios de definição dos danos. Devido o comportamento do ΔT se diferenciar, tanto em comportamento como em tendências, em razão do aquecimento ou resfriamento, as inspeções de campo devem se preocupar em monitorar precisamente as condições em que a fachada do edifício está submetida no momento da inspeção. Como as tendências se invertem, é necessário entender como ocorre o fluxo de temperatura durante o aquecimento e resfriamento, nos revestimentos de argamassa, para, em seguida, associar as grandezas termográficas na análise.

As investigações de termografia em fissuras em revestimentos de argamassa com diferentes profundidades demonstram que fissuras de maior profundidade possuem temperatura inferior às fissuras de menor profundidade durante o aquecimento, o que conduz a valores de ΔT maiores, em módulo. Os valores de ΔT das fissuras diminuem, em módulo, com a evolução do aquecimento, pois todo o sistema aquece e as diferenças de temperatura passam a ser menores em todo o revestimento. Os valores de ΔT superiores, em módulo, da fissura 1, em comparação com a fissura 2, durante aquecimento, ocorrem porque defeitos de maior profundidade possuem menor temperatura quando o sentido do aquecimento inicia na superfície da região sem defeito (Oswald-Tranta, 2018). A fissura 2, mais próxima da superfície, possui maior temperatura no aquecimento, o que conduz a valores de ΔT menores, em módulo, quando comparados com a fissura mais profunda (Liu *et al.*, 2003). Com a evolução do aquecimento a temperatura da fissura 2 é igual a temperatura da superfície, que conduz a valores nulos de ΔT . No aquecimento a fissura 1 possui maior ΔT em módulo, onde a temperatura da fissura e da região sem defeito se diferem ao longo de todo o ciclo. A fissura 2 apresenta menor valor de ΔT , em módulo, no aquecimento e, com a evolução do ciclo, tende à valores nulos de ΔT , o que indica que nesse ciclo os maiores valores de ΔT em módulo então relacionados com fissuras de maior profundidade.

No resfriamento o ΔT da fissura 2 é superior a fissura 1, o que leva a uma análise distinta com comportamentos diferenciados. O comportamento de ΔT das fissuras ao longo dos ciclos enseja que em uma inspeção é fundamental identificar a condição de aquecimento ou resfriamento, para então realizar uma análise classificatória sobre a profundidade da fissuração. No aquecimento a fissura mais profunda é identificada por valores mais negativos de ΔT , enquanto no resfriamento a fissura mais superficial é identificada por maiores valores de ΔT . As investigações conduzem que a evolução do ΔT ao longo dos ciclos é conclusiva para a classificação da profundidade da fissura (Rodríguez-Martín *et al.*, 2015).

A identificação das fissuras é conduzida pela evolução do ΔT , o qual difere ao longo dos ciclos e é dependente da profundidade das fissuras. Durante o aquecimento, a fissura 1 é identificada mais facilmente que a fissura 2, pois possui um ΔT maior, em módulo. No fim do aquecimento, a fissura 2 possui maior dificuldade de ser identificada quando comparada à fissura 1, pois seus valores de ΔT são próximos de zero. No aquecimento, ambas as fissuras são identificadas no início do ciclo e apenas a fissura 1 é identificada no fim do ciclo, indicando que a fissura 2 não pode ser identificada durante toda a evolução do aquecimento. Resultados semelhantes são apresentados na identificação de umidade por termografia em fachadas de argamassa. As investigações indicam que termogramas obtidos nos momentos iniciais em que a fachada se encontra em aquecimento são suficientes para identificar as regiões úmidas (Edis; Flores-Colen; De Brito, 2015a).

Figura 10 - Evolução do Delta-T obtido por termopar no aquecimento e resfriamento



Durante a evolução do ciclo de resfriamento, os valores de Delta-T da fissura 1 e fissura 2 se mantêm distantes de zero, o que possibilita a identificação de ambas as fissuras no início e fim do ciclo. As investigações indicam que a identificação das fissuras difere a depender das condições de aquecimento ou resfriamento. Conseqüentemente, o ciclo de resfriamento é mais adequado para a identificação das fissuras, pois os valores de Delta-T, de ambas as fissuras, são distantes de zero durante toda a evolução do ciclo.

Comparando o comportamento de Delta-T na investigação de fissuras e descolamento cerâmico, tem-se que no descolamento cerâmico o Delta-T é inverso ao observado para fissuras, sendo positivo no aquecimento e negativo no resfriamento. No entanto, para ambos os defeitos, os maiores valores de Delta-T se encontram no início dos ciclos. (Bauer, 2023; Bauer *et al.*, 2016c). Para ambas as investigações, fissuras e descolamento cerâmico, é indicado que os defeitos são melhor identificados quando o Delta-T é positivo, conduzindo que a condição mais adequada para a identificação de defeitos ocorre quando o defeito possui maior temperatura em relação à região livre de dano.

A abertura das fissuras obtida pela aplicação da equação 2 apresenta valores iguais para ambas as fissuras, no aquecimento e no resfriamento. Na evolução do aquecimento há maior oscilação dos valores de abertura, já no resfriamento os valores de abertura da fissura 1 e da fissura 2 tendem a estabilidade. O comportamento da abertura da fissura no aquecimento e resfriamento indicam que as investigações realizadas no resfriamento possuem maior precisão, pois os valores de Delta-T, de ambas as fissuras, são distantes de zero durante a evolução do ciclo. Mesmo as fissuras 1 e 2 tendo valores de Delta-T diferentes ao longo do aquecimento e resfriamento, os valores de abertura obtidos são iguais, o que indica que o Delta-T está relacionado com a precisão de mensuração e não com o valor atribuído à abertura da fissura.

As tendências observadas e apresentadas do comportamento do Delta-T são corroboradas pelas leituras observadas nos termopares. Se deve mencionar que o termograma quantifica as temperaturas superficiais que são empregadas na definição do Delta-T. As leituras dos termopares já são valores obtidos na superfície de aquecimento no interior das camadas de argamassa, em posição de profundidade idêntica posição das fissuras. A similaridade de tendências entre a Figura 8 e a Figura 10 ilustra que o fenômeno observado pelos termogramas na superfície é o fenômeno físico oriundo dos fluxos de calor na placa estudada. Ao observar esse comportamento nos termopares, se pode, inclusive, deduzir que as temperaturas na fissura são fortemente condicionadas pelas temperaturas das regiões próximas, principalmente na mesma espessura da camada em relação a profundidade da fissura. Esse comportamento ficou mais evidente no aquecimento, mas também se observa no resfriamento, conforme a Figura 9.

Conclusões

A investigação de termografia, aplicada para a classificação e condição de identificação de fissuras em revestimentos de argamassa, é conduzida pela evolução do Delta-T no aquecimento e resfriamento. Os

resultados indicam que fissuras de maior profundidade possuem maior Delta-T, em módulo, durante o aquecimento, enquanto fissuras de menor profundidade possuem maior Delta-T no resfriamento. A investigação quantitativa de fissuras, por meio da termografia, está relacionada com os valores de Delta-T obtidos e os intervalos de tempo de investigação, nos quais conduzem as seguintes afirmações:

- (a) no aquecimento o Delta-T das fissuras é negativo, enquanto no resfriamento o Delta-T é positivo, o que indica que a temperatura da fissura é inferior no aquecimento e superior no resfriamento em relação a região sem defeito;
- (b) fissuras mais rasas possuem maior temperatura no aquecimento e no resfriamento em comparação as fissuras mais profundas. Por estarem mais próximas a superfície, são facilmente aquecidas, enquanto fissuras de mais profundas aquecem de forma mais lenta, resultando em menor temperatura. A diferença de temperatura entre as fissuras indica que as fissuras são classificadas quanto a sua profundidade em função do Delta-T observado em cada caso;
- (c) a fissura mais profunda apresenta maior Delta-T, em módulo, no regime de aquecimento. Já a fissura menos profunda apresenta evolução de Delta-T inferior, alcançando valores nulos ao final do ciclo de aquecimento. Essa observação indica que, em inspeções de fachada, em regime de aquecimento, as fissuras de maior profundidade possuem maior Delta-T, em módulo, comparado as fissuras mais próximas a superfície, que a depender do tempo de aquecimento não são identificadas;
- (d) no resfriamento, a fissura mais rasa apresenta Delta-T superior a fissura mais profunda e no fim do ciclo, os valores de Delta-T são superiores, em módulo, aos observados no fim do aquecimento. No resfriamento o comportamento do Delta-T se inverte quando comparado com o aquecimento, o que conduz que em investigações de fachadas em regime de resfriamento, os maiores valores de Delta-T são atribuídos as fissuras mais próximas a superfície;
- (e) a identificação das fissuras está relacionada com a evolução do Delta-T, no qual a condição de melhor identificação para ambas as fissuras ocorre no início do aquecimento e resfriamento, instantes nos quais o Delta-T atinge o seu valor máximo em módulo tanto para a fissura 1 como para a fissura 2. Devido à identificação ser maior com o aumento do Delta-T, as fissuras mais profundas são melhor identificadas no aquecimento do que as fissuras mais superficiais e no resfriamento essa condição se inverte;
- (f) a medição da abertura da fissura é mais precisa no resfriamento do que no aquecimento. Em uma inspeção de campo é necessário identificar a condição em que a fachada se encontra, para identificação da largura da fissura;
- (g) a semelhança de comportamento entre o Delta-T obtido por termografia e por termopares corrobora que o comportamento de temperatura obtido por termografia é semelhante ao fluxo de calor que corre entre a superfície do revestimento e a região próxima a fissura; e
- (h) em uma investigação termográfica em campo (termografia passiva), a identificação do sentido do fluxo de calor, aquecimento e resfriamento, na superfície da fachada é determinante para a classificação e identificação das fissuras. A depender, se a fachada está em aquecimento ou resfriamento, os valores de Delta-T se invertem e são diferentes em função da profundidade da fissura, sendo fundamental realizar inspeções termográficas tanto como aquecimento como no resfriamento.

Referências

- AIDAR, L. A. G. **Metodologia de inspeção e análise de termogramas para estudo de fachadas em revestimento cerâmico**. Brasília, 2019. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- AIDAR, L.; BAUER, E. Correction of thermographic contrast values in relation to the average temperature of the region for comparative analysis of anomalies exposed to different thermal flows. **Proceedings**, v. 1, p. 23, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 1862**: standard test methods for measuring and compensating for reflected temperature using infrared imaging radiometers. West Conshohocken, 2002a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 1933–99a**: standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers. West Conshohocken, 2002b.

- BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; DELGADO, J. M. P. Q. Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 251–269, 2016.
- BARREIRA, E.; ALMEIDA, R. M. S. F.; PEREIRA, M. Evaluation of heat transfer in humidification phenomena: comparison between infrared thermography and numerical simulation. **MATEC Web of Conferences**, v. 282, n. 2019, p. 02032, 2019.
- BAUER, E. Critérios para identificação e diagnóstico de anomalias em fachadas cerâmicas através da termografia infravermelha quantitativa. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 23, n. 2, p. 101–119, abr./jun. 2023.
- 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.* Criteria for identification of ceramic detachments in building facades with infrared thermography. **Building Pathology and Rehabilitation**, p. 51–68, 2016c.
- BAUER, E. *et al.* Facades inspection with infrared thermography: cracks evaluation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, p. 7, 2016b.
- BAUER, E. *et al.* Infrared thermography: evaluation of the results reproducibility. **Structural Survey**, v. 33, n. 1, p. 20–35, 2015.
- BAUER, E. *et al.* Relative importance of pathologies in the severity of facade degradation. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2020.
- BAUER, E.; MILHOMEM, P. M.; AIDAR, L. A. G. Evaluating the damage degree of cracking in facades using infrared thermography the elements for allowing degradation agents such as. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 8, p. 12, 2018.
- BAUER, E.; PAVON, E. Termografia de infravermelho na identificação e avaliação de manifestações patológicas em edifícios. **Concreto & Construção**, v. 79, p. 93–98, sep. 2015.
- BAUER, E.; SOUZA, J. S.; MOTA, L. M. G. Degradação de fachadas revestidas em argamassas nos edifícios de Brasília, Brasil. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 4, p. 23–43, out./dez. 2021.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS ISO 15686-1**: buildings and constructed assets: service lifeplanning: part 1: general principles and framework. London, 2011.
- CARRETERO-AYUSO, M. J.; MORENO-CANSADO, A.; BRITO, J. de. Study of the prevalence of critical and conflict-prone points in facades. **Engineering Failure Analysis**, v. 75, p. 15–25, 2017.
- DE FREITAS, S. S.; FREITAS, V. P. de; BARREIRA, E. Detection of façade plaster detachments using infrared thermography: a nondestructive technique. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 80–87, 2014.
- DIAS, R. *et al.* Mapping External Mortar Render (EMR) defects: case study in multi-storey residential buildings. **Alconpat**, v. 11, n. 3, p. 88–107, 2021.
- 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, n. 1, 2015b.
- 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, 2014a.
- EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis. **Building and Environment**, v. 94, n. P1, p. 97–108, 2015a.
- EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Time-dependent passive infrared thermographic inspection of facades. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DURABILITY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTES, 13., São Paulo, 2014. **Proceedings [...]** São Paulo, 2014b.
- FLORES-COLEN, I.; BRITO, D.; FREITAS, D. Methodology for in-service performance assessment of rendering façades for predictive maintenance. In: CIB WORLD CONGRESS 2010 – BUILDING A BETTER WORLD, Salford Quays, 2010. **Proceedings [...]** Salford Quays, 2010.

- FREITAS, J. G. de; CARASEK, H.; CASCUDO, O. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 57–73, jan./mar. 2014.
- GARRIDO, I. *et al.* Building façade protection using spatial and temporal deep learning models applied to thermographic data. laboratory tests. **Engineering Proceedings**, v. 8, n. 1, 2021.
- GARRIDO, I. *et al.* Introduction of active thermography and automatic defect segmentation in the thermographic inspection of specimens of ceramic tiling for building façades. **Infrared Physics and Technology**, v. 121, 2022.
- GLAVAŠ, H. *et al.* Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography. **Buildings**, v. 9, n. 2, 2019.
- HART, J. M. A practical guide to infra-red thermography for building surveys. **Building Research Establishment**, p. 2–100, 1992.
- IBARRA-CASTANEDO, C. *et al.* Solar loading thermography: time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. **Infrared Physics and Technology**, v. 82, p. 56–74, 2017.
- INFRARED TRAINING CENTER. **Termografia Nivel 1 - Manual do Curso**. Sorocaba: Infrared Training Center, 2008.
- KAHSAY, M. T.; BITSUAMLAK, G.; TARIKU, F. Numerical analysis of convective heat transfer coefficient for building facades. **Journal of Building Physics**, v. 42, n. 6, p. 727–749, 2019.
- KYLILI, A. *et al.* Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: a review. **Applied Energy**, v. 134, p. 531–549, 2014.
- LIU, H. *et al.* Detection of defects in thermal barrier coatings by thermography analyses. **Materials Transactions**, v. 44, n. 9, p. 1845–1850, 2003.
- LUCENAS, R.; BAUER, E.; PAVÓN, E. Diferenças nos padrões de identificação termográfica de vários materiais e defeitos. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, 17., Fortaleza, 2021. **Proceedings [...]** Fortaleza, 2021.
- MALDAGUE, X. P. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. **Wiley**, New York v. 1, 2001.
- OSWALD-TRANTA, B. Induction thermography for surface crack detection and depth determination. **Applied Sciences**, v. 8, n. 2, 2018.
- PAOLETTI, D. *et al.* Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation. **Journal of Cultural Heritage**, v. 14, n. 2, p. 116–121, 2013.
- PAVÓN, E. **Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho**. Brasília, 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil e Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.
- RODRÍGUEZ-MARTÍN, M. *et al.* Prediction of depth model for cracks in steel using infrared thermography. **Infrared Physics and Technology**, v. 71, p. 492–500, 2015.
- SANTOS, D. G. **Estudo da vida útil e degradação de fachadas em argamassa a partir da inspeção de edifícios**. Brasília, 2018. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- SFARRA, S.; BARREIRA, E.; LAGÜELA, S. Special issue on “infrared thermography and additional non-destructive testing for building, structure and material inspections”. **Sensors**, v. 21, n. 9, p. 2–5, 2021.
- SILVA, A.; BRITO, J. de; GASPAR, P. L. Methodologies for service life prediction of buildings: with a focus on façade claddings. **Springer**, Lisboa, v. 1, 2016.
- SILVA, A.; GASPAR, P. L.; BRITO, J. de. Durability of current renderings: a probabilistic analysis. **Automation in Construction**, v. 44, p. 92–102, 2014.
- TEJEDOR, B. *et al.* Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades. **Energy and Buildings**, v. 151, p. 187–197, 2017.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Ensaios de Materiais da Universidade de Brasília (LEM -UnB), pelo custeio do desenvolvimento da experimentação investigativa deste trabalho. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Matheus de Souza Silva

Conceitualização, Análise de dados, Recebimento de financiamento, Pesquisa, Design da apresentação de dados, Redação - revisão e edição.

Departamento de engenharia civil e ambiental | Universidade de Brasília | Campus Darcy Ribeiro | Brasília - DF - Brasil | CEP 70910-900 | Tel.: (85) 98855-4351 | E-mail: matheus.engcv@outlook.com

Elton Bauer

Curadoria de dados, Recebimento de financiamento, Metodologia, Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Universidade de Brasília | E-mail: elbauerlem@gmail.com

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Editoras de seção: **Ercília Hitomi Hirota e Juliana Parise Baldauf**

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.