



UFC

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

SIZY BRENDA DE MELO

**APLICAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHO PARA IDENTIFICAÇÃO
DE DESPLACAMENTO CERÂMICO**

FORTALEZA

2024

SIZY BRENDA DE MELO

APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHO PARA IDENTIFICAÇÃO DE
DESPLACAMENTO CERÂMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M486a Melo, Sizy Brenda de.
Aplicação da termografia infravermelho para identificação de deslocamento cerâmico / Sizy Brenda de Melo. – 2023.
83 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita.

1. Técnicas não destrutivas. 2. Termografia infravermelha. 3. Deslocamento cerâmico. 4. Processamento térmico de imagens. I. Título.

CDD 624.1

SIZY BRENDA DE MELO

APLICAÇÃO DE TERMOGRAFIA INFRAVERMELHO PARA IDENTIFICAÇÃO DE
DESPLACAMENTO CERÂMICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Rachel Martini
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET)

Prof. Dra. Lais Cristina Barbosa Costa
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Elizeth e Siso.

Ao meu noivo, Arnon.

Aos meus irmãos, Sidney e Gregory.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por me fazer forte frente às adversidades.

Aos meus familiares, pelo amor, apoio e incentivo no decorrer de toda a minha vida.

Ao meu estimado e amado noivo Arnon Conrado, pelo companheirismo e estímulo frente aos desafios que me disponho a explorar e vencer.

Aos meus queridos amigos que celebram minhas conquistas ao longo dos anos e, também, aos demais amigos da Universidade Federal do Ceará pela parceria.

Ao meu querido professor orientador, Esequiel Mesquita, pela confiança, disponibilidade, compreensão e os sábios conselhos.

A banca, em nome dos professores Elton Bauer e Lais Costa, por terem aceito o convite e, conseqüentemente, dedicado tempo e colaborado com valiosas sugestões.

Aos colaboradores do Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB) pelo apoio e incentivo.

A equipe de manutenção predial da UFC, campus Russas, em especial ao Lino, pela colaboração.

Ao pessoal do Laboratório de Materiais de Construção da UFC, campus Russas, pela colaboração e incentivo, em especial, aos técnicos Alisson e Mickely.

A empresa Votorantim Cimentos por ter nos doado parte dos materiais utilizados na pesquisa.

Ao fim, agradeço a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo suporte financeiro ao desenvolvimento da presente pesquisa.

“O ontem não é nosso para recuperar, mas o
amanhã é nosso para ganhar ou perder”
(LYNDON B. JOHNSON).

RESUMO

As estruturas estão sujeitas à ação direta de agentes ambientais como umidade e variações de temperatura. Essas condições podem influenciar fortemente a degradação dos materiais e até acelerá-las. Nas fachadas dos edifícios, a degradação intensifica a infiltração de águas pluviais e a perda de aderência dos revestimentos cerâmicos. A identificação precoce do deslocamento por inspeção visual ainda é um desafio. A tendência observada nos relatos da literatura é que a termografia infravermelha seja uma ferramenta alternativa capaz de identificar danos em fachadas além de outras aplicações. No entanto, esta técnica ainda não está suficientemente desenvolvida e são necessários avanços para uma aplicação em grande escala. A termografia é um ensaio não destrutivo que mede e registra a variação de temperatura infravermelha na superfície de um material de acordo com a emissividade. Os termogramas podem ser registrados sem contato direto com a superfície analisada, portanto, sem danificar a estrutura. O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a aplicabilidade da técnica não destrutiva de termografia de infravermelho para identificação de deslocamento cerâmico. Para tal, foram feitas inspeções ao longo do dia em diferentes cores de revestimento para duas épocas do ano. A distância de captura da imagem, temperatura, posição do sol, características das placas cerâmicas, os efeitos de borda e a influência dos reflexos e sombreamento são discutidos. Os resultados indicam que os deslocamentos cerâmicos ganham calor mais rápido na fase de aquecimento e se dissipam primeiro na fase de arrefecimento. Os deslocamentos são facilmente notados em revestimentos de cores escuras, enquanto que revestimentos de cores claras sofrem frequentemente com a influência de fatores externos, sobretudo em épocas chuvosas. Os horários de maior precisão ocorrem das 7h às 18h. No geral, a termografia infravermelha demonstra ser uma técnica em potencial por apresentar um índice consideravelmente elevado de assertividade.

Palavras-chave: técnicas não destrutivas; termografia infravermelha; deslocamento cerâmico; processamento térmico de imagens.

ABSTRACT

Structures are subject to the direct action of environmental agents such as humidity and temperature variations. These conditions can strongly influence the degradation of materials and even accelerate it. On building facades, degradation intensifies the infiltration of rainwater and the loss of adhesion of ceramic coverings. Early identification of flaking by visual inspection is still a challenge. The trend observed in literature reports is that infrared thermography is an alternative tool capable of identifying damage to facades in addition to other applications. However, this technique is not yet sufficiently developed and advances are needed for large-scale application. Thermography is a non-destructive test that measures and records the infrared temperature on the surface of a material according to emissivity. Thermograms can be recorded without direct contact with the analyzed surface, therefore, without damaging the structure. The main objective of this research is to characterize the thermal behavior of peeled and well-adhered areas using infrared thermography, considering multi-parameters. To this end, inspections were carried out throughout the day on different coating colors for two times of the year. Image capture distance, temperature, sun position, characteristics of ceramic plates, edge effects and the influence of reflections and shading are discussed. The results indicate that ceramic flakes gain heat faster during the heating phase and dissipate first during the cooling phase. Peelings are easily noticed in dark-colored coatings, while light-colored coatings often suffer from the influence of external factors, especially in rainy seasons. The most accurate times are from 7am to 6pm. Overall, infrared thermography proves to be a potential technique as it presents a considerably high level of assertiveness.

Keywords: non-destructive techniques; infrared thermography; ceramic detachment; thermal image processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Seções que compõem a estrutura da dissertação.....	17
Figura 2 -	Fontes de radiação e suas componentes: Radiação incidente (W_{INC}); Radiação absorvida (W); Radiação refletida (W); Radiação emitida (W).....	22
Figura 3 -	Representação esquemática dos elementos de radiação capturados por uma câmera termográfica.....	24
Figura 4 -	Alvenaria revestida com pastilhas cerâmicas de diferentes emissividades exposta à mesma temperatura: (a) Imagem visual; (b) Imagem térmica.....	25
Figura 5 -	Comportamento das pontes térmicas advindas de deslocamentos cerâmicos: (a) Esquematisação das zonas deslocadas; (b) Fase de aquecimento; (c) Fase de arrefecimento.....	26
Figura 6 -	Interferência do reflexo em análises termográficas.....	27
Figura 7 -	Fatores que afetam a detecção de deslocamentos cerâmicos por TRI.....	28
Figura 8 -	Esquema de classificação da termografia infravermelha.....	29
Figura 9 -	Distribuição do número de artigos publicados considerando as palavras-chave ensaio não destrutivo, destacamento cerâmico, processamento térmico/imagem e termografia infravermelha.....	33
Figura 10 -	Distribuição do número de artigos publicados por ano.....	34
Figura 11 -	Enquadramento metodológico da pesquisa.....	38
Figura 12 -	Esquema das etapas que compõem o delineamento da pesquisa.....	39
Figura 13 -	Representação do processo construtivo: (a) Assentamento do bloco cerâmico; (b) Chapisco; (c) Emboço; (d) Assentamento do revestimento cerâmico; (e) Simulação de áreas deslocadas; (f) Aplicação do rejunte	41

Figura 14 - Materiais prontos utilizados para o assentamento e acabamento da alvenaria: (a) Argamassa matrix 5201; (b) Argamassa matrix 2202; (c) Argamassa colante ACIII flexível; (d) Rejunte flexível da Quartzolit.....	42
Figura 15 - Representação esquemática do projeto de alvenaria com a identificação e localização das áreas deslocadas nas diferentes cores do revestimento.....	43
Figura 16 - Representação esquemática do processo de realização dos registros termográficos.....	44
Figura 17 - Materiais utilizados: (a) Câmera termográfica, (b) Medidor de temperatura.....	45
Figura 18 - Variação da temperatura ambiente ao longo do dia em dois períodos de avaliação, época seca e chuvosa.....	46
Figura 19 - Comportamento da umidade relativa do ar e da radiação solar ao longo do dia na época seca e chuvosa.....	46
Figura 20 - Indicação de informações presentes nas imagens termográficas.....	47
Figura 21 - Parâmetros editáveis no programa FLIR Tools.....	48
Figura 22 - Termogramas de um dia predominantemente ensolarado: (a) sem incidência solar, (b) início de aquecimento, (c) 1h após o início de aquecimento, (d) 2h após o início de aquecimento, (e) 3h após o início de aquecimento, (f) 4h após o início de aquecimento, (g) 5h após o início de aquecimento, (h) 6h após o início de aquecimento, (i) 7h após o início de aquecimento, (j) início de arrefecimento, (k) 1h após o início de arrefecimento, (l) 2h após o início de arrefecimento, (m) 3h após o início de arrefecimento, (n) 4h após o início de arrefecimento, (o) 5h após o início de arrefecimento, (p) 6h após o início de arrefecimento.....	50
Figura 23 - Termogramas de um dia parcialmente nublado: (a) início de	

	aquecimento, (b) 1h após o início de aquecimento com passagem de nuvens carregadas, (c) 2h após o início de aquecimento com leve precipitação, (d) 3h após o início de aquecimento com ventos fortes, (e) 4h após o início de aquecimento com ventos fortes, (f) 5h após o início de aquecimento com ventos fortes, (g) 6h após o início de aquecimento com ventos fortes, (h) início de arrefecimento, (i) 1h após o início de arrefecimento com incidência de sombreamento, (j) 2h após o início de arrefecimento com incidência de sombreamento, (k) 3h após o início de arrefecimento, (l) 4 horas após o início do arrefecimento	51
Figura 24 -	Comparação de uma alvenaria com revestimento cerâmico branco e preto em visual e infravermelho: (a) Foto visual, (b) Imagem térmica	52
Figura 25 -	Incidência do reflexo do operador sobre o revestimento cerâmico.....	55
Figura 26 -	Variação da localização do reflexo devido à movimentação do operador e mudança de inclinação da câmera termográfica	56
Figura 27 -	Representação dos efeitos de borda: (a) Área de ocorrência da zona de borda; (b) Interferência das zonas de bordas na detecção dos deslocamentos	57
Figura 28 -	Detecção do deslocamento cerâmico: (a) esquema ilustrativo; (b) termograma com foco no revestimento branco; (c) termograma em airon com foco no revestimento branco; (d) partilhas brancas arrancadas da alvenaria; (e) esquema ilustrativo; (f) termograma com foco no revestimento preto; (g) termograma em airon com foco no revestimento preto; (h) partilhas pretas arrancadas da alvenaria.....	58
Figura 29 -	Temperaturas médias máximas obtidas em áreas de revestimentos bem aderidos nas cores branco e preto: (a) Época seca; (b) Época chuvosa.....	60

- Figura 30 - Variações térmicas para todos os revestimentos deslocados ao longo do dia: (a) Revestimento branco em época seca; (b) Revestimento preto na época seca; (c) Revestimento branco em época chuvosa; (d) Revestimento preto em época chuvosa..... 61
- Figura 31 - Temperatura média entre zonas deslocadas e bem aderidas ao longo do dia: (a) Revestimento branco em época seca; (b) Revestimento preto na época seca; (c) Revestimento branco em época chuvosa; (d) Revestimento preto em época chuvosa..... 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise comparativa da metodologia adotada em trabalhos que tratam da aplicação da termografia infravermelha para detecção de defeitos em construções.....	35
Tabela 2 - Técnicas de processamento de imagens térmicas.....	37
Tabela 3 - Detecção de deslocamento cerâmico em função da temperatura ambiente e horário de avaliação.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contexto e justificativa.....	14
1.2	Problema de pesquisa	14
1.3	Objetivos	16
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	16
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
1.4	Estrutura da dissertação	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Breve história do desenvolvimento da termografia	19
2.2	Fundamentos teóricos sobre termografia infravermelha	20
2.2.1	<i>Fundamentos de transferência de calor e teoria de medição de temperatura</i>	20
2.2.2	<i>Operação de câmeras termográficas dedo quebrado</i>	23
2.2.3	<i>Interpretação de imagens térmicas</i>	25
2.2.4	<i>Fatores que influenciam a detecção de deslocamentos cerâmicos por termografia infravermelha</i>	28
2.2.5	<i>Classificação da termografia infravermelha</i>	30
2.2.5.1	<i>Classificação por esquema de análise</i>	31
2.2.5.2	<i>Classificação por modo de medição</i>	31
2.2.5.3	<i>Classificação por método de medição</i>	32

2.3	Avanços nas técnicas da termografia infravermelha.....	33
2.4	Abordagens de processamento de imagens térmicas	37
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	Enquadramento metodológico da pesquisa.....	38
3.2	Delineamento da pesquisa.....	39
3.2.1	<i>Estudo teórico</i>	<i>39</i>
3.2.2	<i>Estado da arte</i>	<i>40</i>
3.2.3	<i>Construção e caracterização do painel experimental</i>	<i>40</i>
3.2.4	<i>Coleta de dados</i>	<i>43</i>
3.2.4.1	<i>Descrição do experimento.....</i>	<i>43</i>
3.2.4.2	<i>Materiais utilizados na coleta de dados</i>	<i>44</i>
3.2.6	<i>Caracterização climática dos dias de inspeção.....</i>	<i>45</i>
3.2.7	<i>Caracterização de imagens termográficas.....</i>	<i>47</i>
3.2.8	<i>Processamento de dados qualitativos e quantitativo.....</i>	<i>48</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Medições laboratoriais.....	49
4.1.1	<i>Análises qualitativas baseadas em medições laboratoriais</i>	<i>49</i>
4.1.2	<i>Análises quantitativas baseadas em medições laboratoriais.....</i>	<i>59</i>
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	64
	REFERÊNCIAS	66

ANEXO A - INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA ARGAMASSA	
MATRIX 5201.....	78
ANEXO B – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA ARGAMASSA	
MATRIX 2202.....	81
ANEXO C – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA ACIII FLEXÍVEL	
CINZA.....	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e justificativa

Nas construções arquitetônicas, as fachadas possuem considerável importância estética além da proteção e isolamento térmico e acústico (Barbosa; Rosse; Laurindo, 2021). No entanto, múltiplos fatores influenciam a deterioração desse sistema construtivo. As causas mais comuns de degradação são agressão química, má concepção, ausência de intervenções de manutenção e fatores ambientais (Silva *et al.*, 2013; Souza, 2019). Os fatores ambientais, como incidência solar, mudanças de temperatura, chuva forte e ação do vento, podem resultar em danos construtivos, como trincas, infiltrações, perda de aderência e, ainda, deslocamento cerâmico (Chew, 2021).

O uso das placas cerâmicas no sistema de revestimento é uma alternativa para proteger as fachadas da degradação precoce ou surgimento de danos, além de seu uso arquitetônico (Huang; Luo; Xia, 2013; Wattanasiriwech; Saiton; Wattanasiriwech, 2009). Devido a sua composição, essencialmente baseada em materiais inorgânicos e não metálicos (Zhao, 2021), às suas propriedades de resistência mecânica e de absorção de água, além de suas variações dimensionais, as placas cerâmicas podem funcionar como uma camada adicional contra o efeito do envelhecimento.

Apesar das inúmeras vantagens, vários defeitos podem surgir nesse tipo de revestimento, entre eles a falta ou perda de aderência e o consequente deslocamento (Lourenço; Matias; Faria, 2017; Costa *et al.*, 2019). O deslocamento cerâmico pode ser caracterizado como a ruptura da aderência de colagem entre as placas cerâmicas e as demais camadas de argamassa (Bauer *et al.*, 2016). Esse dano favorece a perda dos requisitos funcionais das edificações e aumenta os riscos aos usuários e transeuntes (Lourenço; Matias; Faria, 2017); enquanto pode evoluir para o desprendimento completo de uma área (Edis *et al.*, 2015a). No entanto, detectar em idade precoce a aderência do revestimento cerâmico ainda é desafiador, por falta de métodos precisos e normatizados.

1.2 Problema de pesquisa

É típico para inspeção de revestimentos cerâmicos em fachadas o método sonoro “tubby”, também conhecido como “ensaio de percussão” (Ballesteros *et al.*, 2021). O teste de percussão consiste na utilização de um instrumento não contundente à procura de um som “cavo” em placas cerâmicas (ABNT NBR 13755, 2017). Os resultados deste teste podem

apresentar algumas desvantagens, tais como: incapacidade de realização em determinados climas; detecção lenta e exaustiva; dependência excessiva da experiência do operador, apresentando risco de execução e interferência no aspecto visual do revestimento após sua finalização (Zhao, 2021).

Diante desse cenário, Dwivedi; Vishwakarma; Soni (2018); El Masri; Rakha (2020); Valero; Sasso; Vicioso (2019); Tejedor *et al.* (2020) apresentaram em seus estudos diferentes técnicas pertencentes aos ensaios não destrutivos (END), suas particularidades e algumas possibilidades de aplicação como alternativa para inspeção de defeitos em revestimentos. Entre os métodos de END existentes para avaliação de danos construtivos, a termografia infravermelha (TRI) ganha destaque para aplicação na avaliação de anomalias. A TRI apresenta uma abordagem eficiente de análise aplicada em muitos campos, entre os quais: engenharia mecânica (Trofimov *et al.*, 2023), economia de energia (Changmin *et al.*, 2022), biologia (Gabbi *et al.*, 2021), patrimônio cultural (Ning *et al.*, 2020), meio ambiente (Pedram *et al.*, 2020), medicina (Hakim; Awale, 2021), eletrônica (Yoon; Park; Cho, 2021), transferência de calor (Duo *et al.*, 2021), química (Lima *et al.*, 2020), fisiologia (Yu; Bashkatov, 2021), avaliação de materiais (Kidagan; Krishnamurthy; Balasubramaniam, 2020), entre os quais compósitos de matriz cerâmica (Archer *et al.*, 2019).

A termografia baseia-se na medição da radiação infravermelha (RI) emitida por um material que é captado por meio de uma câmera termográfica (Minkina, 2020), gerando imagens térmicas nas quais diferentes cores correspondem a diferentes intensidades de radiação (Lourenço; Matias; Faria, 2017; Garrido; Laguela; Arias, 2018; Bernardino, 2018), remotamente, com grande facilidade e em tempo real (Fox; Goodhew; Wilde, 2016; Garrido; Laguela; Arias, 2018). A favor, o END não introduz danos ou compromete a integridade do objeto em estudo e permite a análise de estruturas de difícil acesso ou em condições inseguras (Garrido; Laguela; Arias, 2018). Para a interpretação dos dados coletados, é necessário processar as imagens térmicas e excluir temperaturas inconsistentes, bem como indicar a temperatura máxima e mínima da área em análise (Pozzer *et al.*, 2020).

A TRI pode ser classificada de acordo com o esquema de análise, modo de medição e método de medição (Kirimtat; Krejcar, 2018). O esquema de análise depende da fonte de energia utilizada para aquecer a superfície do material (Tomita; Chew, 2022), podendo ser classificada como ativa, quando são utilizadas fontes artificiais, por exemplo, uma lâmpada (Garrido *et al.*, 2022b) é classificada como passiva, quando o aquecimento é

devido à incidência de luz solar (Barbosa; Rosse; Laurindo, 2021), também pode ser aplicado à noite sem radiação solar direta. O modo considera a posição relativa da câmera no momento da medição (Yang; He, 2016), classificando-a em modo de transmissão, quando a fonte de excitação e a câmera estão localizadas em lados opostos; e modo de reflexão, quando a fonte de variação térmica e a câmera estão do mesmo lado (Hart, 1991). O método de medição depende de como os dados obtidos durante a pesquisa serão processados (Kirimtat; Krejcar, 2018), sendo classificados como qualitativos ou quantitativos. A análise qualitativa baseia-se na comparação de diferenças nos padrões de distribuição térmica e na identificação de pontos quentes e frios na imagem termográfica (Fox; Goodhew; Wilde, 2016; Mendes *et al.*, 2022), enquanto a técnica quantitativa baseia-se na análise numérica dos valores de temperatura (Lourenço; Matias; Faria, 2017; Bauer *et al.*, 2016; Kirimtat; Krejcar, 2018).

A TRI pode ser aplicada para avaliar a condição de materiais como madeira, alvenaria, pedra e concreto (Martínez; Martínez, 2022). Sendo útil na detecção de diferentes tipos de edificações, manifestações patológicas e pequenos defeitos (Pavón De La Fé, 2018). A exemplo, (Valero; Sasso; Vicioso, 2019; Barreira; Almeida, 2015; Edis; Flores-Colen; Brito, 2015a; Lerma; Cabrelles; Portalés, 2011) detectaram umidade em fachadas; (Edis; Flores-Colen; Brito, 2014), identificaram problemas de umidade no revestimento cerâmico; (Bauer; Milhomem; Aidar, 2018; Jo; Jadidi, 2019) avaliaram o grau de dano por trincas, (Tejedor *et al.*, 2020) estudaram a transmitância térmica em fachadas, (Barreira; Almeida; Moreira, 2017; Lerma; Barreira; Almeida, 2018), identificaram problemas de vazamentos de ar, (Freitas; Freita; Barreira, 2014) verificaram o desprendimento do reboco; e (Edis; Flores-Colen; Brito, 2015a), buscaram detectar o desprendimento de placas cerâmicas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicabilidade da técnica não destrutiva de termografia de infravermelho para identificação de deslocamento cerâmico.

1.3.2 Objetivos específicos

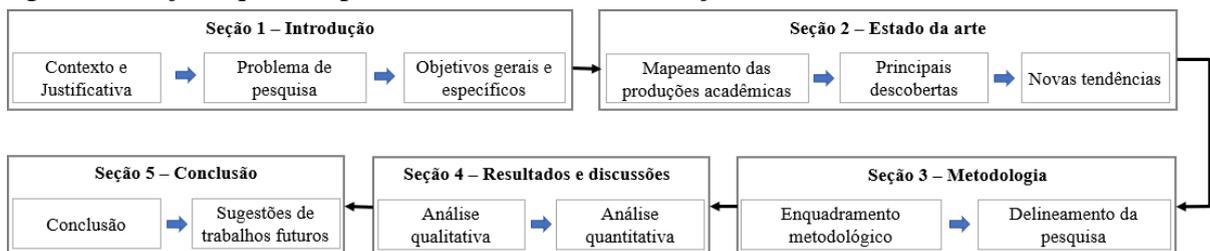
- a) Analisar como a cor do revestimento cerâmico influencia na verificação do deslocamento por TRI;
- b) Avaliar a relação da temperatura com o estado de deslocamento dos revestimentos;

- c) Analisar a influência de fatores físicos e ambientais na interpretação das imagens termográficas;
- d) Identificar a localização dos deslocamentos cerâmicos em imagens termográficas através de análises qualitativas;
- e) Estabelecer um método de processamento das imagens térmicas capaz de facilitar a identificação das anomalias;
- f) Definir os momentos e as condições apropriadas para a realização das inspeções termográficas;
- g) Validar os resultados qualitativos por meio de análises quantitativas.

1.4 Estrutura da dissertação

A presente pesquisa encontra-se estruturada em cinco seções, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Seções que compõem a estrutura da dissertação



Fonte: Autora (2024).

A primeira delas, a introdução, contextualiza a problemática acerca do tema, apresentando fatores que justificam a hipótese levantada como também o objetivo geral e os objetivos específicos.

A seção 2, estado da arte, é dedicada a apresentar uma ampla revisão acerca do uso da termografia infravermelha para diagnóstico do deslocamento em revestimentos cerâmicos, apresentando dados de um artigo completo de Melo, Paz e Mesquita (2024), submetido e publicado na revista *Journal of Building Engineering* (DOI: 10.1007/s41024-024-00387-6).

A seção 3, metodologia, consiste no enquadramento metodológico da pesquisa, bem como no seu delineamento, descrevendo ações práticas, ferramentas e técnicas que compõem o desenvolvimento da pesquisa.

Na seção 4, resultados e discussões, apresentam-se os resultados encontrados em

medições laboratoriais e *in loco* partindo de análises qualitativas e quantitativas, bem como suas respectivas discussões.

Na seção 5, conclusão, destaca-se a importância do trabalho no âmbito técnico e social, além das limitações da pesquisa, a demonstração dos cumprimentos dos objetivos do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, ao final do texto são apresentadas as referências utilizadas e os apêndices.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Breve história do desenvolvimento da termografia

As primeiras descobertas da termografia remontam ao antigo filósofo e médico grego Hipócrates, que ao observar a alteração das características da argila utilizada como instrumento de avaliação na época, notou que as variações de temperatura no corpo humano eram o principal sinal diagnóstico de doença (Brioschi, 2008). Mais tarde, no início do século XIX, Sir William Herschel, um astrônomo britânico, descobriu acidentalmente que o sol emitia raios infravermelhos e com um termômetro escurecido observou que diferentes cores tinham diferentes níveis de temperatura (Maldague, 1993). Com a descoberta do espectro infravermelho, cerca de 40 anos depois, Sir John Herschel, produziu em papel a primeira imagem termográfica por meio da técnica evaporográfica (Brioschi, 2008). No entanto, o evaporográfico apresentava limitações de contraste, sensibilidade e tempo de resposta, o que inviabilizava algumas aplicações (Lloyde, 2013).

A melhora da sensibilidade do termógrafo progrediu lentamente. Os primeiros sistemas automatizados de busca infravermelho começaram a ser desenvolvidos durante a primeira guerra mundial dado a sua importância para a detecção de inimigos (FLIR, 2023). A partir de então, as técnicas de termografia infravermelha passaram a ser utilizadas estritamente em operações militares. Por isso o status dos avanços da termografia foi mantido em sigilo até meados de 1950.

Foi então que em 1952 veio a público a existência do primeiro instrumento capaz de gravar imagens em filme fotográfico com enquadramento bidimensional, porém de forma lenta. Em 1956 a tecnologia avançou e foi construído o primeiro equipamento de comprimento de onda longo tornando-se possível os registros termográficos em tempo real (Bernardino, 2018). Somente no final da década de 1960, que as câmeras termográficas foram disponibilizadas ao público comum e as imagens térmicas tornaram-se acessíveis à sociedade para outros fins (Maldague, 1993).

Nos últimos anos, a termografia infravermelha possui aporte de diversos modelos de câmeras térmicas, desde as portáteis de cunho profissional até as compactas e adaptadas à *smartphones*. Desde então, a termografia tem sido usada nas áreas da indústria e engenharia para detectar maquinários e materiais defeituosos (Barbosa; Rosse; Laurindo, 2021; Zhao, 2021; Aditya *et al.*, 2017; Aversa *et al.*, 2017; Barreira; Almeida; Delgado, 2016; Chizh *et al.*,

2020; Garrido *et al.*, 2020; Meola *et al.*, 2008; Schabowicz, 2019). À medida que a tecnologia avança, é provável que a termografia continue a desempenhar um papel cada vez mais importante no diagnóstico e tratamento dos problemas construtivos.

2.2 Fundamentos teóricos sobre termografia infravermelha

2.2.1 Fundamentos de transferência de calor e teoria de medição de temperatura

A aplicação da termografia infravermelha para o diagnóstico de manifestações patológicas em elementos construtivos, requer um conhecimento prévio quanto ao comportamento térmico dos edifícios. Esses conceitos são baseados nos fundamentos físicos da transferência de calor. O calor é uma forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como consequência da diferença de temperatura entre eles, através dos mecanismos de condução, convecção ou radiação (Çengel, 2007). A troca de calor por radiação é o mecanismo mais importante quando se trabalha com termografia infravermelha, por ser a base para as medições de temperatura com câmeras termográficas (Lourenço; Matias; Faria, 2017). Trata-se da energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas, com um comprimento de onda que varia de 0,1 a 10 μ m e que podem ser geradas por fontes naturais como o sol ou fontes artificiais como uma lâmpada (Garrido *et al.*, 2022; Kothandaraman, 2006).

A radiação total (W_{TOTAL}) que atua sobre um corpo é dada pela soma da radiação emitida/irradiada (W_{EMI}) com a radiação incidente (W_{INC}). De um modo geral, a radiação emitida é a parcela irradiada pelo próprio objeto alvo, enquanto a radiação incidente é aquela que atinge um corpo e advém dos seus arredores, ou seja, de objetos que ficam na frente ou atrás do alvo, podendo refletir sua radiação no alvo ou irradiar através dele (ITC, 2018). A radiação emitida trocará calor por emissão (W_{ϵ}) e do total de radiação que incide sobre um corpo parte será absorvida (W_{α}), outra refletida (W_{ρ}) e outra transmitida (W_{τ}), conforme as equações abaixo:

$$W_{TOTAL} = (W_{EMI}) + (W_{INC}) \quad \text{(Equação 1)}$$

$$W_{TOTAL} = (W_{\epsilon}) + (W_{\alpha} + W_{\rho} + W_{\tau}) \quad \text{(Equação 2)}$$

A proporção de radiação emitida, absorvida, refletida e transmitida dependerá do material do corpo e das condições de temperatura da sua superfície (Çengel, 2007; Li *et al.*, 2022). Cada material tem um valor de emissividade (ϵ), que representa a sua capacidade de emitir energia comparado com um componente ideal, conhecido como corpo negro. O corpo negro é um perfeito emissor e absorvedor de radiação (Kothandaraman, 2006). É um corpo idealizado, que serve como padrão para que as propriedades radioativas de superfícies reais possam ser comparadas. A taxa de radiação que pode ser emitida por um corpo negro (Q_{CN}) é dada pela Lei de Stefan-Boltzmann (Çengel, 2007):

$$Q_{CN} = \sigma AT^4 \text{ [W]} \quad \text{(Equação 3)}$$

Onde, (σ) é a constante de Stefan-Boltzmann equivalente a $5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$, (A) é a área da superfície [m^2] e (T) é a temperatura absoluta da superfície [K].

Em corpos reais, três processos podem ocorrer impedindo-o de agir como um corpo negro: uma fração de radiação incidente pode ser absorvida (α), uma fração pode ser refletida (ρ) e outra fração pode ser transmitida (τ). A soma desses três fatores deve sempre somar o todo, então tem-se a relação:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad \text{(Equação 4)}$$

De acordo com a Lei de Kirchhoff, para qualquer material a absorptividade e a emissividade são iguais em qualquer temperatura e comprimento de onda.

$$\alpha = \epsilon \quad \text{(Equação 5)}$$

Logo:

$$\epsilon + \rho + \tau = 1 \quad \text{(Equação 6)}$$

No entanto, corpos reais não transmissíveis (alvos opacos) tem transmissividade (τ) igual a 0. Para esse alvo, considera-se que a radiação total de saída consiste na radiação emitida e refletida, assim tem-se:

$$\epsilon + \rho = 1 \quad \text{(Equação 7)}$$

Como a emissividade de um corpo negro é fixa para todos os comprimentos de onda, enquanto a de um corpo real possui valores entre 0 e 1, considera-se o coeficiente de emissividade (ϵ) para fins de correção do valor de radiação que pode ser emitida por um corpo

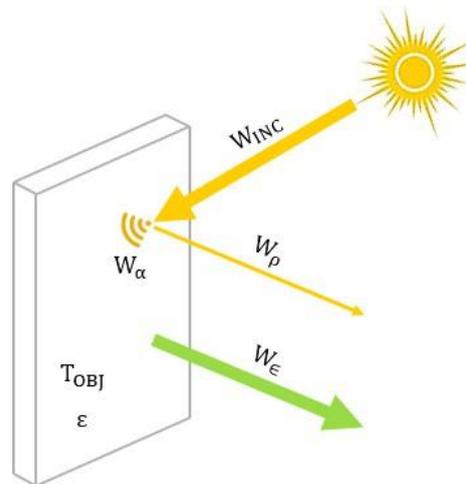
real (Q_{CR}), passando a ser expresso a Lei de Stefan-Boltzmann como:

$$Q_{CR} = \varepsilon\sigma AT^4 \text{ [W]} \quad (\text{Equação 8})$$

Isso significa que o poder emissivo de um corpo real é o mesmo que um corpo negro reduzida proporcionalmente ao valor de emissividade do corpo opaco.

Em termos práticos, uma alvenaria quando sujeita a fontes de excitação térmica, seja natural ou artificial, terá sua superfície aquecida por conta da transferência de energia na forma de calor, que se dá sempre do meio de maior temperatura (ambiente externo) para o de menor temperatura (alvenaria) até que os dois entrem em equilíbrio. A Figura 2, apresenta ilustrativamente as fontes de radiação e suas componentes, na qual uma alvenaria está sujeita durante a fase de aquecimento.

Figura 2 – Fontes de radiação e suas componentes: Radiação incidente (W_{INC}); Radiação absorvida (W_{α}); Radiação refletida (W_{ρ}); Radiação emitida (W_{ϵ})



Fonte: Autora (2024).

No esquema acima, há dois tipos de radiação, incidente e emitida, e duas fontes diferentes, a fonte de excitação térmica que fica na frente da alvenaria (sol) e a própria alvenaria, respectivamente. A parcela de radiação incidente depende da refletividade e transmissividade e a parcela emitida depende da temperatura e emissividade da alvenaria. Uma alvenaria, tem capacidade de transmissividade praticamente nula por ser considerada um corpo opaco. A parcela de radiação que tende a atravessar o alvo, logo será absorvida devido às várias camadas de revestimento argamassado e seu material constituinte, seja ele bloco cerâmico ou de concreto.

Quando a radiação incidente (W_{INC}) atinge a alvenaria, certa parte será absorvida (W_{α}) onde a parede reterá energia e outra parte será refletida (W_{ρ}), de modo que não afeta a alvenaria. No que diz respeito a radiação emitida, quanto maior a temperatura, mais radiação aquele corpo será capaz de emitir. Obedecendo os princípios da Lei de Stefan-Boltzmann e a Lei de Kirchhoff, tem-se:

$$W_{\rho} = (1 - \epsilon)W_{INC} [W] \quad (\text{Equação 9})$$

$$W_{\epsilon} = \epsilon W_{OBJ} [W] \quad (\text{Equação 10})$$

Dado o exposto, a radiação total de saída da alvenaria ilustrada é dada pela soma da radiação que vem da fonte de calor que bate no alvo e é refletido a partir dele e a radiação vinda da própria alvenaria, como mostra as equações:

$$W_{TOTAL} = (W_{INC}) + (W_{\epsilon}) [W] \quad (\text{Equação 11})$$

$$W_{TOTAL} = (W_{\rho}) + (W_{\epsilon}) [W] \quad (\text{Equação 12})$$

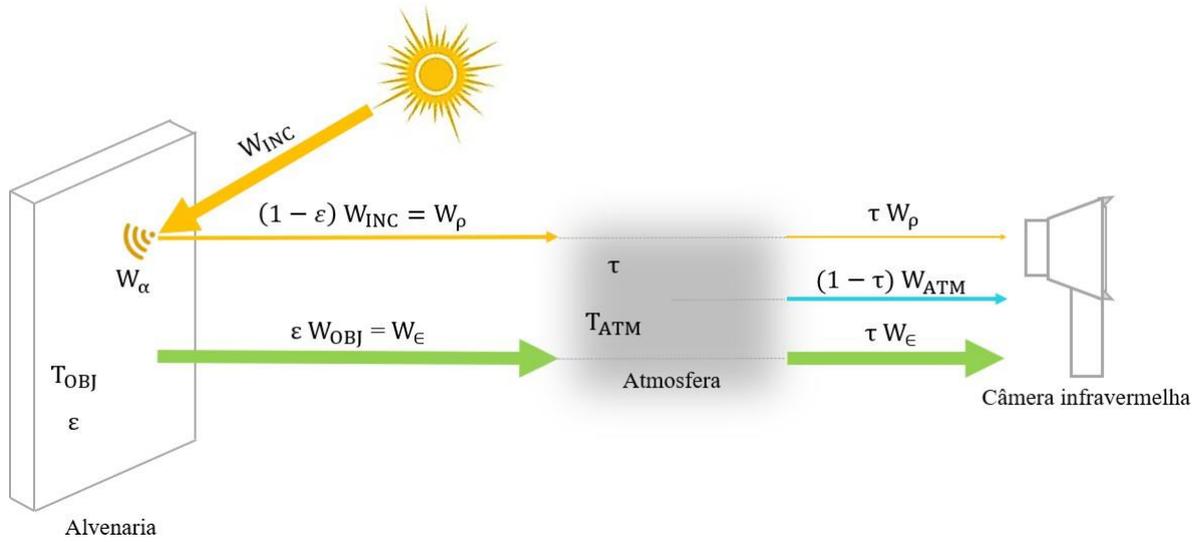
$$W_{TOTAL} = (1 - \epsilon)W_{INC} + \epsilon W_{OBJ} [W] \quad (\text{Equação 13})$$

Na termografia infravermelha a parte mais importante da radiação total é a parcela emitida (ITC, 2018) pois essa é captada pelas câmeras termográficas e expressa nas imagens térmicas, enquanto que a parcela refletida advinda da radiação incidente é perceptível apenas aos olhos humanos e não fornece informações quanto a localização dos defeitos nas construções.

2.2.2 Operação de câmeras termográficas

As câmeras infravermelhas são instrumentos que captam a intensidade da radiação, detectando o infravermelho em uma escala do espectro eletromagnético de aproximadamente 3,0 a 5,6 μm (Hart, 1991). Sua principal função é converter a radiação infravermelha, invisível aos olhos humanos, em uma imagem visível e passível de ser interpretada. A Figura 3 mostra o processo de captura de um termograma e o princípio de funcionamento das câmeras térmicas.

Figura 3 – Representação esquemática dos elementos de radiação capturados por uma câmera termográfica



Fonte: Autora (2024).

Quando a câmera infravermelha é direcionada para a alvenaria, receberá a radiação emitida pela alvenaria (W_ϵ) e a radiação dos arredores refletida através da sua superfície (W_ρ). Durante a trajetória de medição essas radiações são atenuadas pela atmosfera e somam-se a elas as radiações emitidas pela própria atmosfera (W_{ATM}). A fórmula a seguir expressa a radiação total captada pela câmera infravermelha (W_{TIC}).

$$W_{TIC} = \tau (1 - \epsilon) W_{INC} + (1 - \tau) W_{ATM} + \tau \epsilon W_{OBJ} \quad [W] \quad (\text{Equação 14})$$

$$W_{TIC} = \tau W_\rho + (1 - \tau) W_{ATM} + \tau W_\epsilon \quad [W] \quad (\text{Equação 15})$$

A radiação refletida ($(1 - \epsilon) W_{INC}$) é atenuada pela transmissividade da atmosfera (τ). A radiação emitida pela atmosfera é dada por $(1 - \tau) W_{ATM}$, em que $(1 - \tau)$ equivale a emitância da atmosfera. E a radiação emitida pelo objeto é dada pela transmissividade da atmosfera (τ) que multiplica a emissividade da alvenaria (ϵ) e a radiação emitida pela alvenaria (W_{OBJ}).

No geral, para que a câmera possa compensar os efeitos atmosféricos deve ser fornecido os dados de emissividade do objeto, temperatura aparente refletida, distância entre o objeto e a câmera, umidade relativa e temperatura da atmosfera (ITC, 2018). Após a radiação infravermelha passar através das lentes, ela é focalizada por um detector que criará um sinal eletrônico no qual será amplificado, digitalizado e enviado para componentes eletrônicos que

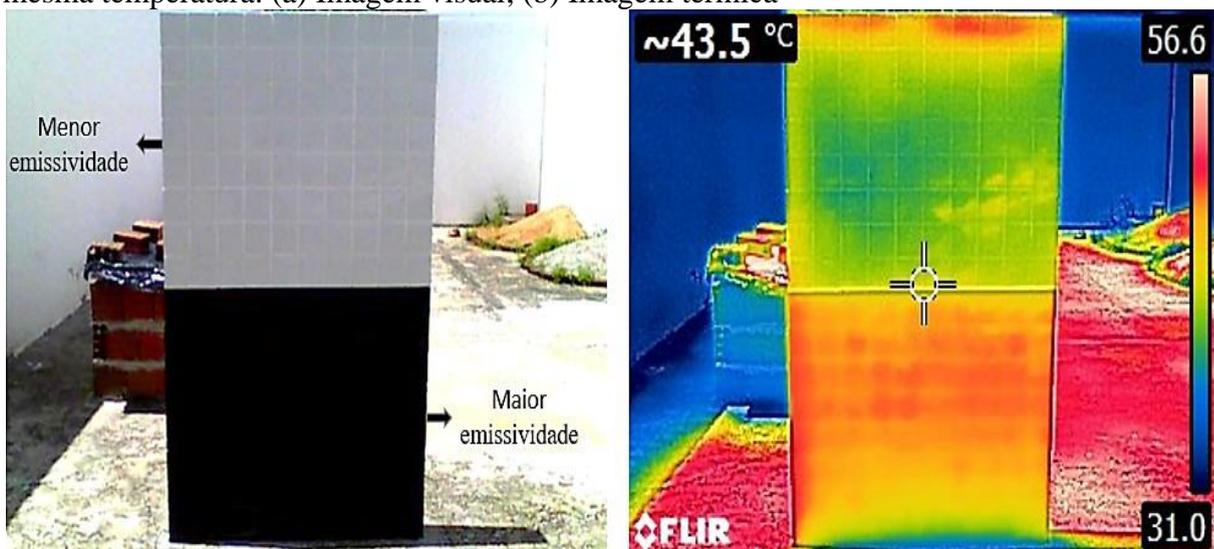
o converterá em uma figura que aparecerá no visor do equipamento. Essa figura é denominada termograma ou imagem térmica (FLIR, 2023).

2.2.3 Interpretação de imagens térmicas

Termogramas são imagens térmicas visuais que mostram a intensidade de radiação ao longo da superfície de um objeto (ITC, 2018). Para uma rápida visualização dos diferentes níveis de temperatura aparente é utilizado uma escala de cores denominada paleta (Pavón De La Fé, 2018). Em geral, quanto maior for a temperatura aparente da área analisada, mais vermelha será sua cor. Normalmente, é fornecido nos termogramas informações quanto a temperatura aparente média, máxima e mínima da área analisada.

Para uma interpretação mais precisa das imagens térmicas é importante atentar-se a diferença de emissividade dos materiais, o comportamento das regiões afetadas pelo efeito de pontes térmicas e a interferência de reflexos que, por vezes, são confundidas e consideradas zonas anômalas, como se houvesse algum tipo de manifestação patológica. Esses fatores serão discutidos individualmente. A Figura 4, mostra a diferença em termos visuais e térmicos de uma alvenaria com revestimentos cerâmicos de emissividades diferentes, mas com a mesma temperatura. A alvenaria é revestida com pastilhas cerâmicas de 100 mm x 100 mm.

Figura 4 - Alvenaria revestida com pastilhas cerâmicas de diferentes emissividades exposta à mesma temperatura: (a) Imagem visual; (b) Imagem térmica



Fonte: Autora (2024).

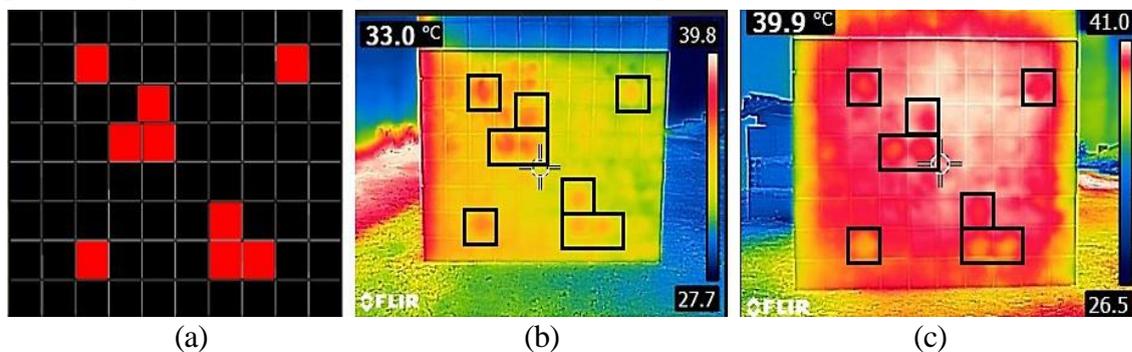
Acima tem-se uma alvenaria revestida na parte superior com pastilhas cerâmicas de cor branca e na parte inferior com pastilhas cerâmicas de cor preta. Quando medido, a temperatura da superfície é a mesma independentemente da cor do revestimento. A interpretações térmicas dependerão principalmente da diferença de emissividade entre os

materiais, e não da temperatura real da superfície. Na foto visual do lado esquerdo (Figura 4a), percebe-se que a superfície de cor branca reflete mais do que a superfície de cor preta. Primeiro porque os olhos humanos captam apenas a radiação refletida pelo revestimento cerâmico e, segundo, porque a cor branca tem menor emissividade, favorecendo a reflexão de grande parte da radiação incidente.

A radiação emitida será menor para a área superior (revestimento branco) e maior para a área inferior (revestimento preto). Este fenômeno pode ser confirmado ao observar o termograma mostrado no lado direito (Figura 4b). Na imagem térmica, o revestimento de cor preta está mais quente do que o revestimento branco, já que ele tem capacidade de absorver mais energia devido sua maior emissividade. Este fato condiz com a Lei de Kirchhoff, quando afirma que para qualquer material a absorvidade e a emissividade são iguais. Em outras palavras, é a diferença na emissividade que causa o contraste na imagem térmica, uma vez que os termogramas mostram a diferença de intensidade de radiação e não as diferenças reais de temperatura.

Quanto às pontes térmicas, elas ocorrem em regiões onde as propriedades dos materiais sofreram alguma alteração ou quando existe uma descontinuidade do elemento construtivo. Sua existência na envolvente de um edifício tem implicações na interpretação dos termogramas. Zonas que exibem baixa aderência se comportam de maneira diferente de áreas normais em relação à transferência de calor, criando diferenciais térmicos na superfície (Bagavathiappan, 2013; Bauer *et al.*, 2014; Lourenço; Matias; Faria, 2017). No caso de uma alvenaria revestida com placas cerâmicas, as áreas com problema de deslocamento são consideradas pontes térmicas, haja vista que o calor segue o caminho com menor resistência térmica. A Figura 5 mostra o comportamento de pontes térmicas advindas de deslocamentos cerâmicos tanto na fase de aquecimento quanto arrefecimento.

Figura 5 – Comportamento das pontes térmicas advindas de deslocamentos cerâmicos: (a) Esquemática das zonas deslocadas; (b) Fase de aquecimento; (c) Fase de arrefecimento

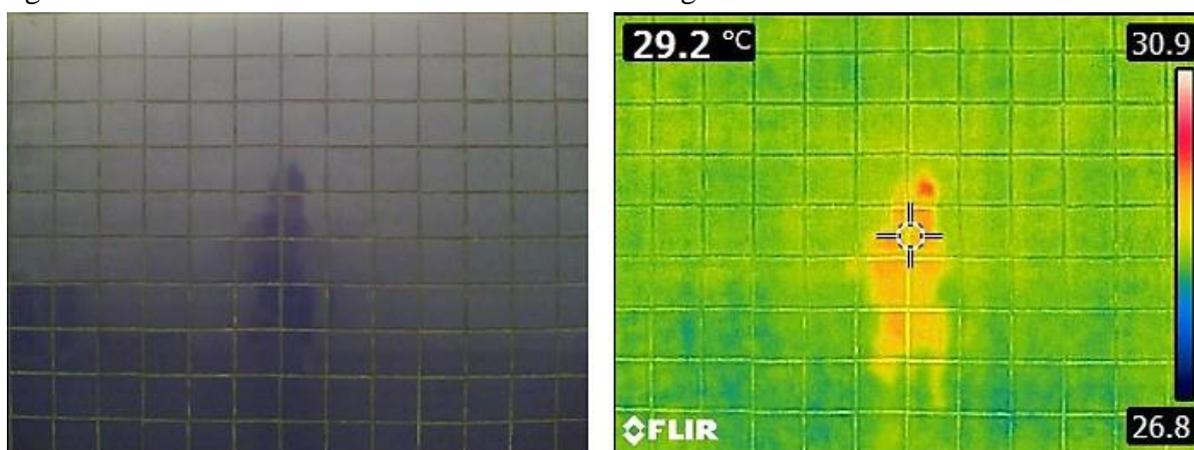


Fonte: Autora (2024).

Na Figura 5a, tem-se a esquematização de uma alvenaria revestida com pastilhas cerâmicas e as zonas na qual foi simulado os deslocamentos, ou seja, as pontes térmicas, representado na cor vermelha. A Figura 5b mostra o comportamento das áreas deslocadas na fase de aquecimento, enquanto que a Figura 5c mostra o comportamento na fase de arrefecimento. A perda de aderência entre a placa cerâmica e o substrato, dá origem a um espaço vazio em que a troca de calor acontece mais rapidamente quando comparado às zonas normais, bem aderidas. Na fase de aquecimento as regiões deslocadas absorvem calor mais rapidamente, apresentando temperaturas aparentes mais elevadas nas imagens termográficas. O contrário acontece na fase de arrefecimento. Por haver uma dissipação mais rápida do calor, as regiões deslocadas tendem a apresentar temperaturas aparentes menores. Além disso, é comum que descontinuidades no elemento construtivo seja considerado, também, uma ponte térmica. Por vezes, este fenômeno dá origem ao efeito de borda, que consiste na extremidade das imagens térmicas que devem ser consideradas regiões indeterminadas, pois impossibilitam a identificação dos deslocamentos devido a uniformidade na condutividade térmica.

No que diz respeito aos reflexos, eles são enganosos e podem interferir na precisão dos resultados, pois geralmente parecem anomalias. Uma fonte de reflexão pode ser tanto mais quente ou mais fria do que a área ao seu redor (ITC, 2018). Normalmente o reflexo é maior em superfícies de baixa emissividade (cor branca). A Figura 6 mostra a presença de reflexo em uma alvenaria revestida com pastilhas cerâmicas de cor azul.

Figura 6 – Interferência do reflexo em análises termográficas



Fonte: Autora (2024).

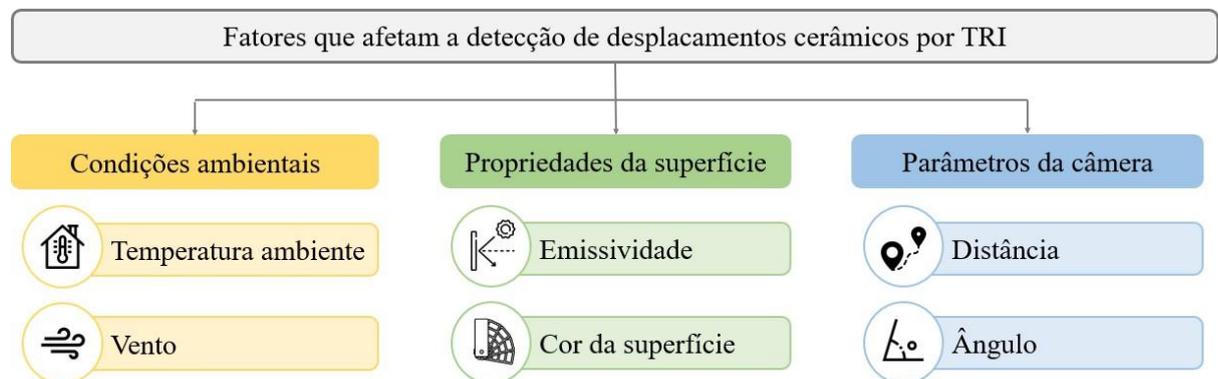
Na Figura 6 é possível observar que se houver um objeto na frente de uma superfície refletora, o reflexo aparecerá na imagem térmica. Nesse caso, o reflexo do operador

aparece na imagem termográfica. Para olhos destreinados, a área com temperatura aparente mais elevada poderia ser considerada uma zona com problema de deslocamento cerâmico, já que nem sempre esse reflexo fica tão evidente. Por isso, a reflexão deve ser analisada no momento de captura dos termogramas e não apenas no processo de tratamento das imagens térmicas. Na prática, sugere-se que o operador evite se posicionar na frente de materiais com baixa emissividade. A confirmação da existência de um reflexo pode ser feita quando o ponto desaparecer ou mudar de lugar no momento em que o operador se move. Uma opção para anular sua evidência é mudar a angulação da câmera ou utilizar um material para bloquear esse efeito, como uma lona ou papelão. A identificação de um reflexo já na fase de processamento das imagens térmicas pode ser feita ao perceber zonas com temperatura aparente mais elevada, porém com ausência de gradiente térmico.

2.2.4 Fatores que influenciam a detecção de deslocamentos cerâmicos por termografia infravermelha

A técnica de TRI pode ser afetada por diferentes fatores, desde condições ambientais até propriedades da superfície do revestimento cerâmico e parâmetros de utilização da câmera termográfica, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Fatores que afetam a detecção de deslocamentos cerâmicos por TRI



Fonte: Autora (2024).

Com relação às condições ambientais, temperaturas mais elevadas tornam mais evidente a detecção de má aderência de revestimentos cerâmicos (Lourenço; Matias; Faria, 2017; Freitas; Freitas; Barreira, 2014), e isso pode ser um fator decisivo para a escolha do momento de aquisição dos dados. A alta velocidade do vento diminui o contraste térmico em áreas ensolaradas. A razão é que a temperatura da superfície de um objeto alvo é geralmente mais alta que a temperatura ambiente, então o vento remove a energia térmica da superfície. Porém, para áreas sombreadas ocorre o contrário, pois o vento afeta positivamente o contraste

térmico (Tomita; Chew, 2022).

As propriedades superficiais das placas cerâmicas que mais afetam os resultados da TRI são a capacidade reflexiva da superfície, diretamente relacionada à emissividade do material e, também, a cor do revestimento cerâmico aplicado na fachada da edificação (Bernardino, 2018). A emissividade é uma propriedade dos materiais que caracteriza sua capacidade de emitir radiação, onde quanto menor a emissividade do corpo, menor a energia emitida e, conseqüentemente, menor será a temperatura aparente da superfície do elemento, representada por um valor adimensional que varia entre 0 e 1 (Anhas, 2018). Os principais fatores que influenciam a emissividade são o tipo de material, a textura da superfície e o ângulo de captura da câmera infravermelha (Pavón De La Fé, 2018). Geralmente, esse valor é consultado de duas formas: a primeira é a partir de dados já tabulados para diferentes tipos de materiais e a segunda é pelo método da fita preta (Pavón De La Fé, 2018). Em geral, os valores de emissividade dos materiais utilizados na construção são superiores a 0,8 (Avdelidis; Moropoulou, 2003), sendo aceito o valor de 0,9 para revestimentos cerâmicos (Edis; Flores-Colen; Brito, 2015a). Esses valores contribuem para os estudos de identificação de deslocamentos cerâmicos com TRI (Pavón De La Fé, 2018). Quanto à cor da superfície cerâmica, Lourenço, Matias e Faria (2017) relataram uma comparação analisando o desprendimento cerâmico em placas cerâmicas pretas e brancas. Ao final, foi identificado que revestimentos escuros favorecem a identificação de deslocamentos, pois absorvem mais radiação, tanto pela manhã quanto à tarde.

Com relação aos parâmetros da câmera infravermelha, entende-se que medições de longa distância podem capturar grandes áreas. No entanto, o termograma tende a incluir temperaturas de objetos que não são alvo da análise (Tomita; Chew, 2022), portanto a distância entre a câmera e a superfície deve estar entre 2 e 3 metros (Lourenço; Matias; Faria, 2017; Perilli *et al.*, 2021; Garrido *et al.*, 2020b). Outro fator que deve ser levado em consideração quando se deseja fazer registros termográficos é o ângulo, pois esse parâmetro pode tanto favorecer a captação de radiação dos corpos que se encontram ao redor do objeto alvo como, também, ser uma alternativa viável para eliminar os reflexos que incidem sobre a superfície de placas cerâmicas com baixa emissividade no momento de captura das imagens térmicas.

2.2.5 Classificação da termografia infravermelha

A detecção de deslocamentos cerâmicos com termografia infravermelha pode ser realizada de diversas formas, a depender das condições de inspeção e dos resultados que se deseja obter (Tomita; Chew, 2022). Para atender as particularidades de cada caso deve-se escolher a metodologia mais apropriada, que se classifica em esquema de análise, modo de medição e método de medição. O esquema da Figura 8 mostra a forma de classificação da TRI, a caracterização de cada uma das técnicas e, também, a situação de utilização mais apropriada para cada uma delas, com base em Barbosa, Rosse e Laurindo (2021); Zhao (2021); Lourenço, Matias e Faria (2017); Bauer et al. (2016); Fox, Goodhew e De Wilde (2016); Almeida, Ornela e Cordeiro (2020); Garrido, Laguela e Arias (2018); Kiritmat e Krejcar (2018); Tomita; Chew, 2022; Garrido et al. (2022); Yang e He (2016); Hart (1991); Mendes et al. (2022); Martinez e Martinez (2022); Garrido et al. (2020a); Garrido et al. (2020b); Milovanovic e Pecur (2016); Zhang et al. (2017); Usamentiaga et al. (2014); Schwarz et al. (2018); Jadin e Taib (2012).

Figura 8 – Esquema de classificação da termografia infravermelha

Classificação da termografia infravermelha		Caracterização da técnica		Laboratório	Escala real
Esquema de análise	Ativo	Utiliza estímulo térmico artificial e controlado, garante maior contraste térmico e facilita a evidência de regiões anômalas.	X		
	Passivo	Utiliza a incidência solar como estímulo térmico, aquece grandes áreas de maneira uniforme, mas depende das condições ambientais do dia e local.		X	
Modo de medição	Transmissão	Indicado para materiais com baixo valor de emissividade e com anomalias de grande profundidade.	X		
	Reflexão	Indicado para materiais com alto valor de emissividade e com anomalias de pequena profundidade.	X	X	
Método de medição	Qualitativo	Através de análises visuais dos termogramas observa-se o comportamento térmico e devido a falhas nos padrões de temperatura identifica-se a localização das anomalias.		X	
	Quantitativo	Através de análises numéricas possibilita definir a localização do defeito e, também, classificar e avaliar o grau do dano.	X		

Fonte: Autora (2024).

2.2.5.1 Classificação por esquema de análise

O esquema de análise de termografia infravermelha pode ser classificado de acordo com o critério da fonte de calor que afetará o objeto, aquecendo-o e gerando a distribuição de temperatura na superfície (Tomita; Chew, 2022). Em 1991, Hart apontou a existência de dois métodos de aquisição de imagens, o método passivo e o método ativo (Hart, 1991).

A termografia ativa usa fontes artificiais de excitação térmica que geram calor para a amostra (Garrido *et al.*, 2022; Milovanovic; Pecur, 2016), onde uma fonte de energia externa é necessária, geralmente uma lâmpada (Hart, 1991), para distinguir a temperatura da superfície do alvo da temperatura de fundo (Martinez; Martinez, 2022). Geralmente, a tecnologia de detecção TRI ativa captura uma visualização clara de anomalias térmicas em comparação com a TRI passiva (Zhang *et al.*, 2017), favorecendo uma melhor visualização de defeitos em imagens térmicas devido à sua maior intensidade (Garrido *et al.*, 2022; Usamentiaga *et al.*, 2014; Schwarz, 2018). No entanto, esta abordagem é muito difícil de ser utilizada para avaliação de paredes externas e altas, como fachadas de edifícios. Mas, enquanto a fonte de calor é modulada e constante, o contraste das emissões infravermelhas permite um nível considerável de precisão na identificação de danos.

Por outro lado, a termografia passiva utiliza fontes naturais de calor, sem aplicar nenhum meio artificial para gerar um gradiente térmico e causar contraste na superfície do objeto (Zhao, 2021; Kiritat; Krejcar, 2018; Hart, 1991). Neste caso, o material ou estrutura é aquecido por fontes primárias de calor, geralmente a luz solar, sendo este esquema de análise indicado para grandes áreas, como fachadas de edificações (Barbosa; Rosse; Laurindo, 2021; Garrido; Laguela; Arias, 2018). Fontes naturais de calor podem aquecer grandes áreas uniformemente, possibilitando a inspeção por infravermelho em uma extensa infraestrutura de uma só vez e com baixo custo. Mas o TRI passivo pode ser limitado, pois a detectabilidade e a precisão dependem significativamente de fatores que não podem ser controlados, como clima, orientação da superfície e direção da luz solar (Tomita; Chew, 2022).

2.2.5.2 Classificação por modo de medição

O modo de medição leva em consideração a posição relativa da câmera termográfica e também da fonte de excitação, dividida em modo de transmissão e modo de reflexão (Yang; He, 2016). No modo de transmissão, a fonte de excitação térmica e a câmera

estão posicionadas em lados opostos, enquanto no modo de reflexão, a fonte de variação térmica e a câmera estão do mesmo lado. O modo de transmissão é adequado para a análise de superfícies de infraestrutura com baixo valor de emissividade ou defeitos de subsuperfície com grande profundidade, sendo comumente usados para identificação de defeitos de isolamento, umidade e vazamento de ar (Yang; He, 2016; Hart, 1991). O modo de reflexão é ideal para a análise de superfícies de estruturas com alto valor de emissividade ou defeitos superficiais de baixa profundidade, sendo frequentemente aplicado na inspeção de deslocamentos cerâmicos para infraestruturas e edificações (Tomita; Chew, 2022; Hart, 1991; Garrido *et al.*, 2020b). Como normalmente não há acesso direto a ambos os lados dos componentes, definir o modo de reflexão é mais viável para aplicações de campo (Yang; He, 2016).

2.2.5.3 Classificação por método de medição

O método de medição pode ser dividido em técnicas qualitativas e quantitativas (Almeida; Ornela; Cordeiro, 2020; Kirimtat; Krejcar, 2018; Garrido *et al.*, 2020a), dependendo de como os dados obtidos durante a coleta serão processados. As técnicas de análise quantitativa e qualitativa são diferenciadas pelo processo de onde provém a informação.

A análise qualitativa baseia-se na comparação de diferenças nos padrões de distribuição térmica através da identificação de pontos quentes e frios na imagem termográfica (Lourenço; Matias; Faria, 2017; Fox; Goodhew; De Wilde, 2016; Mendes *et al.*, 2022; Garrido *et al.*, 2020a). O objetivo principal desta estratégia é investigar a presença e localização de defeitos (Tomita; Chew, 2022; Jadin; Taib, 2012) de forma prática, simples e intuitiva (Lourenço; Matias; Faria, 2017). No entanto, há uma limitação, pois consiste em uma exploração visual que depende da experiência do avaliador (Bauer *et al.*, 2016).

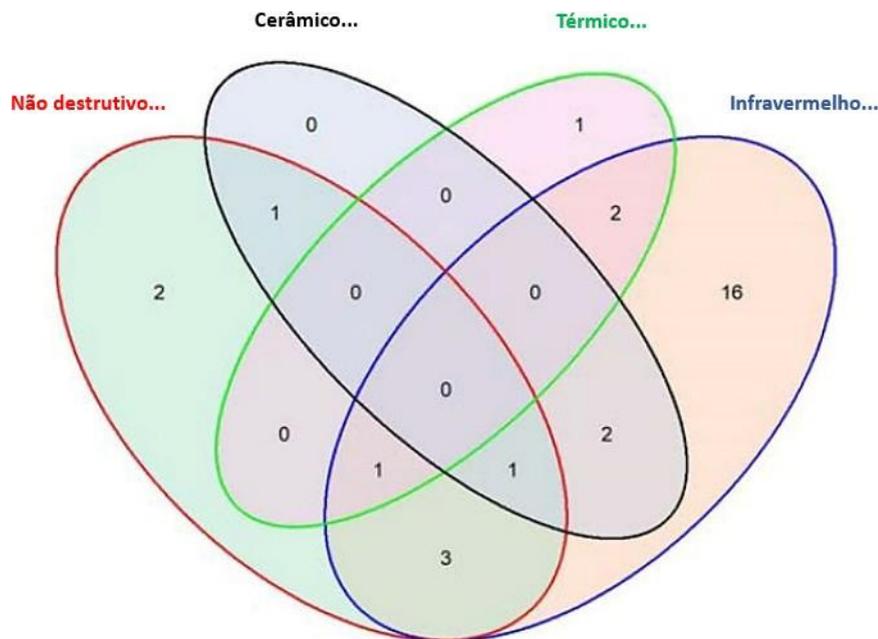
A técnica quantitativa é um método mais rigoroso, utilizado principalmente em laboratório, pois depende de parâmetros controlados como intensidade e direção da fonte de calor e se baseia na análise numérica de temperaturas reais (Lourenço; Matias; Faria, 2017; Bauer *et al.*, 2016; Kirimtat; Krejcar, 2018). Além de identificar a localização do defeito é possível avaliar a sua gravidade, já que no decorrer da análise as imagens termográficas precisam ser compensadas por parâmetros de emissividade, atenuação atmosférica, temperatura refletida além das propriedades térmicas do objeto testado, o que garante maior precisão nos resultados (Garrido; Laguela; Arias, 2018; Kirimtat; Krejcar, 2018; Garrido *et*

al., 2020a).

2.3 Avanços nas técnicas da termografia infravermelha

Para o levantamento do estado da arte deste estudo foram utilizadas as seguintes palavras-chave: Técnicas não destrutivas; Termografia infravermelha; Destacamento cerâmico; Processamento de imagens térmicas. Dentre as obras localizadas, foi aplicado um filtro para obtenção de estudos abordando principalmente aplicações de métodos termográficos para identificação de destacamentos em fachadas. Assim, para o levantamento do estado da arte, foram efetivamente considerados um total de 29 trabalhos. A Figura 9 ilustra um diagrama representando a quantidade de trabalhos encontrados para cada palavra-chave.

Figura 9 - Distribuição do número de artigos publicados considerando as palavras-chave ensaio não destrutivo, destacamento cerâmico, processamento térmico/imagem e termografia infravermelha



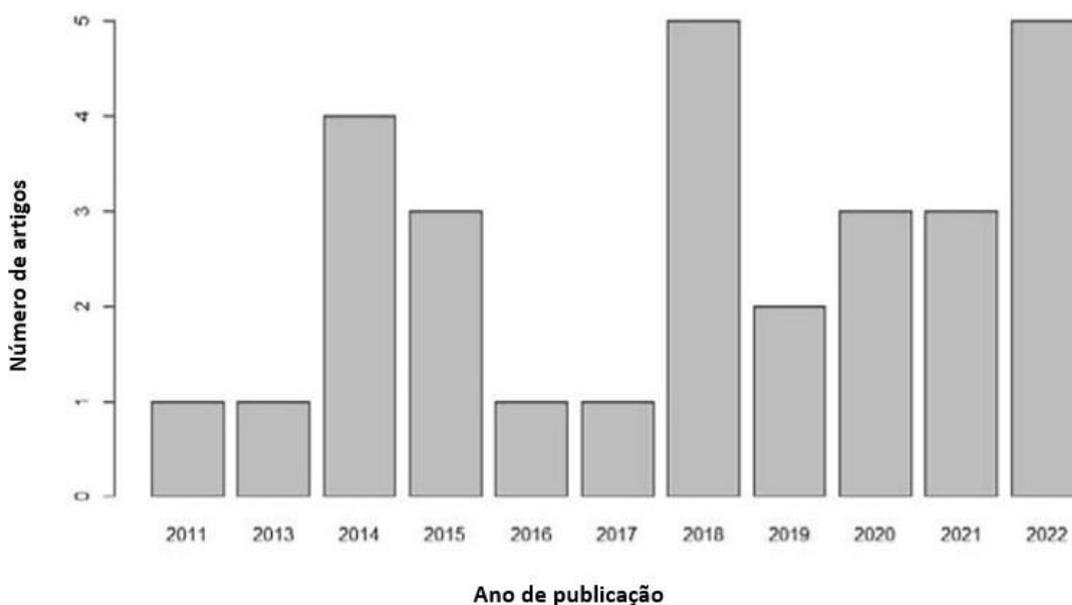
Fonte: Autora (2024).

Para melhor apresentação, o diagrama exibe apenas o início de cada palavra-chave, que pode ser visto na íntegra na tabela. A palavra-chave relacionada a "Termografia infravermelha ou imagem termográfica" aparece em 22 dos 29 trabalhos, tornando-se a palavra-chave mais utilizada para estudos relacionados ao tema discutido. Existem poucos trabalhos encontrados na interseção de três palavras-chave, com 1 estudo abrangendo "Técnicas/ensaios não destrutivos ou END", "Termografia infravermelha ou

imagem termográfica" e "Processamento térmico/de imagem". "Processamento térmico/imagem" e "Descolamento cerâmico" não aparecem juntos em nenhuma das obras.

A Figura 10 retrata o número de estudos utilizados para cada ano de 2011 a 2022. Vale ressaltar que a quantidade de trabalhos identificados é baixa nos dois anos iniciais. Além disso, há um aumento notável no número de trabalhos entre 2018 e 2022, evidenciando o crescente interesse dos pesquisadores pelo tema.

Figura 10 - Distribuição do número de artigos publicados por ano



Fonte: Autora (2024).

Um número considerável de trabalhos foi publicado na última década sobre termografia (Zhao, 2021; El Masri; Rakha, 2020), apresentaram diferentes técnicas de END aplicáveis na avaliação do desempenho de edificações. Os ensaios de ultrassom, fotogrametria, laser ultrassônico e termografia, foram detalhados. Dentre eles, a termografia infravermelha mostrou-se promissora para identificar manifestações patológicas em sistemas construtivos. A aplicabilidade dessa técnica para casos particulares foi testada (Kirimtat; Krejcar, 2018; Bagavathiappan *et al.*, 2013; Usamentiaga *et al.*, 2014; Nardi *et al.*, 2018; Lucchi, 2018) avaliaram o conforto térmico de edificações, (Dwivedi; Vishwakarma; Soni, 2018; Kylie *et al.*, 2014) a localização de vazios, desprendimento de reboco, problemas de umidade e (Tomita; Chew, 2022) os deslocamentos cerâmicos. A conclusão comum desses trabalhos é que a TRI tem potencial para detectar problemas construtivos, mas que ainda precisa ser explorada.

Nesse sentido, (Tomita; Chew, 2022; Sarawade; Charnuya, 2018) apontaram fatores que afetam a precisão e a detectabilidade das manifestações patológicas por TRI. Foi apresentado parâmetros relativos a condições ambientais, propriedades da superfície e características da câmera termográfica. Adicionalmente, (Garrido *et al.*, 2020a) fez um apanhado das diferentes metodologias de captura de imagens térmicas e os procedimentos existentes para fase pós-aquisição. Foram apresentados uma classificação metodológica baseada em esquema de análise, modo de medição e método de medição, assim como técnicas de análise visual e numéricas para tratamento das imagens térmicas. No geral, os trabalhos de revisão estão focados em discutir as vantagens dos END, as diferentes técnicas que os compõem, suas particularidades e as principais aplicações.

Com base em trabalhos sobre a aplicabilidade da TRI nas estruturas civis, a Tabela 1 apresenta um comparativo das metodologias de análises disponíveis na literatura entre 2014 e 2023. Os resultados mostram que a tendência é de os estudos termográficos basearem-se essencialmente numa análise visual de caráter qualitativo. Além disso, informações cruciais como distância e ângulo de aquisição de dados não são totalmente abordadas nos relatórios da literatura.

Tabela 1 - Análise comparativa da metodologia adotada em trabalhos que tratam da aplicação da termografia infravermelha para detecção de defeitos em construções

Autores	Ano	Esquema de análise	Método de análise	Anomalia	Tipo de aplicação	Fase	Detalhe de medição	
							Distância	Ângulo
De Freitas; De Freitas e Barreira	2014	Ativo e Passivo	Qualitativo e Quantitativo	Destacamento do revestimento de argamassa	Laboratório e Caso Real	Aquec. e Arref.	0,7 m	-
Edis; Flores-Colen e De Brito	2015 ^b	Passivo	Quantitativo	Desplacamento cerâmico	Caso Real	Aquec. e Arref.	-	-
Edis; Flores-Colen e De Brito	2015 ^a	Passivo	Quantitativo	Umidade em revestimento cerâmico	Caso Real	Aquec. e Arref.	6 m	-
Lourenço; Matias e Faria	2017	Passivo	Qualitativo e Quantitativo	Desplacamento cerâmico e Umidade	Laboratório	Aquec. e Arref.	2 a 3 m	-
Garrido; Lagueta e Arias	2018	Passivo	Quantitativo	Umidade	Caso Real	Não ident.	1,3 m	-
Almeida; Ornela e Cordeiro	2020	Passivo	Qualitativo	Transferência de calor	Caso Real	Aquec.	-	-

Continuação Tabela 1

Barbosa; Rosse e Laurindo	2021	Passivo	Qualitativo e Quantitativo	Umidade	Caso Real	Não ident.	5 m	20°
Perilli <i>et al.</i>	2021	Ativo	Quantitativo	Destacamento	Laboratório	Arref.	1,2 m	-
Garrido <i>et al.</i>	2022	Ativo	Qualitativo	Desplacamento cerâmico e Infiltração	Laboratório	Aquec.	1,3 m	-
Li <i>et al.</i>	2022	Passivo	Qualitativo e Quantitativo	Umidade e Conforto Térmico	Caso Real	Aquec.	-	-
Martinez e Martinez	2022	Passivo	Qualitativo e Quantitativo	Fissuras, Umidade e Destacamento	Caso Real	Aquec. e Arref.	-	-
Mendes <i>et al.</i>	2022	Passivo	Qualitativo	Destacamento de pintura, Eflorescência e Fissura	Caso Real	Arref.	6 m	-

Aquecimento (Aquec.); Arrefecimento (Arref.); Não identificado (Não Ident.).

Fonte: Autora (2024).

De acordo com Edis; Flores-Colen e De Brito (2014), a TRI tem o potencial de detectar deslocamento cerâmico. No entanto, deve ser considerada uma técnica de inspeção preliminar. À medida que o desprendimento das placas cerâmicas diminui, em termos de perda de aderência, a identificação de áreas defeituosas torna-se mais difícil e, por vezes, pode apontar para um resultado falso-positivo. Em complemento, Lourenço, Matias e Faria (2017), consideraram que o nível de assertividade é maior quando analisado painéis escuros submetidos à incidência de radiação solar por pelo menos 1:30h. Independentemente da fase, seja aquecimento ou resfriamento, as peças descoladas apresentaram maior condutividade térmica. Em contrapartida, Garrido et al. (2022), constatou que os deslocamentos possuem uma condutividade térmica menor que a camada na qual estão embutidos. Foi demonstrado um menor aumento de temperatura nos defeitos em relação ao restante do revestimento cerâmico. É provável que as regiões mal aderidas tenham sido submetidas a umidade no dia anterior a análise. O espaço vazio entre a placa cerâmica e o substrato pode ter sido parcialmente preenchido por água, o que interferiu nos resultados do dia posterior. Para Edis; Flores-Colen e De Brito (2015b) acreditam que a termografia possa ser complementada com outras técnicas de inspeção que permitam uma análise mais profunda dos defeitos, mas economizando tempo na segunda técnica ao dispensar a análise de toda a superfície, focando apenas em zonas indefinidas pela IRT.

Ao fim, pode-se notar que os tópicos abordados nos trabalhos são muito semelhantes, focados principalmente na aplicação da IRT e suas principais descobertas, sem

considerações sobre as diferenças de cores, zonas de borda do elemento avaliado e influência dos reflexos.

2.4 Abordagens de processamento de imagens térmicas

A etapa de processamento é realizada após o registro termográfico e apresenta várias técnicas de tratamento diferentes. Os principais métodos relatados na literatura são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Técnicas de processamento de imagens térmicas

Autores	Anos	Anomalia	Técnica de análise termográfica
Freitas; Freitas e Barreira	2014	Destacamento do revestimento de argamassa	Análise visual
Lourenço; Matias e Faria	2017	Desplacamento cerâmico e Umidade	Análise visual
Garrido <i>et al.</i>	2018	Umidade	Análise numérica
Almeida; Ornela e Cordeiro	2020	Transferência de calor	Análise visual
Barbosa; Rosse e Laurindo	2021	Umidade	Análise visual
Perilli <i>et al.</i>	2021	Destacamento	Análise numérica
Garrido; <i>et al.</i>	2022	Desplacamento cerâmico e Infiltração	Análise numérica
Li <i>et al.</i>	2022	Umidade e Conforto térmico	Análise visual
Martinez e Martinez	2022	Fissura, Umidade e Destacamento	Análise visual
Mendes <i>et al.</i>	2022	Destacamento de pintura; Eflorescência e Fissuras	Análise visual

Fonte: Autora (2024).

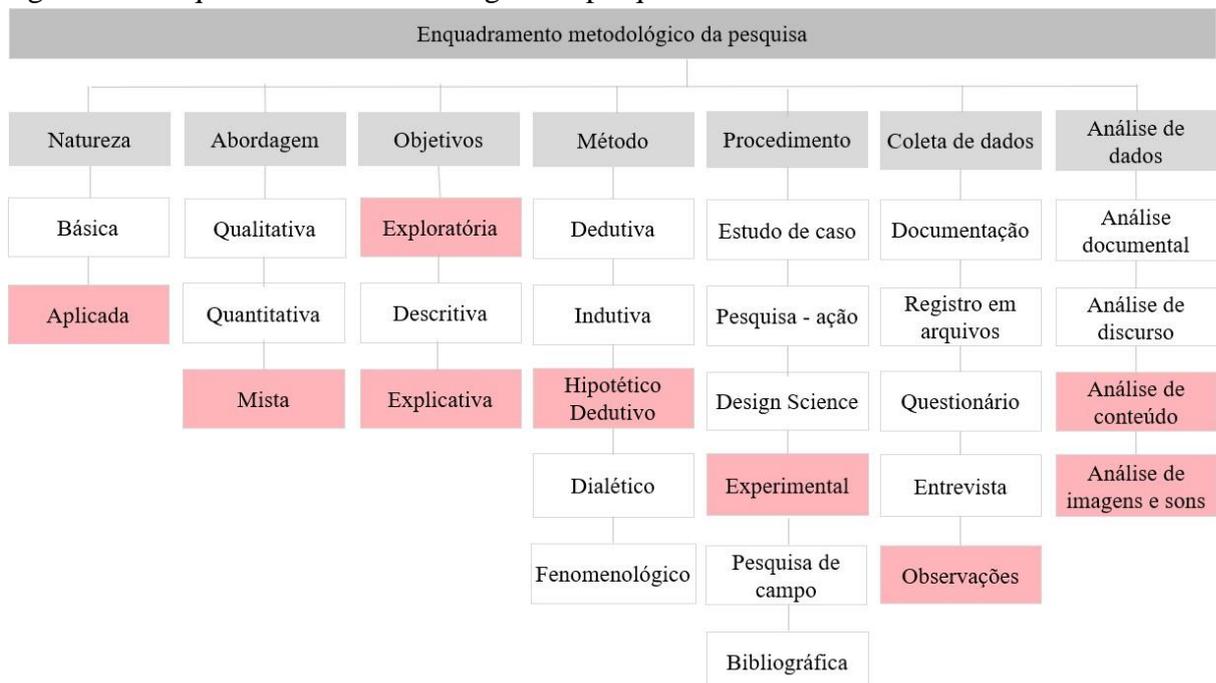
Observa-se que entre os anos de 2014 a 2022, duas técnicas distintas de processamento de imagens térmicas são adotadas em trabalhos de pesquisa: análise visual e análise quantitativa de variação de *pixels*. A primeira, análise visual, é aplicada com maior frequência devido à sua simplicidade. Consiste em observar o termograma e estudar a variação de temperatura em todas as regiões e, normalmente, são consideradas deslocadas as áreas com maior temperatura. No outro método, os autores usam programas de computador combinados com variação de *pixel* e análise numérica para enfatizar as zonas defeituosas. Este método é mais assertivo, porém, demorado e requer conhecimento matemático prévio. Este fato dificulta sua execução e abre vantagem para a técnica de inspeção visual.

3 METODOLOGIA

3.1 Enquadramento metodológico da pesquisa

A classificação da pesquisa seguiu os critérios de análise utilizados por Gil (2008), Prodanov e Freitas (2013) e Marconi e Lakatos (2010). Entre os parâmetros priorizados, tem-se: natureza, abordagem, objetivos, método, procedimento, além das estratégias de coleta e análise de dados, conforme o esquema da Figura 11.

Figura 11 - Enquadramento metodológico da pesquisa



Fonte: Autora (2024).

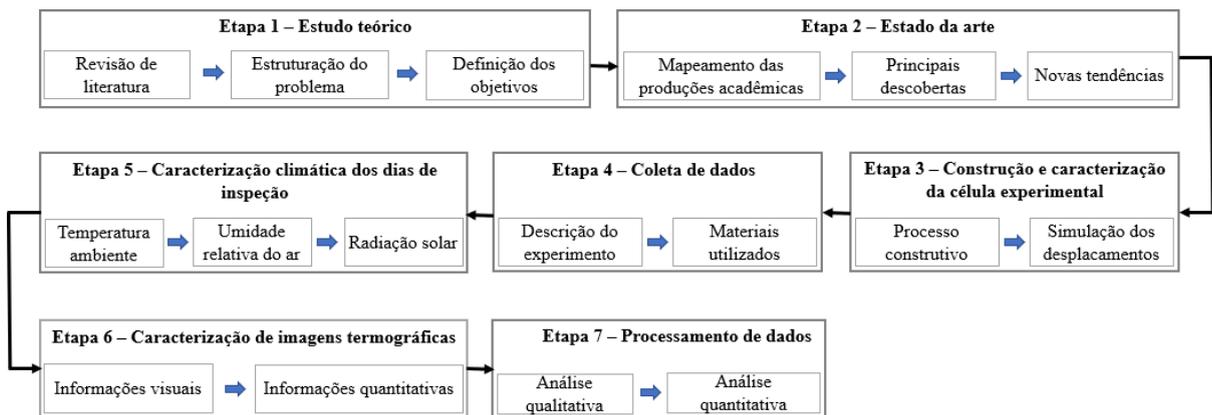
Do ponto de vista da sua natureza, este trabalho se enquadra como uma pesquisa aplicada, haja vista que, uma das suas finalidades é criar um método de interpretação das imagens térmicas capaz de identificar a presença de deslocamentos em revestimentos cerâmicos. A respeito da abordagem, o estudo faz uso de uma metodologia mista, na qual se adota interpretações qualitativas e quantitativas para a análise do comportamento térmico dos revestimentos. Com relação aos objetivos, a pesquisa se caracteriza na condição exploratória e explicativa, dado a realização de uma ampla revisão de literatura, bem como a explicação, classificação e interpretação dos fenômenos observados nos levantamentos termográficos. Quanto aos métodos que proporcionam as bases lógicas de investigação, tem-se uma pesquisa hipotética dedutiva, que parte da análise da hipótese formulada e resultados obtidos, com o intuito de testá-los através da tentativa de falseamento ou corroboração. Neste caso, trata-se

da tentativa de verificar a aplicabilidade da termografia infravermelha para a detecção de áreas com baixa aderência. Já o procedimento se deu através de análises experimentais em uma alvenaria, construída em laboratório e sujeita a fonte de excitação térmica passiva. Por fim, a coleta e a análise de dados se baseou em observações acerca da variação da intensidade de radiação nas imagens térmicas, registradas ao longo do dia em duas épocas do ano.

3.2 Delineamento da pesquisa

Com relação às ações práticas, ferramentas e técnicas que compõem o desenvolvimento desta pesquisa, o delineamento constituiu-se em sete etapas: estudo teórico, estado da arte, construção e caracterização da painel experimental, coleta de dados, caracterização climática dos dias de inspeção, caracterização de imagens térmicas e processamento de dados. A Figura 12 mostra maiores detalhes quanto ao desenvolvimento de cada uma delas.

Figura 12 - Esquema das etapas que compõem o delineamento da pesquisa



Fonte: Autora (2024).

3.2.1 Estudo teórico

O estudo teórico consistiu na realização de uma revisão de literatura a fim de identificar uma lacuna acerca das dificuldades que afetam frequentemente a indústria da construção civil. Foram realizadas pesquisas nas bases de dados Web of Science e Scopus, dado a sua multidisciplinaridade e confiabilidade. Constatou-se, portanto, com o levantamento realizado a necessidade de se desenvolver uma técnica mais eficiente e menos onerosa para detecção dos deslocamentos cerâmicos. Este fato, deu origem à seguinte questão de pesquisa: O que a comunidade científica tem investigado sobre a utilização da termografia infravermelha para o diagnóstico de deslocamento em revestimentos cerâmicos? Pesquisas mostraram que os métodos termográficos existentes ainda precisam de

aprimoramento. Logo, objetivou-se caracterizar o comportamento térmico de áreas deslocadas e bem aderidas, para duas cores de revestimentos cerâmicos em diferentes épocas do ano.

3.2.2 Estado da arte

O estado da arte tratou de um mapeamento das produções acadêmicas, reunindo as suas principais conclusões e as divergências entre os resultados alcançados. Foram apresentados relatos da literatura dos anos de 2014 a 2023, relacionado a abordagens e aplicações da termografia. Uma discussão sobre os fatores físicos e ambientais que influenciam as medições termográficas foi exposta. Além de uma análise comparativa de abordagens baseadas no processamento de imagens térmicas. Os principais resultados apontam para a necessidade de um protocolo ou diretriz mais detalhada para medições qualitativas em grande escala, considerando multiparâmetros. Por fim, ainda foram destacadas novas tendências para pesquisas futuras.

3.2.3 Construção e caracterização do painel experimental

O painel experimental foi construído no Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Ceará, campus Russas e foi projetada com auxílio do software SketChup e executada por profissionais especializados que compõem a equipe de manutenção da universidade.

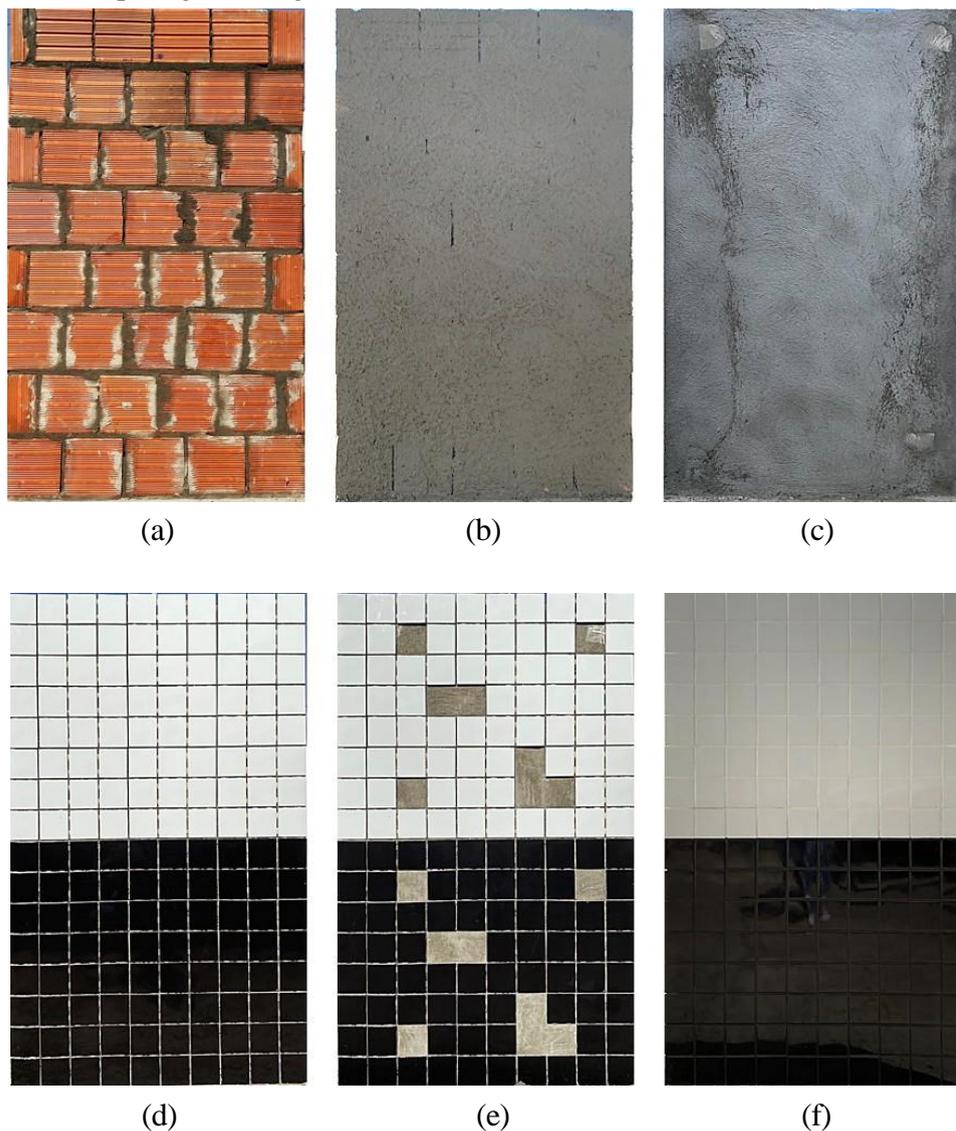
O protótipo consistiu na construção de uma alvenaria de bloco cerâmico com aproximadamente 1,0 metro de largura por 1,6 metros de altura. A alvenaria foi revestida com pastilhas cerâmicas de cor branco na parte superior e cor preto na parte inferior. Para o assentamento dos elementos construtivos foram utilizadas argamassas prontas já caracterizadas pelo fabricante Votorantim cimentos, em função ao amplo uso comercial na região e a doação dos materiais, fruto de uma parceria entre o Laboratório de Reabilitação e Durabilidade das Construções (LAREB) com a empresa.

Como um dos objetivos do trabalho é desenvolver uma técnica capaz de identificar destacamentos cerâmicos por termografias em edifícios existentes, considerou-se uma condição de aplicação de argamassa colante nas cerâmicas apenas com espalhamento da argamassa colante no tardo da cerâmica, com a aplicação de uma sequência de golpes com marreta emborrachada de assentamento, sem muita preocupação com a quebra dos cordões de assentamento. Estudos anteriores reportados na literatura já apontaram que numa condição de

perfeito assentamento cerâmico, a identificação de deslocamento é possível, e que o desafio é identificar os deslocamentos em situações de baixa ou pobre aderência cerâmica decorrente do assentamento inadequado.

O sequenciamento do processo construtivo pode ser visto na Figura 13 a seguir:

Figura 13 - Representação do processo construtivo: (a) Assentamento do bloco cerâmico; (b) Chapisco; (c) Emboço; (d) Assentamento do revestimento cerâmico; (e) Simulação de áreas deslocadas; (f) Aplicação do rejunte



Fonte: Autora (2024).

O processo construtivo seguiu as diretrizes da NBR 7200:1998 (Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento) e, também, da NBR 13755:2017 (Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante - Projeto, execução, inspeção e aceitação - Procedimento). Após a execução da alvenaria esperou-se 14 dias para a realização do chapisco. Passaram-se mais 3

dias entre a cura do chapisco e a execução do emboço. A aplicação do revestimento cerâmico foi feita somente 14 dias depois do emboço e, por fim, 3 dias depois (72h) foi feita a aplicação do rejunte nas juntas de assentamento.

Os materiais prontos utilizados para o assentamento e acabamento do painel experimental estão ilustrados na Figura 14.

Figura 14 - Materiais prontos utilizados para o assentamento e acabamento da alvenaria: (a) Argamassa matrix 5201; (b) Argamassa matrix 2202; (c) Argamassa colante ACIII flexível; (d) Rejunte flexível da Quartzolit

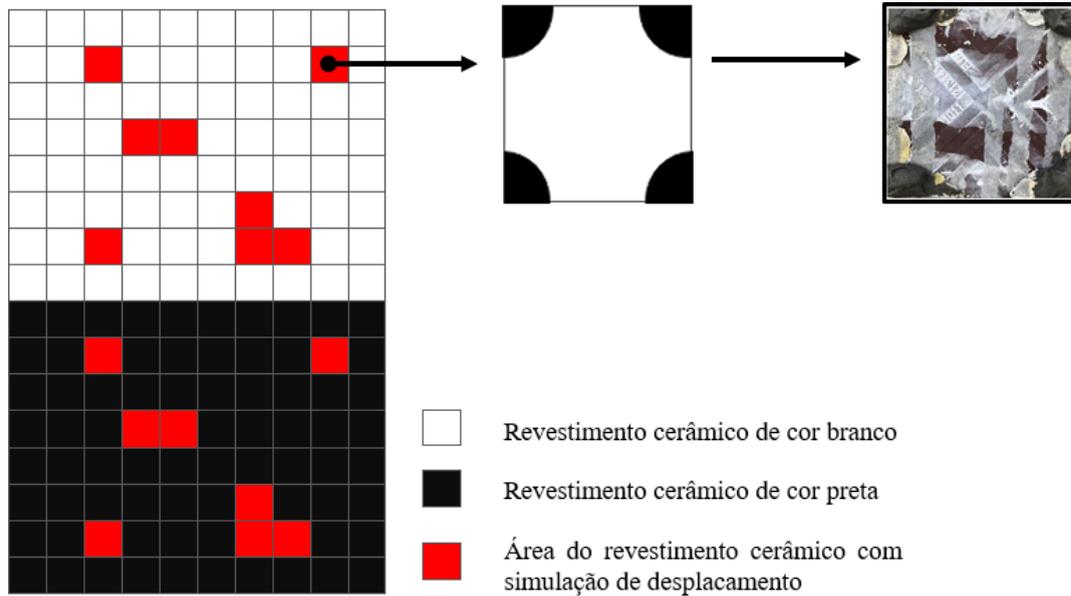


Fonte: Adaptado de imagens ilustrativas retiradas de sites livres na internet (2024).

Os dados da ficha técnica de cada argamassa encontram-se nos Anexos A, B e C, respectivamente. O assentamento dos blocos cerâmicos (9 cm x 9 cm x 19 cm) foi feito com argamassa MATRIX 5201, por ser de uso geral aplicável a diferentes elementos de alvenaria de vedação e também indicada para áreas internas e externas. O chapisco, por sua vez, foi feito *in loco* utilizando o traço 1:3. Para o emboço foi utilizado argamassa MATRIX 2202 indicada para revestimento de áreas externas com elevada trabalhabilidade. Já o assentamento do revestimento cerâmico foi feito com argamassa ACIII flexível que proporciona alta aderência e flexibilidade no assentamento de uma ampla variedade de revestimentos. O revestimento foi aplicado com o espalhamento da argamassa colante no tardo, seguido da aplicação com martelo emborrachado para fixação das cerâmicas, mas sem arrasto, de modo a replicar revestimentos de edifícios existentes com baixa aderência do revestimento cerâmico. O preenchimento das juntas de assentamento foi feito com a aplicação de rejunte da marca Quartzolit nas respectivas cores das pastilhas cerâmicas.

A alvenaria foi revestida com duas cores de pastilhas cerâmicas, branco e preto, utilizando-se no total 80 pastilhas de cada cor. Cada uma das pastilhas utilizadas possuem 10 cm de largura por 10 cm de comprimento, com junta de assentamento de 4 milímetros. Para cada uma das cores foram simulados a existência de deslocamentos cerâmicos. A Figura 15, mostra uma representação esquemática da alvenaria com a identificação e localização das áreas deslocadas nas diferentes cores do revestimento.

Figura 15 - Representação esquemática do projeto de alvenaria com a identificação e localização das áreas deslocadas nas diferentes cores do revestimento



Fonte: Autora (2024).

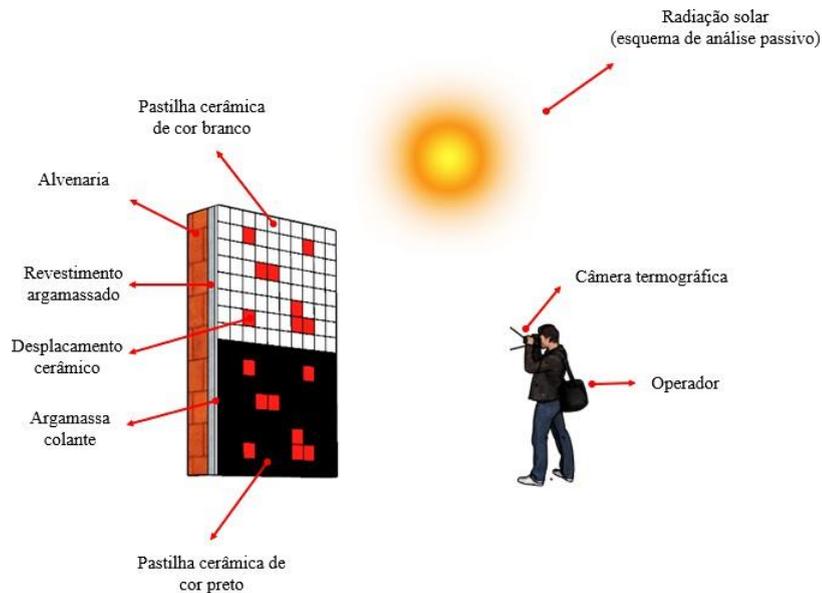
A simulação dos deslocamentos foram feitos após o assentamento de todas as pastilhas cerâmicas no substrato. Aquelas que apresentariam falhas de aderência foram retiradas e passado pequenas quantidades de argamassa colante apenas em suas extremidades. A localização das áreas deslocadas em ambas as cores do revestimento são as mesmas. As cerâmicas com deslocamento foram localizadas próximas umas das outras e, também, separadas para que fosse possível observar seus respectivos comportamentos nas imagens termográficas.

3.2.4 Coleta de dados

3.2.4.1 Descrição do experimento

O programa experimental consistiu em submeter o painel teste a condições ambientais de exposição, por se tratar de um esquema de análise passivo. O intuito foi realizar um ensaio o mais próximo possível de casos em escalas reais. A exposição ambiental gerou o aquecimento do objeto e a consequente variação de temperatura aparente nas zonas aderidas e aquelas com simulações de deslocamento previamente estabelecidas. A Figura 16 ilustra o processo de realização dos registros termográficos.

Figura 16 - Representação esquemática do processo de realização dos registros termográficos



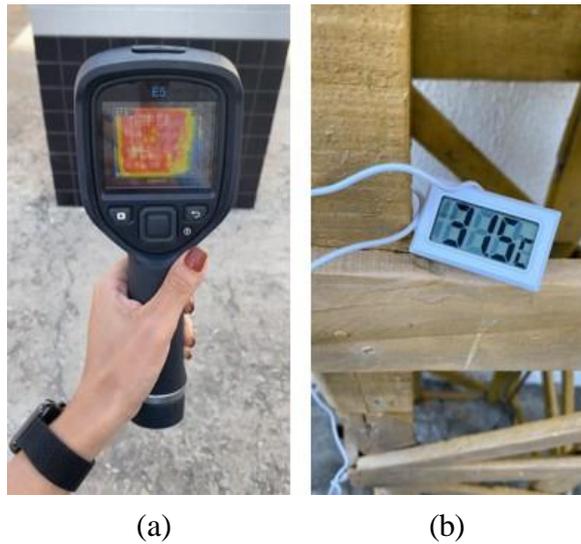
Fonte: Autora (2024).

Os registros termográficos foram realizados em duas épocas do ano, seca (01 de novembro de 2022) e chuvosa (20 de abril de 2023). Na época seca caracterizou-se um dia predominantemente ensolarado e foram feitos registros das 6h às 21h. Na época chuvosa, por se tratar de um dia parcialmente nublado, foram considerados os horários de 7h às 18h. Em ambos os casos, os registros foram feitos a 2m de distância do painel experimental, abrangendo as duas cores do revestimento com intervalos de uma hora entre uma medição e outra. Ao longo da coleta de dados, foram registradas três situações em que a superfície cerâmica estava sujeita: sem incidência solar, com incidência solar direta (fase de aquecimento) e após a incidência solar direta (fase de arrefecimento). Em paralelo aos registros termográficos, também foram anotados os valores de temperatura ambiente para cada um dos horários de inspeção.

3.2.4.2 Materiais utilizados na coleta de dados

Para a coleta de dados foram utilizados os seguintes equipamentos: câmera termográfica da marca FLIR modelo E5xt Wifi com lente de 7 mm e resolução de 160 x 120 e um medidor de temperatura digital com sensor externo, como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Materiais utilizados: (a) Câmera termográfica, (b) Medidor de temperatura



Fonte: Autora (2024).

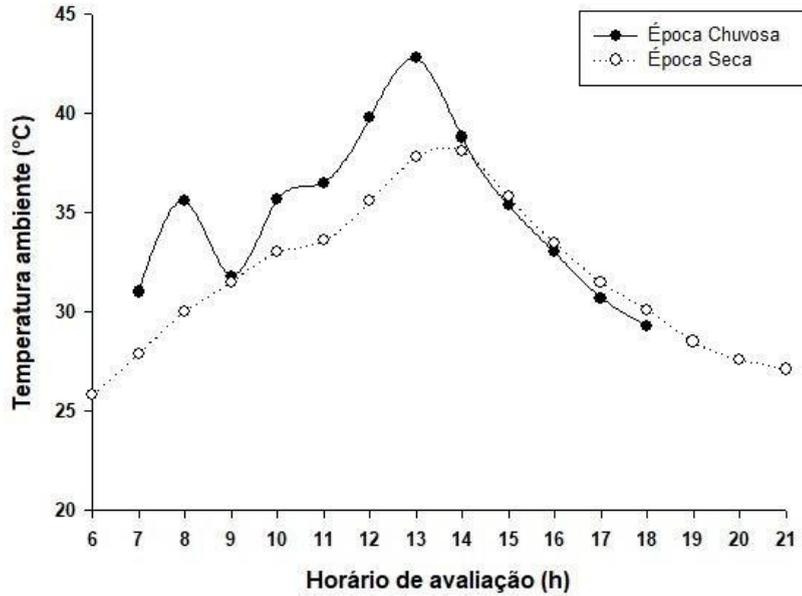
A câmera termográfica foi utilizada para fazer os registros das imagens térmicas e o medidor de temperatura registrou a temperatura ambiente ao longo da inspeção.

3.2.6 Caracterização climática dos dias de inspeção

Como complemento aos dados termográficos coletados, foram esboçadas graficamente as condições climáticas das duas épocas do ano para todos os horários de inspeção. Os dados de temperatura ambiente foram coletados *in loco* com o medidor de temperatura. Os valores de umidade relativa e radiação solar foram obtidos no acervo da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

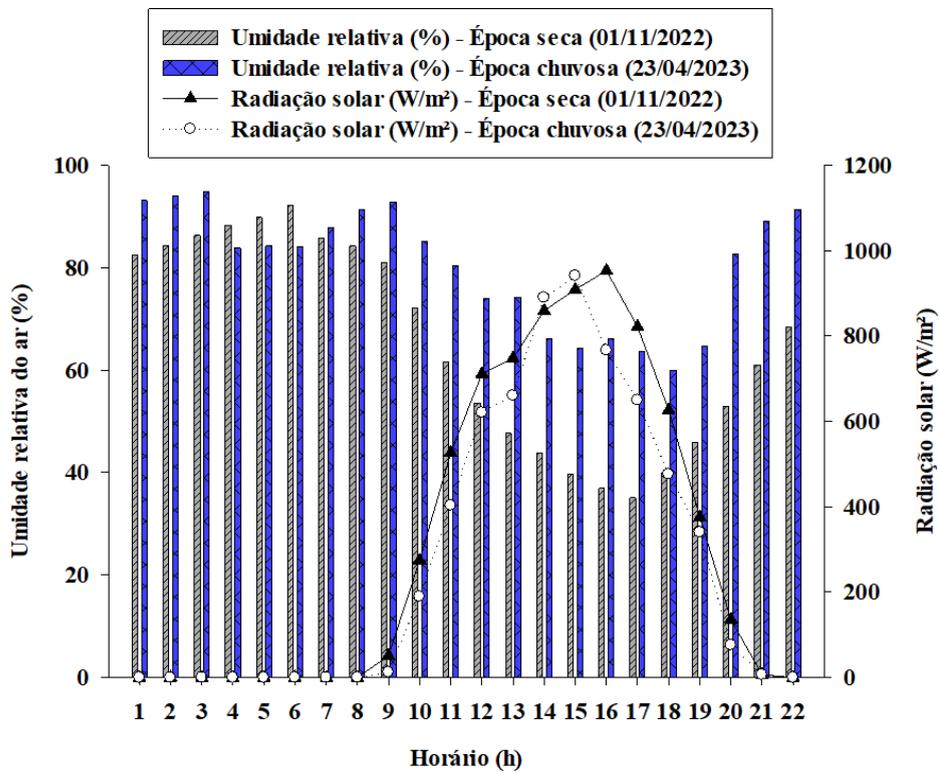
A Figura 18 mostra os valores de temperatura ambiente e a Figura 19 a variação da umidade relativa do ar e da radiação solar nas duas épocas do ano, das 6h às 22h horas.

Figura 18 - Variação da temperatura ambiente ao longo do dia em dois períodos de avaliação, época seca e chuvosa



Fonte: Autora (2024).

Figura 19 - Comportamento da umidade relativa do ar e da radiação solar ao longo do dia na época seca e chuvosa.



Fonte: Adaptado FUNCEME (2024).

3.2.7 Caracterização de imagens termográficas

As imagens termográficas, possuem informações de caráter visual e quantitativas que norteiam sua interpretação, conforme Figura 20.

Figura 20 - Indicação de informações presentes nas imagens termográficas



Fonte: Autora (2024).

Cada termograma apresenta na extremidade direita da imagem uma escala de cores que trata-se da conversão da radiação infravermelha refletida e emitida pela alvenaria, em uma imagem visível, passível de ser interpretada. As diferentes cores, referem-se aos diferentes comprimentos de onda. A extremidade superior da escala de cores significa a intensidade de radiação mais elevada e a extremidade inferior a intensidade mais baixa de radiação. A intensidade de radiação térmica é diretamente proporcional a temperatura aparente e varia dos tons avermelhados aos azulados. Quanto maior a temperatura aparente da área em estudo, mais vermelho será sua cor e maior será a intensidade de radiação captada pela câmera termográfica. Já o contraste térmico decorre da diferença de emissividade dos materiais.

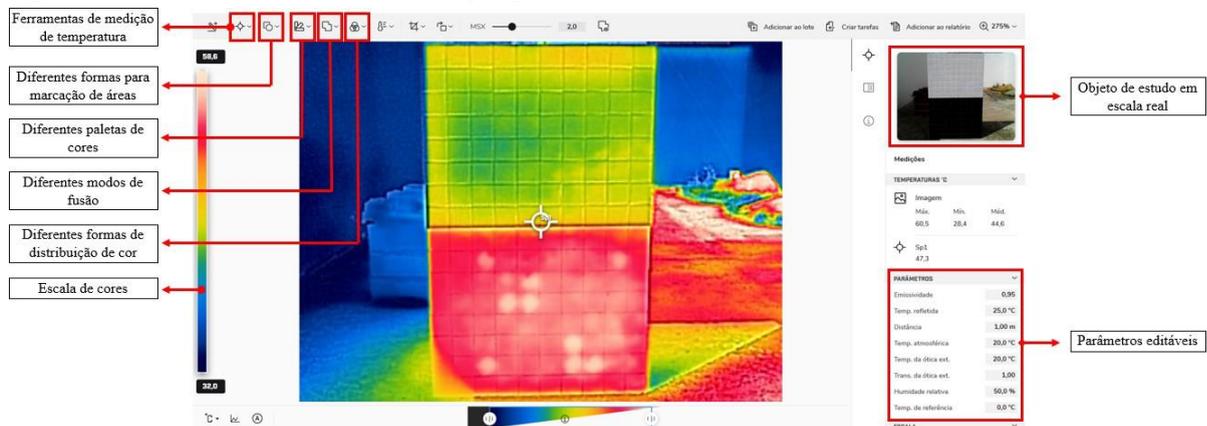
Os termogramas também mostram valores que expressam as temperaturas aparentes máxima, mínima e média da área enquadrada na imagem. A temperatura aparente máxima e mínima estão localizadas na parte superior e inferior da faixa com a escala de cores, respectivamente. A temperatura aparente média é indicada na parte superior esquerda da imagem térmica. Geralmente, esses dados não são específicos do objeto em estudo, uma vez que a câmera termográfica capta radiações dos seus arredores e do plano de fundo que, em casos de escalas reais, são difíceis de serem evitados. A mira cruzada, localizada normalmente no centro do termograma, mostra o ponto de referência das medições. A mudança da sua

localização não impacta em variações nos valores de temperatura aparente da superfície do material, apenas, em uma diferença no contraste visual dos elementos.

3.2.8 Processamento de dados qualitativos e quantitativos

Para o processamento dos dados, seja por análises qualitativas ou quantitativas, utiliza-se o software FLIR Tools. O programa é gratuito, intuitivo, permite visualizar o objeto em escala real e mensurar os valores de temperatura em toda a superfície do objeto de estudo. Possibilita também editar as imagens térmicas trocando a paleta de cores, ajustando o modo de fusão, a distribuição de cor e dentre outras funções, que a depender do caso facilitam a visualização de áreas anômalas, conforme mostra a Figura 21.

Figura 21 - Parâmetros editáveis no programa FLIR Tools



Fonte: Autora (2024).

A identificação dos deslocamentos é feito inicialmente por meio de uma análise qualitativa do termograma. Nesta fase busca-se identificar áreas em que a intensidade de radiação é gradativamente mais quente ou mais fria, a depender do ciclo térmico a qual o objeto está sujeito. O intuito é avaliar o fluxo de calor de zonas deslocadas e bem aderidas e definir um padrão no comportamento térmico do revestimento. Como complemento pode ser feito uma análise quantitativa. O método baseia-se na avaliação da variação da temperatura aparente entre áreas anômalas e normais. A temperatura aparente é quantificada pela ferramenta área do programa FLIR Tools. Os dados de temperatura máxima e mínima são exportados para um planilha no Excel onde considera-se a média como valor de referência para as análises. A representação gráfica dos dados foi feita no programa SigmaPlot (Kornbrot, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Medições laboratoriais

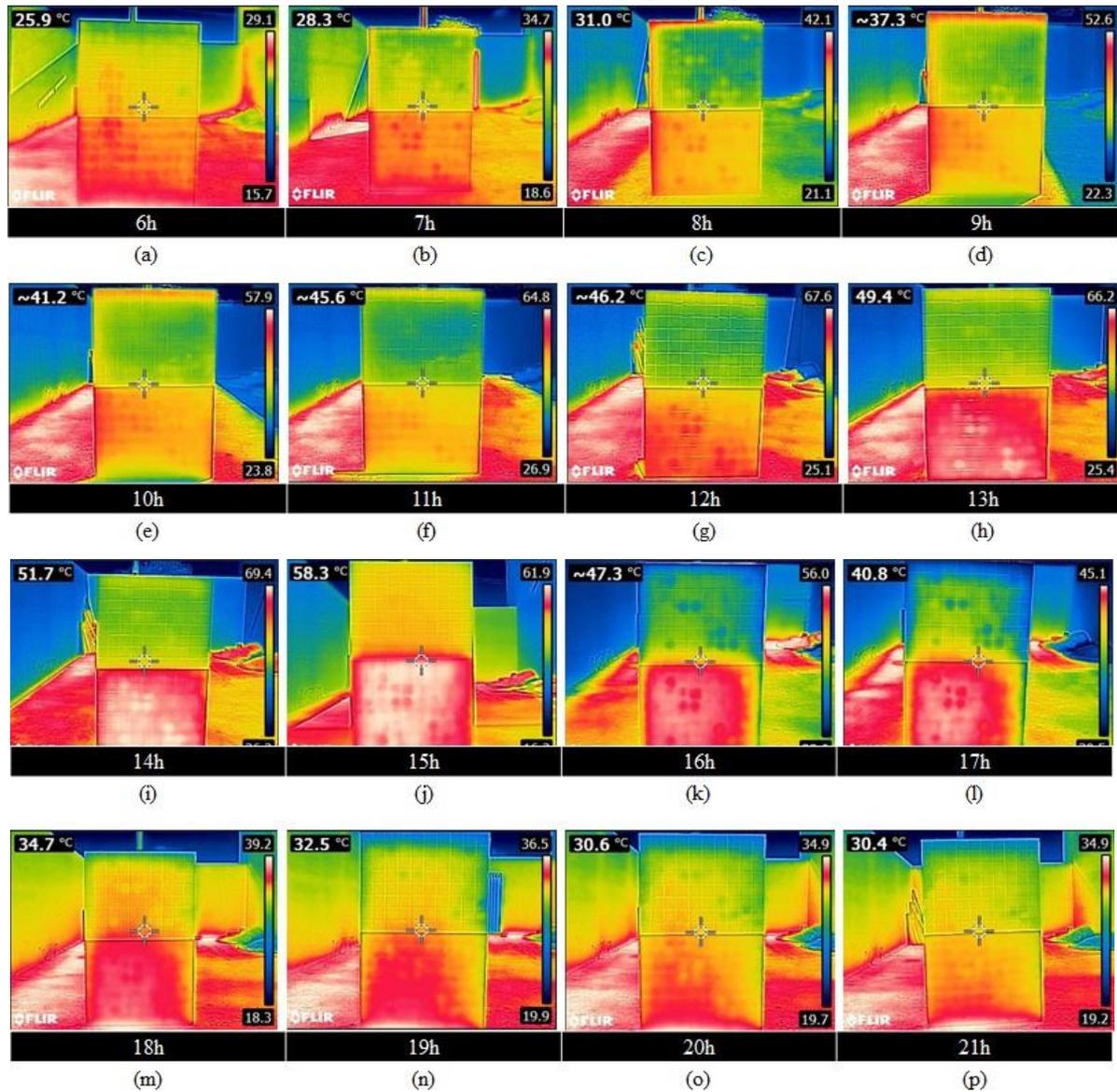
4.1.1 Análises qualitativas baseadas em medições laboratoriais

Como resultado preliminar dos levantamentos feitos a partir das imagens termográficas do painel experimental, são apresentadas duas sequências de termogramas que expressam a intensidade de radiação térmica, bem como o ganho de temperatura ambiente (T_a) ao longo do dia, para obter uma análise dinâmica.

A Figura 22, mostra a variação térmica do painel experimental ao longo de um dia predominantemente ensolarado (01 de novembro de 2022). São apresentados 16 termogramas, das 6h às 21h. O horário inicial (às 6h), foi registrado ainda antes da incidência solar ($T_a = 25,8 \text{ }^\circ\text{C}$). A partir das 7h até 14h, observou-se um aumento linear da temperatura ambiente, em função da intensidade acumulada da radiação ($T_a = 27,9 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \text{ }^\circ\text{C}$, $31,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $33 \text{ }^\circ\text{C}$, $33,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $35,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $37,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $38,1 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente). Já das 15h às 21h notou-se efeito contrário, quando foi identificada redução gradativa desta radiação ($T_a = 35,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $33,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $31,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $30,1 \text{ }^\circ\text{C}$, $28,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $27,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $27,1 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente).

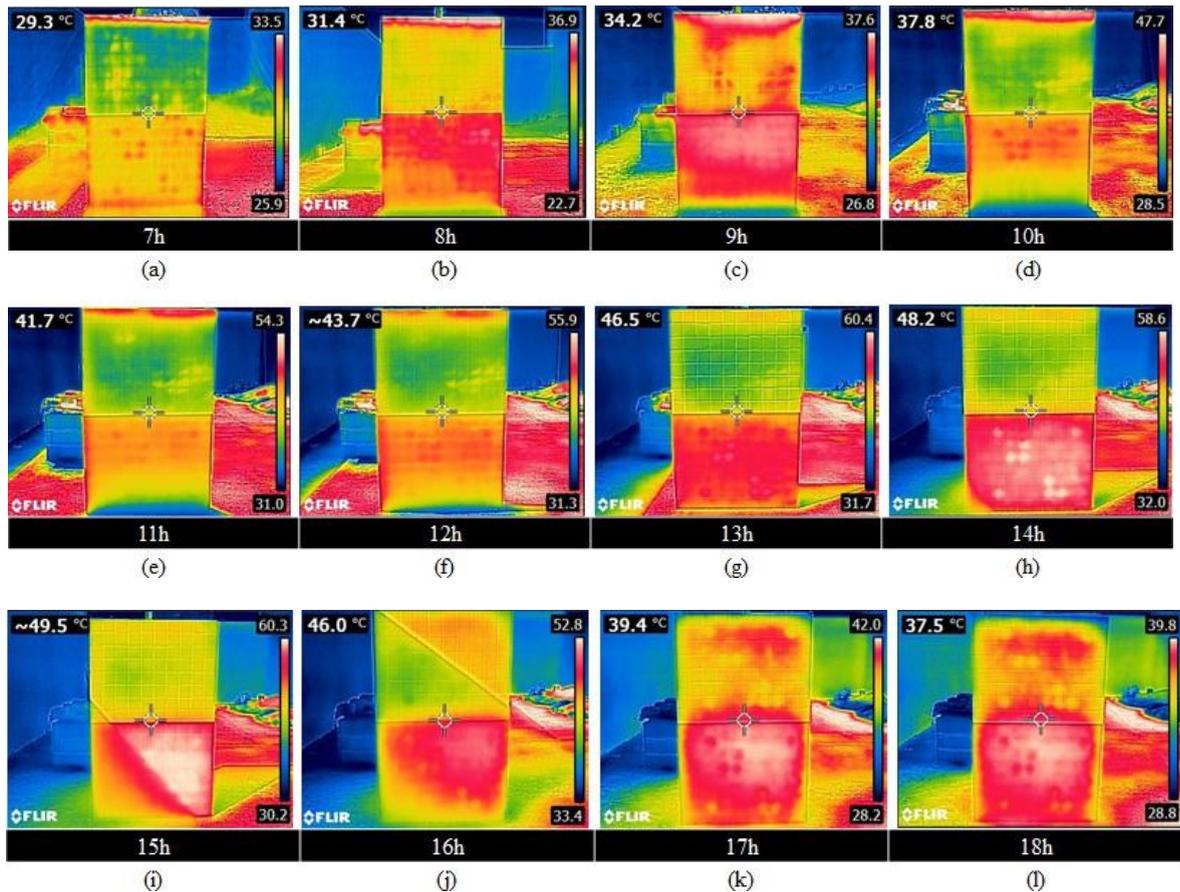
A Figura 23, mostra 12 termogramas em um dia parcialmente nublado (20 de abril de 2023). Nos dois primeiros, 7h e 8h, registrou-se um aumento na temperatura ambiente ($T_a = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ e $35,6 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente), além da passagem de nuvens carregadas na segunda hora. Às 9h houve uma queda de $3,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e a ocorrência de uma leve precipitação ($T_a = 31,8 \text{ }^\circ\text{C}$). Das 10h até às 13h a temperatura ambiente aumentou ($T_a = 35,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $39,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $42,8 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente), porém havia a predominância de ventos fortes no local. Entre 14h e 18h as temperaturas reduziram ($T_a = 38,8 \text{ }^\circ\text{C}$, $35,4 \text{ }^\circ\text{C}$, $33 \text{ }^\circ\text{C}$, $30,7 \text{ }^\circ\text{C}$, $29,3 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente), chegando a incidir sombreamento sobre a superfície em estudo às 15h e 16h.

Figura 22 - Termogramas de um dia predominantemente ensolarado: (a) sem incidência solar, (a) início de aquecimento, (c) 1h após o início de aquecimento, (d) 2h após o início de aquecimento, (e) 3h após o início de aquecimento, (f) 4h após o início de aquecimento, (g) 5h após o início de aquecimento, (h) 6h após o início de aquecimento, (i) 7h após o início de aquecimento, (j) início de arrefecimento, (k) 1h após o início de arrefecimento, (l) 2h após o início de arrefecimento, (m) 3h após o início de arrefecimento, (n) 4h após o início de arrefecimento, (o) 5h após o início de arrefecimento, (p) 6h após o início de arrefecimento.



Fonte: Autora (2024).

Figura 23 - Termogramas de um dia parcialmente nublado: (a) início de aquecimento, (b) 1h após o início de aquecimento com passagem de nuvens carregadas, (c) 2h após o início de aquecimento com leve precipitação, (d) 3h após o início de aquecimento com ventos fortes, (e) 4h após o início de aquecimento com ventos fortes, (f) 5h após o início de aquecimento com ventos fortes, (g) 6h após o início de aquecimento com ventos fortes, (h) início de arrefecimento, (i) 1h após o início de arrefecimento com incidência de sombreamento, (j) 2h após o início de arrefecimento com incidência de sombreamento, (k) 3h após o início de arrefecimento, (l) 4 horas após o início do arrefecimento.

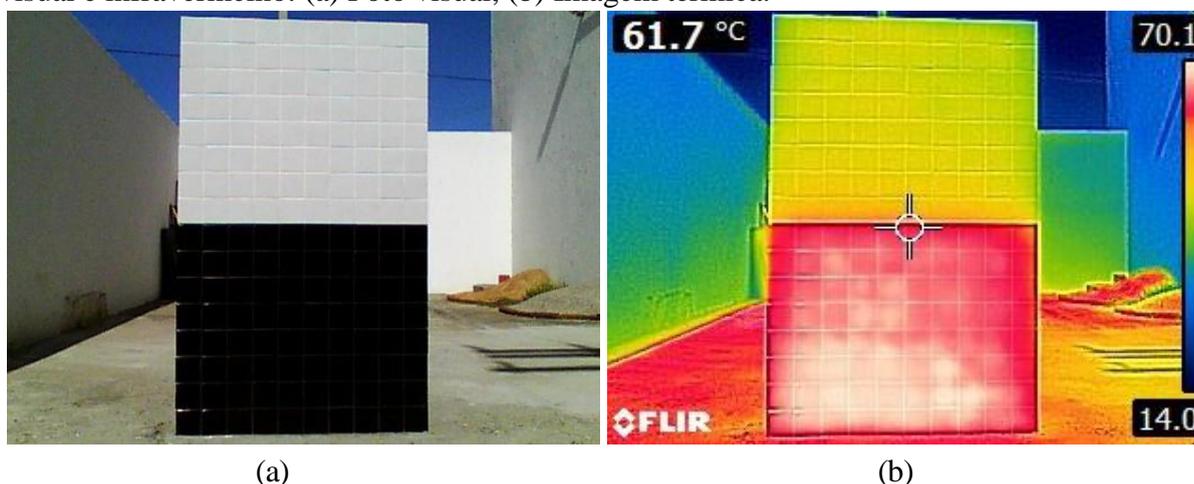


Fonte: Autora (2024).

Ao analisar visualmente os termogramas observa-se que, em ambos os casos, o revestimento escuro apresenta uma escala de cor avermelhada. Isso ocorre devido ao seu elevado potencial de absorção da radiação incidente, associado a uma maior emissão de radiação. Por outro lado, predomina-se no revestimento claro as cores amareladas, esverdeadas e azuladas, dado ao alto potencial de reflexão do material e seu baixo poder de emissão. Esse comportamento é característico da diferença no parâmetro de emissividade entre os dois tipos de revestimentos que, por sua vez, costuma ser maior para cores escuras e menor para cores claras.

A exemplo, a Figura 24 mostra um comparativo da intensidade de radiação térmica em uma alvenaria com revestimento cerâmico branco e preto, em visual e infravermelho.

Figura 24 - Comparação de uma alvenaria com revestimento cerâmico branco e preto em visual e infravermelho: (a) Foto visual, (b) Imagem térmica.



Fonte: Autora (2024).

Na foto visual, o revestimento branco reflete mais do que o revestimento preto pois os olhos humanos captam apenas o que é refletido. Em contrapartida, na imagem térmica, o revestimento preto irradia mais que o revestimento branco, uma vez que a câmera termográfica capta além da radiação refletida, a radiação emitida pelo material. Em outras palavras, é a diferença de emissividade que causa o contraste da imagem térmica e não a diferença de temperatura. Se comparado, a temperatura da superfície é similar nas duas cores do revestimento. Logo, o que se vê no termograma não é uma distribuição de temperatura, mas sim a intensidade de radiação.

No que se refere ao comportamento térmico das regiões bem aderidas e aquelas deslocadas, observou-se um padrão que varia a depender do ciclo de aquecimento e arrefecimento, podendo ainda sofrer interferência de fatores externos. O ciclo de aquecimento foi caracterizado pela ascensão da temperatura ambiente aliado a um aumento na intensidade de radiação. Nesta fase, as zonas de baixa aderência apresentaram uma temperatura aparente mais elevada que as áreas ao seu redor, com exceção ao período de equilíbrio térmico. O equilíbrio térmico costuma ocorrer em intermédio a essas duas fases, mesmo que em um curto período de tempo. É o estado que marca o início do ciclo inverso do fluxo de calor, conhecido como arrefecimento, que ocorre geralmente quando não se tem incidência solar direta sobre a superfície. Na fase de arrefecimento os deslocamentos apresentaram uma temperatura menor

que as demais regiões. O calor se dissipou seguindo o caminho com menor resistência térmica devido às pontes térmicas, que se evidenciam em regiões onde as propriedades dos materiais sofreram alguma alteração. Nesse caso, trata-se da perda de aderência entre a placa cerâmica e o revestimento argamassado.

Ao comparar o conjunto de dados de um dia ensolarado (Figura 22) e outro parcialmente nublado (Figura 23), algumas particularidades nos resultados foram notadas. Na primeira hora do dia, 6h, e a partir das 19h, a aplicação da técnica tornou-se limitada, o que condiz com dados obtidos em uma análise de descolamento de reboco em fachadas (Freitas; Freitas; Barreira, 2014) e estudo sobre deslocamento em sistema de revestimento cerâmico (Lourenço; Matias; Faria, 2017). A ausência de uma fonte de excitação térmica impossibilitou a detecção dos deslocamentos, já que este fundamento físico favorece o diferencial de temperatura entre as zonas bem aderidas e mal aderidas. Por este motivo a segunda rodada de teste (Figura 23) foi realizada apenas das 7h às 18h.

No período seco do ano, sempre que se teve uma variação de + 2 °C na fase de aquecimento e - 2 °C na fase de arrefecimento, os deslocamentos tornaram-se mais visíveis. Às 7h houve uma variação de + 2,1 °C e os deslocamentos foram notados apenas no revestimento escuro em função das propriedades térmicas do material branco. Às 8h, houve uma variação positiva de 2,1°C que permitiu detectar deslocamentos em ambas as cores do revestimento, apesar de que no revestimento claro ainda incidiam reflexos sobre a superfície que dificultavam a perfeita visualização. Nos horários de 9h às 11h foi pouco notável a visibilidade para ambas as cores. Somente nas duas últimas horas do ciclo de aquecimento (12h e 13h) os deslocamentos do revestimento preto puderam ser vistos novamente. Às 14h ocorreu a fase de equilíbrio térmico marcando a inversão do fluxo de calor. Durante o equilíbrio térmico os deslocamentos ficaram pouco evidentes, tornando-se um horário inviável para captura de imagens térmicas. Na fase de arrefecimento, o comportamento foi semelhante. Na primeira hora do ciclo (15h) foi possível detectar os deslocamentos no revestimento escuro e nas duas horas seguintes em ambas as cores.

No período chuvoso, o deslocamento do revestimento escuro foi notado na primeira e última hora do ciclo de aquecimento (7h e 14h). Nesse meio termo a ocorrência de fatores ambientais, como a passagem de nuvens carregadas, uma leve precipitação e a ocorrência de ventos fortes interferiram nos resultados. No início da fase de arrefecimento passou a incidir sombreamento sobre a superfície e apenas, nas duas últimas horas do ciclo foi

possível detectar os deslocamentos em ambas as cores do revestimento.

Dado o exposto, a Tabela 3 apresenta os horários viáveis para detecção de deslocamento cerâmico em revestimentos de cores claras e escuras, considerando as variações da temperatura ambiente e, também, as diferentes épocas do ano.

Tabela 3 - Detecção de deslocamento cerâmico em função da temperatura ambiente e horário de avaliação

Horário (h)	T. ambiente (°C)		Variação de T. (°C)		Detecção de deslocamento			
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1		Caso 2	
					Claro	Escuro	Claro	Escuro
6	25,8	-	-	-	×	×	-	-
7	27,9	31,0	2,1	-	×	✓	×	✓
8	30,0	35,6	2,1	4,6	✓	✓	×	×
9	31,5	31,8	1,5	-3,8	×	×	×	×
10	33,0	35,7	1,5	3,9	×	×	×	×
11	33,6	36,5	0,6	0,8	×	×	×	×
12	35,6	39,8	2,0	3,0	×	✓	×	×
13	37,8	42,8	2,2	3,0	×	✓	×	×
14	38,1	38,8	0,3	-4,0	×	×	×	✓
15	35,8	35,4	-2,3	-3,4	×	✓	×	×
16	33,5	33,0	-2,3	-2,4	✓	✓	×	×
17	31,5	30,7	-2,0	-2,3	✓	✓	✓	✓
18	30,1	29,3	-1,4	-1,4	×	×	✓	✓
19	28,5	-	-1,6	-	×	×	-	-
20	27,6	-	-0,9	-	×	×	-	-
21	27,1	-	-0,5	-	×	×	-	-

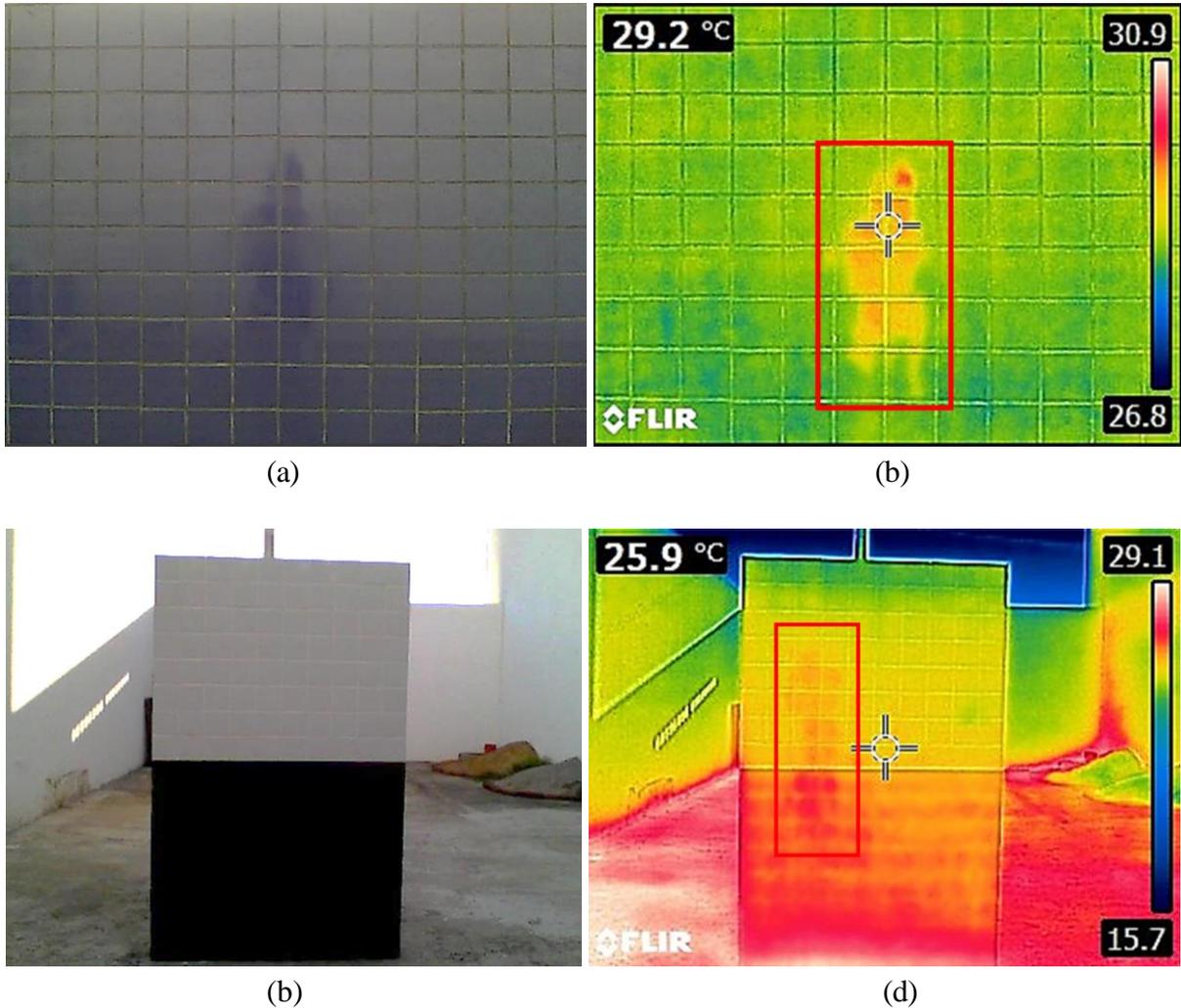
Fonte: Autora (2024).

Ao longo do estudo verificou-se, inclusive, padrões de comportamento térmico que ainda não foram discutidos na literatura e que influenciam negativamente no processamento das imagens térmicas, como é o caso dos reflexos, zonas de borda e sombreamento.

A parcela de reflexão dos revestimentos cerâmicos, pode ser considerada um empecilho na adoção da termografia infravermelha para detecção de deslocamentos (ITC, 2018). Os reflexos que incidem sobre a superfície dos revestimentos podem, por vezes, serem confundidos e considerados como uma área de baixa aderência. Sempre que existir um objeto quente na frente de uma superfície refletora, será possível notar o reflexo do objeto na

imagem térmica. A Figura 25, mostra a ocorrência desse fenômeno em um caso real.

Figura 25 - Incidência do reflexo do operador sobre o revestimento cerâmico

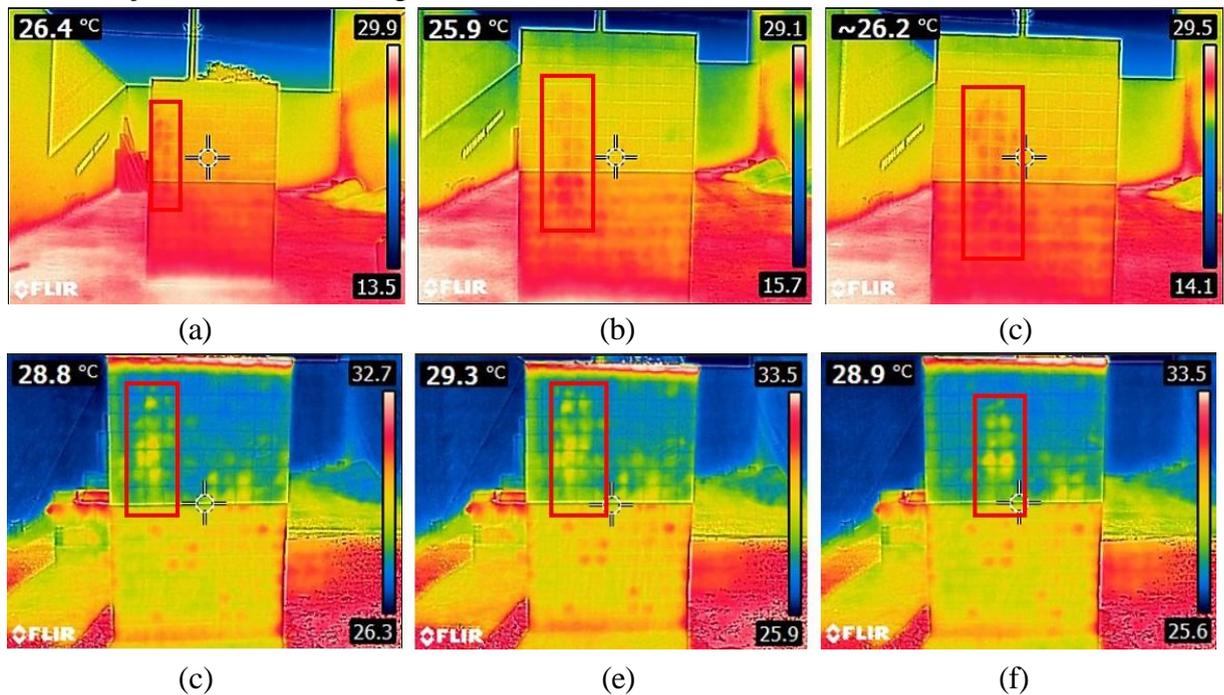


Fonte: Autora (2024).

Em painéis com revestimento cerâmico é comum que algo que seja refletido na superfície, sobretudo, quando se trata dos revestimentos de cores claras. Normalmente, esses reflexos são do próprio operador ou de objetos que se encontram na frente da alvenaria. Na foto visual, os reflexos podem ser perceptíveis ou não, conforme mostram as Figuras 25a e 25c, respectivamente. Já nos termogramas, os reflexos costumam aparecer como pontos mais quentes do que a área ao seu redor. As imagens da direita mostram regiões pontuais que, para um operador pouco experiente, podem ser consideradas como uma zona de baixa aderência.

Após a realização de vários registros, constatou-se que se porventura no ato da captura de uma imagem térmica um ponto quente se move quando o operador se movimentava ou muda o ângulo da câmera termográfica, isso irá gerar um reflexo. A Figura 26 mostra o teste feito durante os registros do painel experimental.

Figura 26 - Variação da localização do reflexo devido movimentação do operador e mudança de inclinação da câmera termográfica

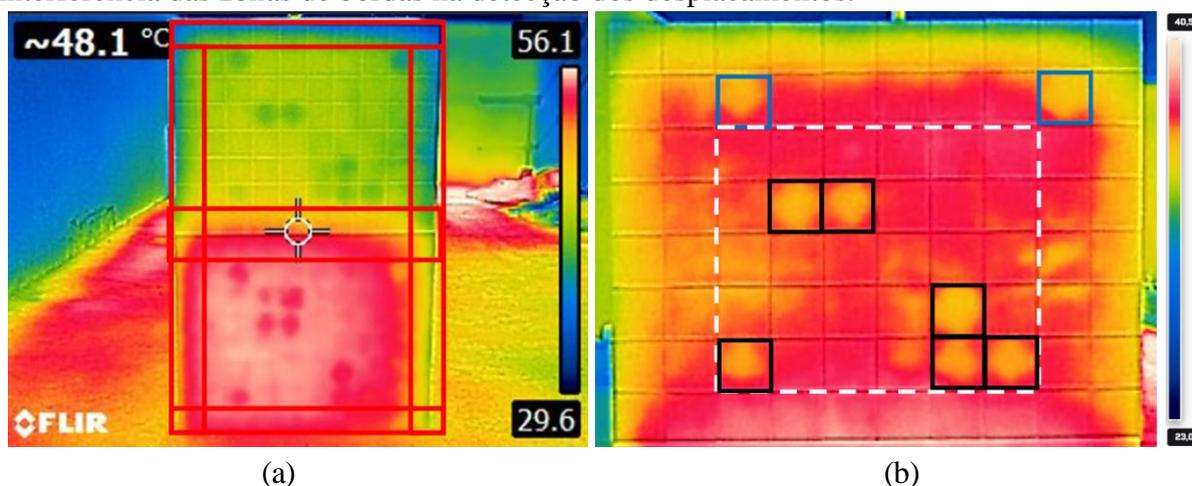


Fonte: Autora (2024).

A Figura 26 mostra que um reflexo, geralmente, apresenta de forma abrupta uma temperatura superior à do seu redor, enquanto que um aquecimento real possui um gradiente de temperatura. Nesse caso, o operador precisa ter expertise de identificar essa ocorrência no momento de captura do termograma, assim como durante o processamento das imagens termográficas. Uma opção, é ainda durante o registro das imagens térmicas evitar se posicionar diretamente na frente do alvo ou utilizar utensílios que possam bloquear o reflexo, como por exemplo uma lona ou um papelão.

Além dos reflexos, existem também os efeitos de borda que são considerados uma ponte térmica. As pontes térmicas são regiões em que a resistência térmica foi interrompida ou reduzida. Nesses espaços ocorre a transmissão de calor entre o ambiente externo e interno. Normalmente se manifestam na extremidade das alvenarias por conta da descontinuidade no elemento construtivo e na interfase que delimita diferentes tipos de revestimento. A Figura 27 mostra a zona de ocorrência deste fenômeno, assim como a sua interferência na detecção dos deslocamentos.

Figura 27 - Representação dos efeitos de borda: (a) Área de ocorrência da zona de borda; (b) Interferência das zonas de bordas na detecção dos deslocamentos.



Fonte: Autora (2024).

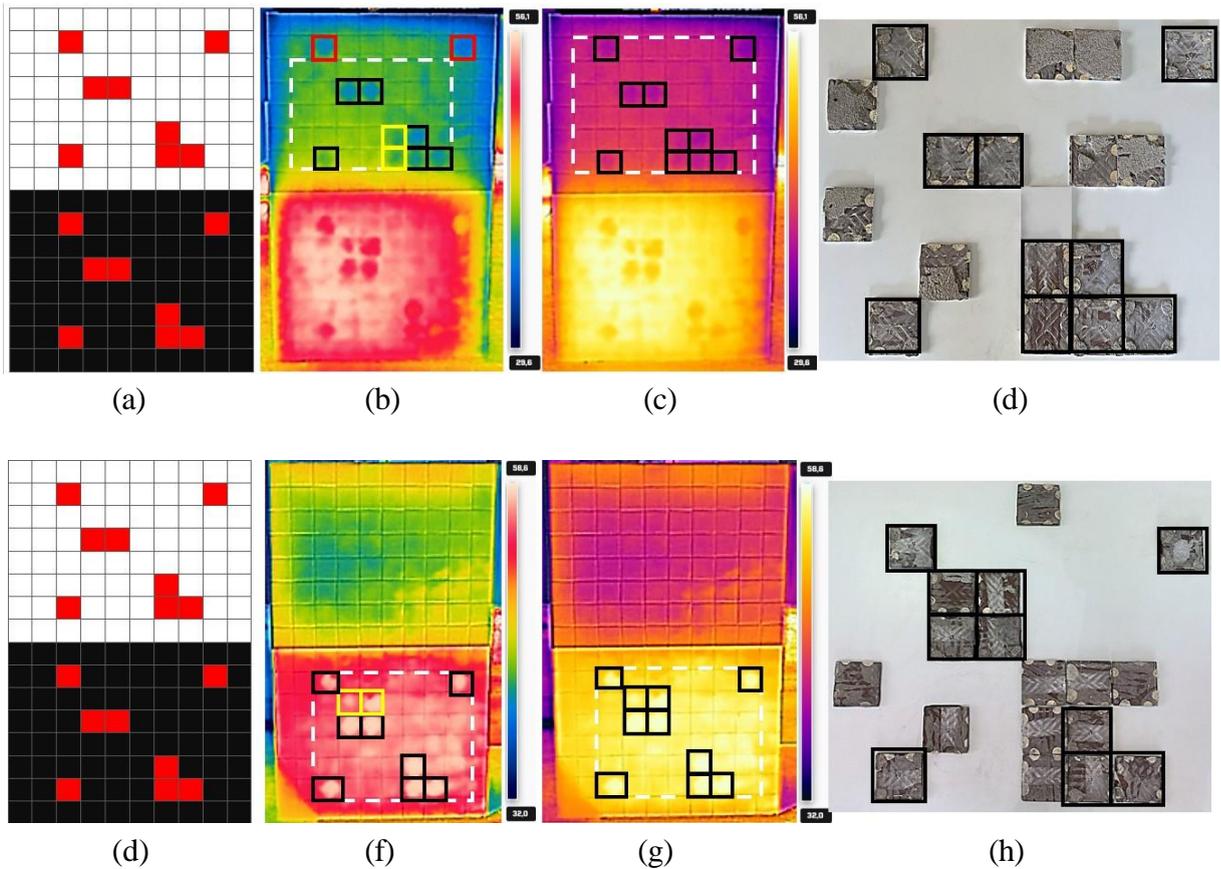
Na Figura 27a é possível observar que a região de influência das zonas de borda variam de 10 a 20 cm que, nesse caso, equivale à distância de uma até duas pastilhas cerâmicas. As regiões de baixa aderência localizadas próximo às zonas de borda sofrem com a interferência do fenômeno, como mostra as regiões delimitadas na cor azul da Figura 27b. Logo, as zonas de bordas devem ser consideradas regiões indeterminadas, pois impossibilitam a identificação dos deslocamentos cerâmicos devido a uniformidade na condutividade térmica. Ao desconsiderá-la, evita-se a detecção de falsos deslocamentos garantindo um maior índice de assertividade.

Assim como as zonas de bordas, notou-se que a incidência de sombreamento sobre a superfície em estudo impede a visualização dos deslocamentos cerâmicos. A sua ocorrência é imprevisível pois depende da variação da elevação solar, ou seja, do ângulo zenital formado entre o zênite local e os raios solares. Sendo assim, este é um fator limitante à aplicação da técnica não destrutiva da termografia infravermelha.

Apesar da influência dos fatores físicos e ambientais constatou-se, no geral, que é possível detectar os deslocamentos cerâmicos por meio da termografia infravermelha e, apenas, com a análise qualitativa como apontam estudos recentes (Freitas; Freitas; Barreira, 2014; Lourenço; Matias; Faria, 2017; Tomita; Chew, 2022). Após explorar os registros termográficos, observou-se que o ideal é realizar uma etapa de processamento das imagens térmicas. Nesta fase, aconselha-se alterar a paleta de cores do termograma para a "airon" e aplicar uma distribuição de cor com melhoria digital de detalhes por meio do software *Flir Tools*.

A Figura 28 mostra um comparativo entre o esquema ilustrativo que representa a simulação dos deslocamentos com as áreas de baixa aderência detectadas pela termografia e, ainda, um registro que comprova o potencial de assertividade da técnica, para as duas cores de revestimento.

Figura 28 - Detecção do deslocamento cerâmico: (a) esquema ilustrativo; (b) termograma com foco no revestimento branco; (c) termograma em airon com foco no revestimento branco; (d) partilhas brancas arrancadas da alvenaria; (e) esquema ilustrativo; (f) termograma com foco no revestimento preto; (g) termograma em airon com foco no revestimento preto; (h) partilhas pretas arrancadas da alvenaria.



Fonte: Autora (2024).

O esquema ilustrativo (Figura 28), representa a alvenaria e as duas cores do revestimento cerâmico, branco e preto. As áreas de cor vermelha sinalizam a localização das pastilhas cerâmicas em que propositalmente simulou-se o deslocamento. Nos termogramas, as linhas tracejadas na cor branca representam as áreas consideradas na análise, visto que o intuito é desconsiderar o efeito das zonas de borda. Os retângulos de cor vermelha, representam as pastilhas cerâmicas que estão deslocadas mas que sofrem com a influência desse fenômeno. Os retângulos de cor preta, representam as pastilhas cerâmicas com baixa aderência que condizem com a simulação realizada. Enquanto os retângulos na cor amarela são zonas de baixa aderência detectadas apenas na termografia.

Em ambas as cores do revestimento a técnica da termografia infravermelha se mostrou eficiente. Constatou-se que o termograma ainda sem processamento apresentou 75% de assertividade para cores claras e 100% para cores escuras. No revestimento branco os outros 25% dos deslocamentos não puderam ser confirmados devido a influência das zonas de bordas. Com o tratamento da imagem térmica, os deslocamentos puderam ser confirmados com maior clareza, além de que a área superior no revestimento branco afetada pelas pontes térmicas reduziu de 20 cm para 10 cm, garantindo 100% de assertividade da técnica de termografia infravermelha. No mais, observou-se que tanto para o revestimento branco quanto o preto, foi diagnosticado baixa aderência em duas pastilhas cerâmicas que não estavam previstas no projeto. Após removê-las manualmente da alvenaria, notou-se que a termográfica foi capaz de identificar uma falha de execução que não havia sido planejada. Durante o assentamento das pastilhas cerâmicas houve erros na aplicação das camadas de argamassas, como mostra a Figura 28d. Este fato garantiu ainda mais credibilidade ao teste realizado, visto que é comum a ocorrência de falhas de execução em casos de escalas reais.

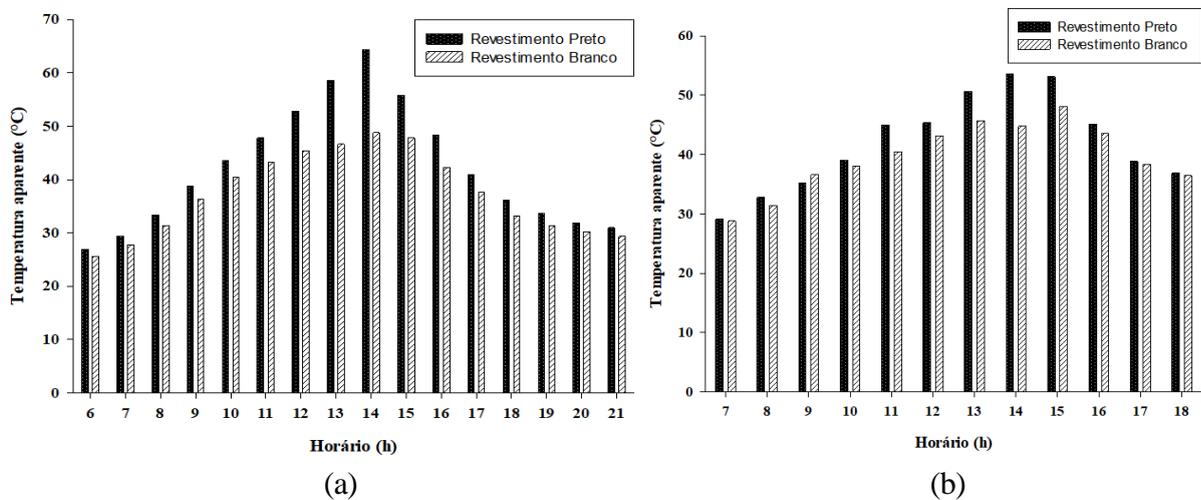
Por fim, sugere-se analisar as diferentes cores de revestimento também de forma individualizada a fim de se certificar dos resultados observados em registros termográficos de seções maiores.

4.1.2 Análises quantitativas baseadas em medições laboratoriais

Os resultados quantitativos visam comprovar por meio de dados numéricos os resultados obtidos na fase qualitativa. A análise baseia-se na medição comparativa dos valores de temperatura aparente registrados nos termogramas. São consideradas as duas cores do revestimento cerâmico, o ciclo térmico a qual estão sujeitos e, ainda, o nível de aderência.

A Figura 29, compara a média das temperaturas máximas obtidas nas zonas de boa aderência do revestimento. Os gráficos referem-se a duas estações do ano, seca e chuvosa. Cada um contempla os revestimentos de cor branco e preto, para todos os horários de inspeção.

Figura 29 - Temperaturas médias máximas obtidas em áreas de revestimentos bem aderidos nas cores branco e preto: (a) Época seca; (b) Época chuvosa



Fonte: Autora (2024).

Quando observado quantitativamente o comportamento das zonas de boa aderência ao longo do dia para ambas as cores do revestimento, notou-se que independentemente da estação do ano e do ciclo térmico, os revestimentos de cores escuras atingem temperaturas aparentes mais elevadas que revestimentos de cores claras, como já esperado e observado pela escala de cores das imagens termográficas.

Os diferenciais térmicos são diretamente influenciados pelas condições de exposição do painel experimental, em função das variações na temperatura ambiente e, também, da intensidade de radiação solar incidente sobre a superfície. Por esse motivo, a inspeção em época seca apresentou uma melhor distribuição da temperatura ao longo do tempo e, para ambos os casos, a amplitude térmica torna-se mais expressiva nos horários de aquecimento máximo, próximos às 14 horas.

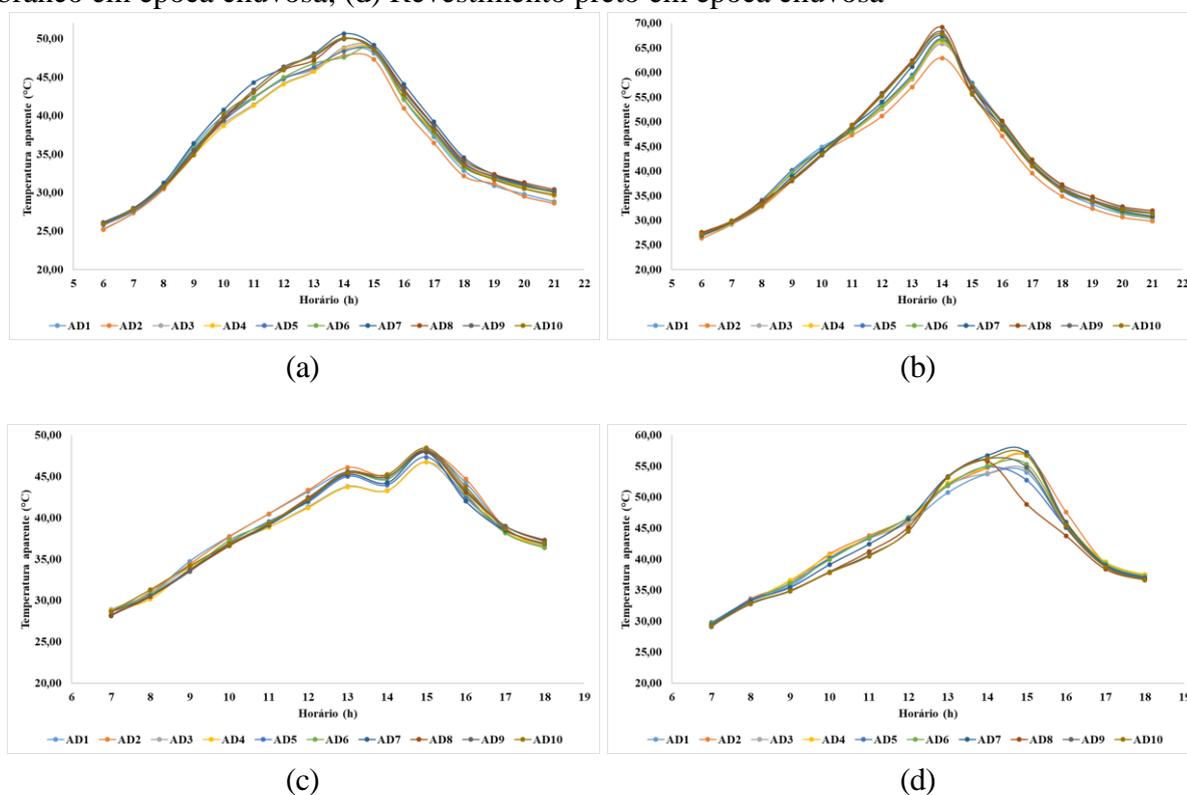
As propriedades físicas do material e os fatores ambientais, também interferem nos resultados. A diferença de emissividade justifica a disparidade de temperatura aparente entre as duas cores do revestimento, enquanto que a ocorrência de fatores externos, tais como a passagem de nuvens carregadas, a ocorrência de precipitações e ventos fortes, explicam o comportamento térmico nos diferentes períodos do ano, conforme discutido em seções anteriores.

A exemplo, às 9h de um dia parcialmente nublado observou-se que o revestimento branco apresentou temperaturas aparentes mais elevadas que o revestimento preto. O resultado foi reflexo da queda de 3,8°C na temperatura ambiente, associado a ocorrência de

uma leve precipitação. O contato direto do revestimento preto com o solo molhado, causou um resfriamento mais rápido nos primeiros centímetros da alvenaria (Figura 23c). O fato dos dados tabulados, se basearem no resultado da média favoreceu a visualização gráfica da ocorrência desse fenômeno.

Adicionalmente, a Figura 30 apresenta as variações térmicas manifestadas para todas as áreas deslocadas (Ad) durante o período matutino e vespertino.

Figura 30 - Variações térmicas para todos os revestimentos deslocados ao longo do dia: (a) Revestimento branco em época seca; (b) Revestimento preto na época seca; (c) Revestimento branco em época chuvosa; (d) Revestimento preto em época chuvosa



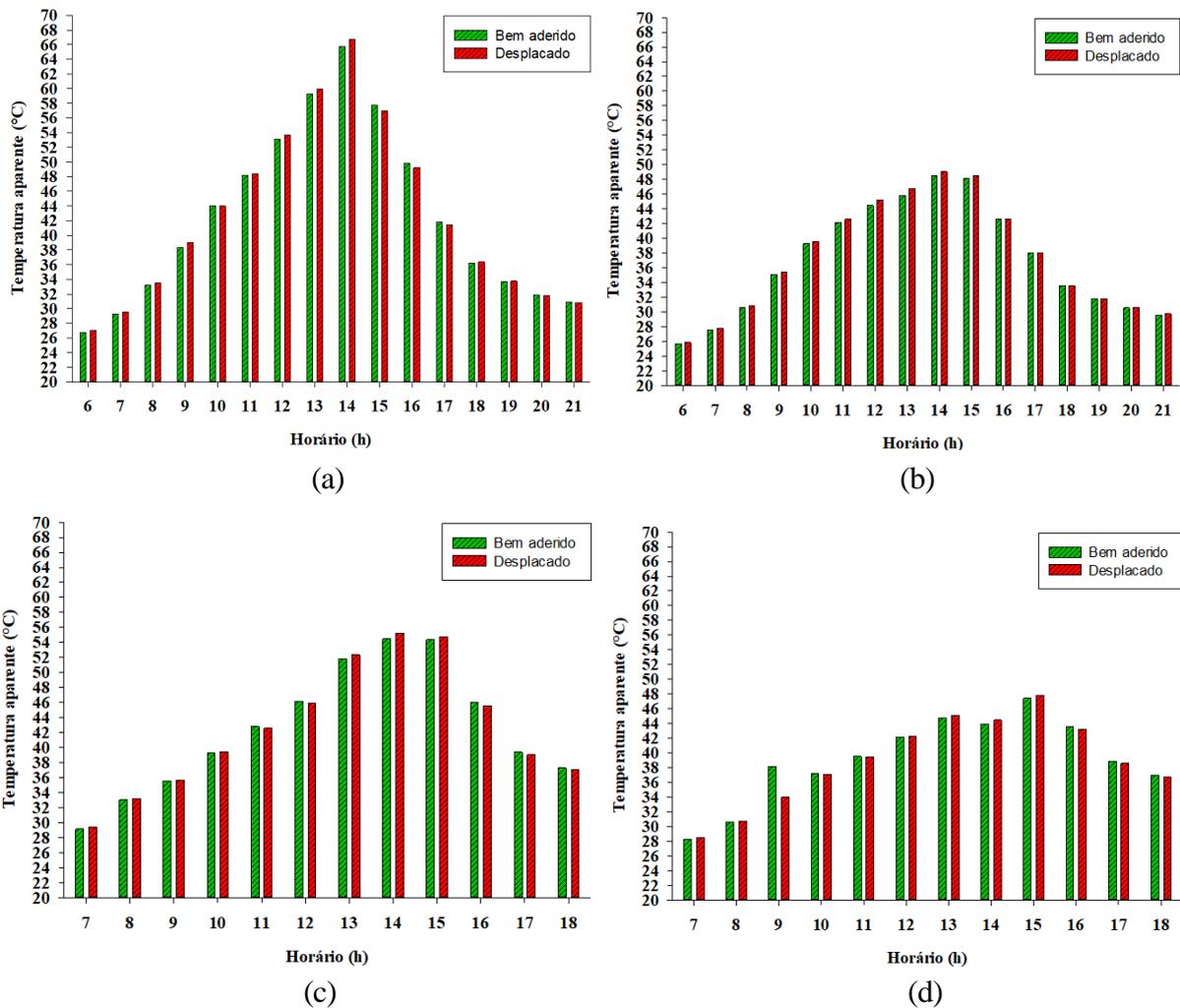
Fonte: Autora (2024).

É notório na Figura 30 que as variações térmicas em zonas deslocadas apresentem um comportamento quadrático com ponto máximo. Apesar da variação na localização do deslocamento cerâmico o comportamento térmico da superfície se mantém constante. Pela manhã a temperatura aparente começa a subir em função do aumento gradativo da temperatura ambiente. O crescimento exponencial permanece até atingir o pico por volta das 14h e 15h que, por sua vez, é o ponto máximo da fase de aquecimento. A partir desses horários se inicia a fase de arrefecimento, as temperaturas aparentes caem dado a redução da temperatura ambiente e da radiação incidente. Com isso, o diferencial passa de um valor positivo para um valor negativo. A partir das 18h às temperaturas aparentes tendem a se

manterem constantes, até atingirem o ponto de equilíbrio onde o diferencial desaparece dificultando a detecção das anomalias.

O revestimento branco em época seca e chuvosa apresentou um declínio na temperatura aparente por volta das 13h e 14h, respectivamente. A incidência de reflexos sobre a superfície favoreceu esse comportamento. O revestimento preto, por sua vez, apenas em época chuvosa apresentou das 14h às 16h para um dos deslocamentos (Ad_8) uma queda na temperatura aparente. Isso ocorreu devido a interferência do sombreamento sobre a superfície, conforme mostra a Figura 23h, Figura 23i e Figura 23j. Em complemento a Figura 31, mostra um comparativo da temperatura média entre as zonas deslocadas e aquelas bem aderidas.

Figura 31 - Temperatura média entre zonas deslocadas e bem aderidas ao longo do dia: (a) Revestimento branco em época seca; (b) Revestimento preto na época seca; (c) Revestimento branco em época chuvosa; (d) Revestimento preto em época chuvosa



Fonte: Autora (2024).

A partir da Figura 31 é possível identificar algumas particularidades sobre o diferencial térmico das áreas deslocadas e bem aderidas que condizem com os resultados da análise qualitativa, quais sejam:

- a) No início da manhã é pouco expressiva a variação térmica entre as regiões deslocadas e bem aderidas;
- b) Na fase de aquecimento os revestimentos deslocados apresentaram temperaturas aparentes maiores que as zonas bem aderidas;
- c) A partir das 14h para um dia seco e 15h para um dia chuvoso ocorreu a inversão do fluxo de calor e zonas deslocadas apresentam temperaturas menores que as zonas bem aderidas;
- d) O diferencial térmico foi sempre superior para um dia predominantemente ensolarado;
- e) Os diferenciais térmicos são maiores em revestimentos escuros, sobretudo, nos horários de aquecimento máximo da painel experimental;
- f) Diferenciais térmicos baixos trazem incertezas na detectabilidade de casos reais;
- g) Enquanto a temperatura ambiente cai e o sol se põe, a amplitude térmica se torna menor até atingir o ponto de equilíbrio;
- h) Após às 19h o diferencial térmico reduz, dificultando a visualização dos deslocamentos.

Os resultados indicam que a detecção de deslocamento cerâmico por termografia infravermelha é mais favorável em períodos secos, portanto, mais ensolarados. A realização de registros termográficos em períodos chuvosos sofrem interferência de fatores ambientais que aumentam a probabilidade de detecção de falsos deslocamentos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A princípio esta dissertação apresentou o potencial de utilização de ensaios não destrutivos para detecção de defeitos em construções, priorizando o uso da termografia infravermelha para diagnóstico de deslocamento cerâmico.

De acordo com o estado da arte já publicado, notou-se nos últimos dez anos que os primeiros relatos da literatura já apontavam que das diversas técnicas de ensaios não destrutivos a termografia seria promissora para detecção de manifestações patológicas em sistemas construtivos. Com o passar dos anos, casos particulares foram estudados, como fissuras, conforto térmico, desprendimento de reboco e problemas de umidade. Inicialmente, foram feitas análises em laboratório com fonte de excitação térmica ativa, já que condições controladas facilitam a interpretação dos dados que ainda eram pouco explorados. Mais recentemente, aplicações em campo vêm sendo feitas para analisar outros tipos de problemas construtivos como os deslocamentos cerâmicos e, também, para avaliar a influência dos fatores ambientais.

Apesar dos avanços nas pesquisas acadêmicas ainda observa-se limitações que provavelmente dificultam o estabelecimento de uma padronização para detecção de deslocamentos cerâmicos. Primeiro, no que diz respeito ao método de registro das imagens térmicas e, segundo, quanto à estratégia de processamento e interpretação dos resultados. Verificou-se ao longo da pesquisa variabilidade na distância adotada entre a câmera e a superfície durante o registro térmico, assim como incertezas quanto a influência da angulação na captação das radiações incidentes e emitidas pelo material. Imprecisão quanto a condutividade térmica nas zonas má aderidas, a depender do horário de medição, grau de severidade da anomalia e cor do revestimento cerâmico também foram observadas.

De maneira geral, constatou-se que este é um método promissor, mas que ainda precisa ser explorado de forma mais abrangente para que possa ser desenvolvido uma metodologia mais assertiva para o tratamento de dados, passível de ser aplicada em diversas situações. No geral, o estado da arte trouxe discussões quanto ao comportamento térmico dos deslocamentos cerâmicos.

Quanto aos resultados obtidos, percebe-se que apesar da influência dos fatores físicos e ambientais constatou-se, no geral, que é possível detectar os deslocamentos cerâmicos por meio da termografia infravermelha. Independente da cor do revestimento observou-se um padrão no comportamento térmico das regiões deslocadas nas fases de aquecimento e arrefecimento para diferentes épocas do ano. Em dias predominantemente ensolarados, os deslocamentos são mais visíveis dado a pouca influência de fatores externos. A ausência de uma fonte de excitação térmica e a ocorrência de sombreamento são fatores que limitam a aplicação da técnica. Assim como a passagem de nuvens carregadas, ocorrência de precipitações, incidência de ventos fortes, reflexos e efeito das zonas de bordas interferem nos resultados. Em revestimentos escuros os deslocamentos são notados nas primeiras horas do ciclo, enquanto que em revestimentos claros a detecção só foi vista na segunda hora após o início de cada ciclo dado as propriedades do material. No geral, a técnica apresenta um índice que varia de 75% a 100% de assertividade a depender da cor do revestimento.

Para trabalhos futuros, sugere-se adaptar da câmera termográfica, para que o equipamento seja o próprio emissor de radiação, com ondas capazes de aquecer a estrutura alvo. A tendência é de melhoria de desempenho em relação aos algoritmos de processamento de imagens térmicas para superar as atuais limitações da termografia infravermelha, sendo assim positivo para os próximos anos usar a tecnologia de inteligência artificial para automatização.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13755**. Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante: Projeto, execução, inspeção e aceitação: Procedimento”, Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7200**. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento, Rio de Janeiro, 1998.
- ARCHER, T.; BEAUCHÊNE, P.; PASSILLY, B.; ROCHE, J. M. Use of laser spot thermography for the non-destructive imaging of thermal fatigue microcracking of a coated ceramic matrix composite. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 18, n. 3, p. 141-158, 2019. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2019.1705732>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2019.1705732>. Acesso em: 25 nov. 2022;
- ANHAS, F.V.L. PAVON DE LA FÉ, E.; SOUSA, J.S.; **Emissivity of building materials: method for determination of moisture influence**. 2018, Dissertação de mestrado (Engenharia Civil). Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.
- ALMEIDA, A.S.F.C.; ORNELAS, A.J.A.; CORDEIRO A.R. Termografia passiva no diagnóstico de patologias e desempenho térmico em fachadas de edifícios através de câmara térmica instalada em drone: abordagem preliminar em Coimbra (Portugal). **Cadernos de Geografia**, Coimbra, n.42, p.27–41, 2020. DOI. https://dx.doi.org/10.14195/0871-1623_42_2. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/cadernosgeografia/article/view/7855/7026>. Acesso em: 6 nov. 2022;
- ADITYA, L.; MAHLIA, T.M.I.; RISMANCHI, B.; NG, H.M.; HASAN, M.H.; METSELAAR, H.S.C.; MURAZA, OKI.; ADITIYA, H.B. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Belfast, v.73, p.1352–1365, 2017. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.02.034>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117302484>. Acesso em: 7 nov. 2022;
- AVERSA, P.; PALUMBO, D.; DONATELLI, A.; TAMBORRINO, R.; ANCONA, F.; GALIETTI, U.; LUPRANO, V. A. M. Infrared thermography for the investigation of dynamic thermal behaviour of opaque building elements: comparison between empty and filled with hemp fibres prototype walls. **Energy and Buildings**, v. 152, p.264–272, 2017. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.055>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817308174>. Acesso em: 7 nov. 2022;

AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A. Emissivity considerations in building thermography. **Energy and Building**, v.35, n.7, p. 663–667, 2003. DOI.

[https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00210-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00210-4). Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778802002104>. Acesso em: 4 out. 2022;

BARBOSA, M.T.G.; ROSSE, V.J.; LAURINDO, N.G. Thermography evaluation strategy proposal due moisture damage on Building facades. **Journal of Building Engineering**, v. 43, p. 102555, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102555>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710221004125>. Acesso em: 5 nov. 2022;

BAUER, E.; PAVON, E.; BARREIRA E.; DE CASTRO, E.K. Analysis of building facade defects using infrared thermography: laboratory studies. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 93-104, 2016. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2016.02.012>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710216300213>. Acesso em 10 dez. 2022;

BAUER, E.; CASTRO, E.K.; HILDENBERG, A.; PAVON, E. Critérios para a aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias em fachadas de edifícios. **Rev Politec (Instituto Politec Bahia)**, v. 26, p. 266-277, 2014.

Disponível em: <http://www.termonautas.com.br/artigos/168/168.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2023;

BAUER, E.; MILHOMEM, P.M.; AIDAR, L.A.G. 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. DOI. <https://doi.org/10.1007/S13349-018-0289-0/TABLES/2>.

Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13349-018-0289-0>. Acesso em: 12 jan. 2023

BALLESTEROS, R.D.; CASADO, A.; JUNIOR, L.; DANIEL, R.; RUIZ, B. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para inspeção de manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico. **Ambiente Construído**, v. 21, p. 119-137, 2021. DOI.

<https://doi.org/10.1590/S1678-86212021000100497>. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/bgky4C8WTK4dn6Y9XXZc7rv/?lang=pt&format=html> Acesso em: 12 jan. 2023;

BARREIRA E.; ALMEIDA, R.M.S.F. Drying evaluation using infrared thermography. **Energy Procedia**, v. 78, p. 170-175, 2015. DOI.

<https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.11.135>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215018676>. Acesso em 5 out. 2022;

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R.M.S.F.; MOREIRA, M. An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 224-235, 2017. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.02.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304206>. Acesso em: 10 out. 2022;

BARREIRA E, ALMEIDA RMSF, DELGADO JMPQ. Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. **Construction and building materials**, v. 110, p. 251-269, 2016. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181630085X>. Acesso em 5 jan. 2023;

BAGAVATHIAPPAN, S.; LAHIRI, B.B.; SARAVANAN, T.; PHILIP, J.; JAYAKUMAR, T. Infrared thermography for condition monitoring: a review. **Infrared Physics & Technology**, v. 60, p. 35-55, 2013. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.INFRARED.2013.03.006>. Disponível: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449513000327>. Acesso em: 15 fev. 2023

BERNARDINO A, A, N. **Desempenho térmico de revestimento de cobertura utilizando a técnica da termografia**. 2018. Dissertação de mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10316/84877>. Acesso em: 17 fev. 2023

BRIOSCHI, Marcos Leal. A história da termografia. **Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo**, v. 91, n. 92, p. 7.2, 2008. Disponível em: <https://termografiaclinica.com.br/wp-content/uploads/2017/11/A-Histria-da-Termografia.pdf>. Acesso em: 15 set. 2022;

COSTA I.B.; SALOMAO, P.E.A.; COSTA, N.C.; LAUAR, G.T.; MIRANDA, D.C. Materiais cerâmicos na construção civil: uma breve revisão. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 10, p. 25, 2019. DOI. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i10.1281>. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7164610>. Acesso em: 16 fev. 2023;

CHANGMIN K.; GWANYONG, P.; HYANGIN, J.; EUI-JONG, K. Automated classification of thermal defects in the building envelope using thermal and visible images. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 20, n. 3, p. 106-122, 2022. DOI. 10.1080/17686733.2022.2033531. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2022.2033531>. Acesso em: 3 ago. 2023;

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem pratica**. São Paulo: McGraw Hill, 2007.

CHEW, M.Y.L. Facade inspection for falling objects from tall buildings in Singapore. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 41, n. 6, p. 162-183, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-10-2020-0087>. Disponível em:

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/IJBPA-10-2020-0087/full/html>. Acesso em: 10 dez. 2022;

CHIZH, M.; ZHURAVLEV, A.; RAZEVIĆ, V.; IVASHOV, S.; FALORNI, P.; CAPINERI, L. Defects investigation in thermal insulation coatings with microwave imaging based on a 22 GHz holographic radar. **NDT & E International**, v. 109, p. 102191, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2019.102191>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869519304335>. Acesso 23 out. 2022;

DWIVEDI, S.K.; VISHWAKARMA, M.; SONI, PA. Advances and researches on non destructive testing: a review. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 3690-3698, 2018. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.620>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785317328936>. Acesso em: 18 jan. 2023;

DUO, Y.; HOU, D.; DONG, Z.; YE, S. Non-destructive evaluation method for thermal parameters of prismatic li-ion cell using infrared thermography. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 20, n. 1, p. 14-24, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2021.2010380>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2021.2010380>. Acesso em: 20 mar. 2023;

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; DE BRITO, J. Passive thermographic detection of moisture problems in facades with adhered ceramic cladding. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 187-197, 2014. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.10.085>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061813010064>. Acesso em 17 out. 2023;

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. Building thermography: detection of delamination of adhered ceramic claddings using the passive approach. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 34, n. 268, p. 1-13, 2015a. DOI. <https://doi.org/10.1007/s10921-014-0268-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10921-014-0268-2>. Acesso em: 19 ago. 2023;

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; DE BRITO, J. Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis. **Building and Environment**, v.94, n.1, p.97–108, 2015b. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.07.027>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132315300767>. Acesso em: 22 mai. 2023;

EL MASRI, Y.; RAKHA, T. A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120542, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.120542>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820325472>. Acesso em:

22 jan. 2023;

FREITAS, S.S de.; FREITAS, V.P de.; BARREIRA, E. Detection of facade plaster detachments using infrared thermography: a nondestructive technique. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 80-87, 2014. DOI.

<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.094>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814008563>. Acesso em: 19 jan. 2023;

FOX, M.; GOODHEW, S.; DE WILDE, P. Building defect detection: External versus internal thermography. **Building and Environment**, v. 105, p. 317-331, 2016. DOI.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.06.011>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132316302189>. Acesso em: 16 jan. 2023;

FLIR Tools App. **Manual do usuário**. 2023. Disponível em:

<https://www.flir.com.br/products/flir-tools-app/>. Acesso em: 9 abr. 2023

GARRIDO, I.; LAGUELA, S.; OTERO, R.; ARIAS, P. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: a review—Postprocessing procedures. **Applied Energy**, v. 266, p. 114857, 2020a. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114857>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626192030369X>. Acesso em: 23 jan. 2023;

GARRIDO I, LAGUELA S, OTERO R, ARIAS P. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: a review—data acquisition procedures. **Infrared Physics & Technology**, v. 111, p. 103481, 2020b. DOI.

<https://doi.org/10.1016/J.INFRARED.2020.103481>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449520305296>. Acesso em 8 set. 2023;

GARRIDO, I.; LAGUELA, S.; ARIAS, P. Infrared thermography's application to infrastructure inspections. **Infrastructures**, v. 3, n. 3, p. 35, 2018. DOI.

<https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES3030035>. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/2412-3811/3/3/35>. Acesso em: 17 jan. 2023

GARRIDO I.; BARREIRA, E.; ALMEIDA, R.M.S.F.; LAGUELA, S. Introduction of active thermography and automatic defect segmentation in the thermographic inspection of specimens of ceramic tiling for building facades. **Infrared Physics & Technology**, v. 121, p. 104012, 2022a. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.INFRARED.2021.104012>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449521003844>. Acesso em: 25 set. 2023;

GARRIDO, I.; LAGUELA, S.; FANG, Q.; ARIAS, P. Introduction of the combination of thermal fundamentals and Deep Learning for the automatic thermographic inspection of thermal bridges and waterrelated problems in infrastructures. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 20, n. 5, p. 231-255, 2022b. DOI.

<https://doi.org/10.1080/17686733.2022.2060545>. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2022.2060545>. Acesso em: 27 ago. 2023;

GABBI, A.M.; KOLLING, G.J.; VIVIAN, F.; PEREIRA, L.G.R, TOMICH, T.R.; MACHADO, F.S.; CAMPOS, M.M.; SILVA, M.V.; DA BARBOSA, G.; CUNHA, C.S.; SANTOS, M.K.R. Use of infrared thermography to estimate enteric methane production in dairy heifers. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 3, p. 187-195, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2021.1882075>. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2021.1882075>. Acesso em: 29 jan. 2023;

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. rev. São Paulo: Atlas S. A, 2008. 220 p. ISBN 978-85-224-5142-5

HAKIM, A.S.; AWALE, R.N. Extraction of hottest blood vessels from breast thermograms using state-of-the-art image segmentation methods. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 5, p. 347-365, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2021.1974209>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2021.1974209>. Acesso em: 12 mar.2023;

HART, J.M. **A practical guide to infra-red thermography for building surveys**. Building Research Establishment Repor, Garston, Watford, 1991. E-book. Disponível em:
<https://www.aivc.org/resource/practical-guide-infra-red-thermography-building-surveys>. Acesso em 22 abr. 2023;

HUANG, Y.; LUO, J.; XIA, B. Application of cleaner production as an important sustainable strategy in the ceramic tile plant: a case study in Guangzhou. **Journal of Cleaner Production**, v. 43, p. 113-121, 2013. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.12.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652612006592>. Acesso em: 15 fev. 2023;

INFRARED TRAINING CENTER. **Manual of Thermography course - level 1**, Sorocaba, Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.infraredtraining.com/>. Acesso em: 15 mar. 2023;

JADIN, M.S.; TAIB S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. **Infrared physics & technology**, v. 55, n. 4, p. 236-245, 2012. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.INFRARED.2012.03.002>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449512000254>. Acesso em: 18 jun. 2023;

JO, J.; JADIDI, Z. A high precision crack classification system using multi-layered image processing and deep belief learning. **Structure and infrastructure engineering**, v. 16, n. 2, p. 297-305, 2019. DOI. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1655068>. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15732479.2019.1655068>. Acesso em: 14 jun. 2023;

KIDAGAN, RT.; KRISHNAMURTHY, C. V.; BALASUBRAMANIAM, K. Detection of dis-bond between honeycomb and composite facesheet of na Inner Fixed Structure bond panel of a jet engine nacelle using infrared thermographic techniques. **Quantitat Infrar Thermograp Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 1, p. 12-26, 2020. DOI.

<https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1793284>. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2020.1793284>. Acesso em: 19 dez. 2022;

KYLILI, A.; FOKAIDES, P. A.; CHRISTOU, P.; KALOGIROU, S.A. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. **Applied Energy**, v. 134, p. 531-549, 2014. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2014.08.005>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261914008083>. Acesso em: 18 fev. 2023;

KIRIMTAT, A.; KREJCAR, O. A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects. **Energy and Buildings**, v. 176, p. 390-406, 2018. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.07.052>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778818312398>. Acesso em: 17 jul. 2023;

KOTHANDARAMAN, C.P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New Age International. Coimbatore. World, 2006. *E-book*. Disponível em:

https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=hIviT25WWIEC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Fundamentals+of+heat+and+mass+transfer&ots=OV8sya1lqF&sig=sJvtWU04B49CDfjq_TI5MRzBpn4&redir_esc=y#v=onepage&q=Fundamentals%20of%20heat%20and%20mass%20transfer&f=false. Acesso em: 14 jun. 2023;

KORNBROT, D. Statistical software for microcomputers: SigmaPlot 2000 and SigmaStat2. **The British Journal of Mathematical and Statistical Psychology**, v. 53, p. 335-337, 2000. DOI. <https://doi.org/10.1348/000711000159268>. Disponível em:

<https://europepmc.org/article/med/11109711>. Acesso em: 24 jun. 2023;

LERMA, J.L.; CABRELLES, M.; PORTALES, C. Multitemporal thermal analysis to detect moisture on a building facade. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2190-2197, 2011. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.10.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810005027>. Acesso em: 05 jan.2023

LERMA, C.; BARREIRA, E.; ALMEIDA, R.M.S.F. A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration. **Energy and buildings**, v. 168, p. 56-66, 2018. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.02.050>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817341427>. Acesso em: 26 nov. 2022;

LIMA, G.G de.; BARBOSA, R.R.C.; ANDRADE SANTOS, M.P.; CHEE, B.S.; MAGALHÃES, W.L.E.; DEVINE, D.M.; NUGENT, M.J.D. Effect of unidirectional freezing using a thermal camera on polyvinyl (alcohol) for aligned porous cryogels. **Quantitative**

InfraRed Thermography Journal, v. 18, n. 3, p. 177-186, 2020. DOI.

<https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1732735>. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2020.1732735>. Acesso em: 4 dez. 2022

LI, Z.; JIN, Y.; LIANG, X.; ZENG, J. Thermography evaluation of defect. characteristics of building envelopes in urban villages in Guangzhou. **Case Studies in Construction**

Materials, v. 17, p. e01373, 2022. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01373>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522005058>.

Acesso em: 7 Fev. 2023

LLOYDE, J.M. **Thermal imaging systems**. Springer Science and Business Media, 2013.

E-book. Disponível em:

https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=_QfyBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=The+development+of+thermal+imaging+systems&ots=aM2OKXyjFI&sig=d9LvTjeK2_0CSLHE-65pauWm8m0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 7 abr. 2023;

LOURENCO, T.; MATIAS, L.; FARIA, P. Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. **Construction and Building Materials**, v. 148, p.

419-428, 2017. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.05.052>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061817309455>. Acesso em 28 set. 2023

LUCCHI, E. Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3077-3090, 2018. DOI.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.10.031>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117314119>. Acesso em: 24 ago. 2023;

MARTINEZ, I.; MARTINEZ, E. Qualitative timber structure assessment with passive IR thermography. Case study of sources of common errors. **Case Studies in Construction**

Materials, v. 16, p. e00789, 2022. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00789>.

Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521003041>.

Acesso em: 19 abri. 2023;

MALDAGUE, X.P.V. **Non-destructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography**. London: Springer London, 1993. *E-book*. Disponível em:

https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=6MHcBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR11&dq=Non-destructive+Evaluation+of+Materials+by+Infrared+Thermography&ots=55sJyCPzME&sig=pdL9tM7CWKRDAut6ILeiBpedjzw&redir_esc=y#v=onepage&q=Non-destructiv e%20Evaluation%20of%20Materials%20by%20Infrared%20Thermography&f=false. Acesso em: 19 jan. 2023;

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. [s.l.] Atlas, 2010.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G.M.; DI FOGGIA, M.; NATALE, O. Infrared thermography to detect residual ceramic in gas turbine blades. **Applied Physics A**, v. 91, p. 685-691, 2008. DOI. <https://doi.org/10.1007/s00339-008-4506-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00339-008-4506-2>. Acesso: 22 jul. 2023;

MELO, S.B de.; PAZ, F da.; MESQUITA, E.F.T. Recent advances on infrared thermography for ceramic tiles detachments diagnosis: literature review. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 9, n. 1, p. 1-16, 2024. DOI. doi.org/10.1007/s41024-024-00387-6. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41024-024-00387-6>. Acesso em: 30 fev. 2024;

MENDES, M.V.A.S.; DE LA FE, E.P.; MELO, M.B.; MELO JUNIOR, C.M. Damages mapping of facade using Aerophotogrammetry and Thermography Inspection: Zoroastro Artiaga Museum: Art Deco in Brazil. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e20220031, 2022. DOI. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0031>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/BGVxvGKmN6tJJc9wKMx75QK/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 10 mar. 2023;

MILOVANOVIĆ, B.; PEČUR, I.B. Review of active IR thermography for detection and characterization of defects in reinforced concrete. **Journal of Imaging**, v. 2, n. 2, p. 11, 2016. DOI. <https://doi.org/10.3390/JIMAGING2020011>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2313-433X/2/2/11>. Acesso em: 4 jan. 2023;

MINKINA, W. Theoretical basics of radiant heat transfer: practical examples of calculation for the infrared (IR) used in infrared thermography measurements. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 18, n. 4, p. 269-282, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1738164>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2020.1738164>. Acesso em 28 jun. 2023;

NARDI, I.; LUCCHI, E.; DE RUBEIS, T.; AMBROSINI, D. Quantification of heat energy losses through the building envelope: a state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography. **Building and Environment**, v. 146, p. 190-205, 2018. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.09.050>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132318306085>. Acesso em: 27 abr. 2023;

NING, T.; CONGSI, W.; CUNLIN, Z.; JIANGANG, S. Quantitative measurement of cast metal relics by pulsed thermal imaging. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 1, p. 27-40, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1799304>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2020.1799304>. Acesso em: 4 nov. 2022;

PAVÓN DE LA FÉ, E. **Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho**. 2018. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia civil). Programa de pós-graduação em engenharia civil e estruturas (PECC/UNB). Universidade de Brasília, Brasília, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/31912>. Acesso em: 19 jan. 2023

PERILLI, S.; PALUMBO, D.; SFARRA, S.; GALIETTI, U. Advanced insulation materials for facades: analyzing detachments using numerical simulations and infrared thermography. **Energies**, v. 14, n. 22, p. 7546, 2021. DOI. <https://doi.org/10.3390/EN14227546>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/22/7546>. Acesso em: 25 mar. 2023;

PEDRAM, S.; ABBAS, H.; RASSOUL, A.; MAHDI, G. Automatic extraction of canopy and artificial reference temperatures for determination of crop water stress indices by using thermal imaging technique and a fuzzy-based image-processing algorithm. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 2, p. 85-96, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1819707>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2020.1819707>. Acesso em: 12 dez. 2022;

POZZER, S.; PRAVIA, Z.M.C.; REZAZADEH AZAR, E.; DALLA ROSA, F. Statistical analysis of favorable conditions for thermographic inspection of concrete slabs. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 4, p. 609-626, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1007/S13349-020-00405-4/TABLES/10>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13349-020-00405-4>. Acesso em: 14 dez. 2022

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: Métodos técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo - Rio Grande do Sul: Freevale, 2013. 277 p. ISBN 978-85-7717-158-3

SARAWADE, A.A.; CHARNIYA, N.N. Infrared thermography and its applications: a review. **International conference on communication and electronics systems (ICCES)**. IEEE, 2018. p. 280-285. DOI. <https://doi.org/10.1109/CESYS.2018.8723875>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8723875>. Acesso em: 4 out. 2022;

SILVA, A.; DIAS, J.L.; GASPAR, P.L.; DE BRITO, J. Statistical models applied to service life prediction of rendered facades. **Automation in Construction**, v. 30, p. 151-160, 2013. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2012.11.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580512002233>. Acesso em 25 mar. 2023;

SCHWARZ, K.; HEITKOTTER, J.; HEIL, J.; MARSCHNER, B.; STUMPE, B. The potential of active and passive infrared thermography for identifying dynamics of soil moisture and microbial activity at high spatial and temporal resolution. **Geoderma**, v. 327, p. 119-129, 2018. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.04.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706118303483>. Acesso em: 4 jan.

2023;

SCHABOWICZ, K. Non-destructive testing of materials in civil engineering. **Materials**, v. 12, n. 19, p. 3237, 2019. DOI. <https://doi.org/10.3390/ma12193237>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/19/3237>. Acesso em 6 mai. 2023;

SOUZA, J.S. **Impact of degradation factors on the useful life of building facades**. 2019. Tese de doutorado (Doutorado em engenharia civil). Programa de pós-graduação em engenharia civil e estruturas (PECC/UNB). Universidade de Brasília, Brasília. Acesso em: 14 mar. 2023;

TEJEDOR, B.; BARREIRA, E.; ALMEIDA, R.M.S.F.; CASALS, M. Thermographic 2D U-value map for quantifying thermal bridges in building facades. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110176, 2020. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110176>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778820302450>. Acesso em: 22 fev. 2023;

TOMITA, K.; CHEW, M.Y.L. A review of infrared thermography for delamination detection on infrastructures and buildings. **Sensors**, v. 22, n. 2, p. 423, 2022. DOI. <https://doi.org/10.3390/s22020423>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/2/423>. Acesso em 10 mar. 2023;

TROFIMOV, A.; WATKINS, T.R.; MUTH, T.R.; COLA, G.M.; HSIN, W. Infrared thermometry in high temperature materials processing: influence of liquid water and steam. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 20, n. 3, p. 123-141, 2023. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2022.2043617>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2022.2043617>. Acesso em: 15 ago. 2023;

USAMENTIAGA, R.; VENEGAS, P.; GUEREDIAGA, J.; VEGA, L.; MOLLEDA, J.; BULNES, F.G. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. **Sensors**, v. 14, n. 7, p. 12305-12348, 2014. DOI. <https://doi.org/10.3390/S140712305>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12305>. Acesso em: 22 jul. 2023;

VALERO, L.R.; SASSO, V.F.; VICIOSO, E.P. In situ assessment of superficial moisture condition in facades of historic building using non-destructive techniques. **Case Studies in Construction Materials**, v. 10, p. e00228, 2019. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2019.E00228>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509518303024>. Acesso em: 24 jan. 2023;

WATTANASIRIWECH, D.; SAITON, A.; WATTANASIRIWECH, S. Paving blocks from ceramic tile production waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 18, p. 1663-1668, 2009. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2009.08.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652609002546>. Acesso em: 15 abr. 2023;

YANG, R.; HE, Y. Optically and non-optically excited thermography for composites: a review. **Infrared Physics & Technology**, v. 75, p. 26-50, 2016. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.INFRARED.2015.12.026>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350449515300542>. Acesso em: 16 abr. 2023;

YOON, S.T.; PARK, J.C.; CHO, Y.J. An experimental study on the evaluation of temperature uniformity on the surface of a blackbody using infrared cameras. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 3, p. 172-186, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2021.1877918>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2021.1877918>. Acesso em: 5 dez. 2022;

YU, K.E.; BASHKATOV, A.A. Thermal signatures of liquid droplets on a skin induced by emotional sweating. **Quantitative InfraRed Thermography Journal**, v. 19, n. 2, p. 115-125, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1080/17686733.2020.1846113>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17686733.2020.1846113>. Acesso em: 18 jan. 2023;

ZHANG, H.; YANG, R.; HE, Y.; FOUDAZI, A.; CHENG, L.; TIAN, G. A review of microwave thermography nondestructive testing and evaluation. **Sensors**, v. 17, n. 5, p.1123, 2017. DOI. <https://doi.org/10.3390/S17051123>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/1123>. Acesso em: 14 ago. 2023;

ZHAO, Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics. **Ceramics International**, v. 47, n. 4, p. 4389-4397, 2021. DOI. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.10.065>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884220331059>. Acesso em: 25 mai. 2023.

ANEXO A - INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA ARGAMASSA MATRIX 5201



DESCRIÇÃO

A argamassa MATRIX 5201 – Múltiplo Uso é uma argamassa de uso geral que pode ser utilizada para o assentamento de elementos de alvenaria de vedação como blocos de concreto, blocos cerâmicos, e tijolos comuns. Também é indicada para o revestimento de paredes em áreas internas e externas.

CLASSIFICAÇÃO

A argamassa MATRIX 5201 – Múltiplo Uso é classificada de acordo com a NBR13281, e atende aos requisitos da NBR 13749 e NBR 13755.

DESEMPENHO

Teste	Norma	Fábrica	Especificação NBR 13749	
Determinação da resistência de aderência à tração (MPa)	NBR 13528	Cajamar – SP	Revestimento externo (Com chapisco)	≥ 0,30 MPa
		Camaçari – BA		
		Itaú de Minas – MG		
		Pecém – CE		
		Rio Branco do Sul – PR		
		Sobradinho – DF		
Determinação da resistência de aderência à tração (MPa)	NBR 13528	Cajamar – SP	Revestimento interno (Áreas secas)	≥ 0,20 MPa
		Camaçari – BA		
		Itaú de Minas – MG		
		Pecém – CE		
		Rio Branco do Sul – PR		
		Sobradinho – DF		
Determinação da resistência de aderência à tração (MPa)	NBR 13528	Cajamar – SP	Revestimento interno (Áreas úmidas com chapisco)	≥ 0,30 MPa
		Camaçari – BA		
		Itaú de Minas – MG		
		Pecém – CE		
		Rio Branco do Sul – PR		
		Sobradinho – DF		

Teste	Norma	Fábrica	Classificação NBR 13281	
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279	Cajamar – SP	P5	5,5 MPa a 9,0 MPa
		Camaçari – BA	P4	4,0 MPa a 6,5 MPa
		Esteio – RS	P5	5,5 MPa a 9,0 MPa
		Itaú de Minas – MG	P5	5,5 MPa a 9,0 MPa
		Pecém – CE	P4	4,0 MPa a 6,5 MPa
		Rio Branco do Sul – PR	P4	4,0 MPa a 6,5 MPa
		Sobradinho – DF	P5	5,5 MPa a 9,0 MPa
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m ³)	NBR 13280	Cajamar – SP	M5	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Camaçari – BA	M4	1400 kg/m ³ a 1800 kg/m ³
		Esteio – RS	M4	1400 kg/m ³ a 1800 kg/m ³
		Itaú de Minas – MG	M4	1400 kg/m ³ a 1800 kg/m ³
		Pecém – CE	M4	1400 kg/m ³ a 1800 kg/m ³
		Rio Branco do Sul – PR	M4	1400 kg/m ³ a 1800 kg/m ³
		Sobradinho – DF	M4	1400 kg/m ³ a 1800 kg/m ³
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279	Cajamar – SP	R4	2,0 MPa a 3,5 MPa
		Camaçari – BA	R3	1,5 MPa a 2,7 MPa
		Esteio – RS	R3	1,5 MPa a 2,7 MPa
		Itaú de Minas – MG	R4	2,0 MPa a 3,5 MPa
		Pecém – CE	R2	1,0 MPa a 2,0 MPa
		Rio Branco do Sul – PR	R3	1,5 MPa a 2,7 MPa
		Sobradinho – DF	R3	1,5 MPa a 2,7 MPa
Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	NBR 15259	Cajamar – SP	C5	5 g/dm ² .min ^{1/2} a 12 g/dm ² .min ^{1/2}
		Camaçari – BA	C5	5 g/dm ² .min ^{1/2} a 12 g/dm ² .min ^{1/2}
		Esteio – RS	C4	3 g/dm ² .min ^{1/2} a 7 g/dm ² .min ^{1/2}
		Itaú de Minas – MG	C5	5 g/dm ² .min ^{1/2} a 12 g/dm ² .min ^{1/2}
		Pecém – CE	C5	5 g/dm ² .min ^{1/2} a 12 g/dm ² .min ^{1/2}
		Rio Branco do Sul – PR	C5	5 g/dm ² .min ^{1/2} a 12 g/dm ² .min ^{1/2}
		Sobradinho – DF	C4	3 g/dm ² .min ^{1/2} a 7 g/dm ² .min ^{1/2}

Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	NBR 13278	Cajamar – SP	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Camaçari – BA	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Esteio – RS	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Itaú de Minas – MG	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Pecém – CE	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Rio Branco do Sul – PR	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Sobradinho – DF	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
Retenção de água (%)	NBR 13277	Cajamar – SP	U2	72% a 85%
		Camaçari – BA	U2	72% a 85%
		Esteio – RS	U2	72% a 85%
		Itaú de Minas – MG	U2	72% a 85%
		Pecém – CE	U2	72% a 85%
		Rio Branco do Sul – PR	U2	72% a 85%
		Sobradinho – DF	U2	72% a 85%

Teste	Norma	Fábricas	Especificação
Preparo da mistura para a realização de ensaios	NBR 16541	Cajamar – SP	Sem tempo adicional
		Camaçari – BA	
		Estelo – RS	
		Itaú de Minas – MG	
		Pecém – CE	
		Rio Branco do Sul – PR	
		Sobradinho – DF	

PROPRIEDADES

Tempo de puxamento: bloco cerâmico com MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX 3201 - Chapisco Alvenaria.	30 a 60 minutos
Tempo de puxamento: bloco cerâmico sem MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX - 3201 Chapisco Alvenaria.	20 a 45 minutos
Tempo de puxamento: bloco concreto com MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX 3201 - Chapisco Alvenaria.	60 a 90 minutos
Tempo de puxamento: bloco concreto sem MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX 3203 - Chapisco Alvenaria.	60 a 90 minutos
Substratos de Concreto com MATRIX 3202 - Chapisco Adesivo para Concreto	2 a 3 horas

ANEXO B – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA ARGAMASSA MATRIX 2202



DESCRIÇÃO

A argamassa MATRIX 2202 - Revestimento Fachada é indicada para o revestimento de paredes em áreas externas, possui tempo de manuseio de até 2 horas, aderência elevada e alta trabalhabilidade.

CLASSIFICAÇÃO

A argamassa MATRIX 2202 - Revestimento Fachada é classificada de acordo com a NBR13281, e atende aos requisitos da NBR 13749.

DESEMPENHO

Teste	Norma	Fábrica	Especificação NBR 13749	
Determinação da resistência de aderência à tração (MPa)	NBR 13528	Cajamar – SP	Revestimento externo (Com chapisco)	≥ 0,30 MPa
		Camaçari – BA		
		Itaú de Minas – MG		
		Pecém – CE		

Teste	Norma	Fábrica	Especificação
Preparo da mistura para a realização de ensaios	NBR 16541	Cajamar – SP	Sem tempo adicional
		Camaçari – BA	
		Itaú de Minas – MG	
		Pecém – CE	

Teste	Norma	Fábrica	Classificação NBR 13281	
Resistência à compressão (MPa)	NBR 13279	Cajamar – SP	P4	4,0 MPa a 6,5 MPa
		Camaçari – BA	P4	4,0 MPa a 6,5 MPa
		Itaú de Minas – MG	P4	4,0 MPa a 6,5 MPa
		Pecém – CE	P4	4,0 MPa a 6,5 MPa
Densidade de massa aparente no estado endurecido (kg/m³)	NBR 13280	Cajamar – SP	M4	1400 kg/m³ a 1800 kg/m³
		Camaçari – BA	M5	1600 kg/m³ a 2000 kg/m³
		Itaú de Minas – MG	M4	1400 kg/m³ a 1800 kg/m³
		Pecém – CE	M4	1400 kg/m³ a 1800 kg/m³
Resistência à tração na flexão (MPa)	NBR 13279	Cajamar – SP	R3	2,0 MPa a 3,5 MPa
		Camaçari – BA	R3	2,0 MPa a 3,5 MPa
		Itaú de Minas – MG	R3	2,0 MPa a 3,5 MPa
		Pecém – CE	R2	2,0 MPa a 3,5 MPa

Coeficiente de capilaridade (g/dm ² .min ^{1/2})	NBR 15259	Cajamar – SP	C4	3 g/dm ² .min ^{1/2} a 7 g/dm ² .min ^{1/2}
		Camaçari – BA	C4	3 g/dm ² .min ^{1/2} a 7 g/dm ² .min ^{1/2}
		Itaú de Minas – MG	C5	3 g/dm ² .min ^{1/2} a 7 g/dm ² .min ^{1/2}
		Pecém – CE	C5	5 g/dm ² .min ^{1/2} a 12 g/dm ² .min ^{1/2}
Densidade de massa no estado fresco (kg/m ³)	NBR 13278	Cajamar – SP	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Camaçari – BA	D5	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Itaú de Minas – MG	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
		Pecém – CE	D4	1600 kg/m ³ a 2000 kg/m ³
Retenção de água (%)	NBR 13277	Cajamar – SP	U2	72% a 85%
		Camaçari – BA	U2	72% a 85%
		Itaú de Minas – MG	U2	72% a 85%
		Pecém – CE	U2	72% a 85%
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	NBR 15258	Cajamar – SP	A3	≥ 0,30
		Camaçari – BA	A3	≥ 0,30
		Itaú de Minas – MG	A3	≥ 0,30
		Pecém – CE	A3	≥ 0,30

PROPRIEDADES

Tempo de puxamento: bloco cerâmico com MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX 3201 - Chapisco Alvenaria.	30 a 50 minutos
Tempo de puxamento: bloco cerâmico sem MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX 3201 - Chapisco Alvenaria.	20 a 40 minutos
Tempo de puxamento: bloco concreto com MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX 3201 - Chapisco Alvenaria.	40 a 80 minutos
Tempo de puxamento: bloco concreto sem MATRIX 3203 - Chapisco Projetado e MATRIX 3201 - Chapisco Alvenaria.	40 a 80 minutos
Substratos de Concreto com MATRIX 3202 - Chapisco Adesivo para Concreto	3 a 4 horas

OBSERVAÇÃO: O tempo de puxamento dependerá das condições climáticas, umidade do substrato e espessura do revestimento.

Referência: espessura do revestimento de 2 cm, temperatura de 25°C, e umidade relativa 45%.

ANEXO C – INFORMAÇÕES TÉCNICAS DA ACIII FLEXÍVEL CINZA



DESCRIÇÃO:

Votomassa ACIII flexível cinza é uma argamassa que proporciona alta aderência e flexibilidade no assentamento de uma ampla variedade de revestimentos.

CLASSIFICAÇÃO TÉCNICA:

Votomassa ACIII flexível cinza atende os requisitos de classificação AC-III de acordo com a NBR 14081-1.

DESEMPENHO*:

Teste	Método do teste	Resultados
Cura normal	NBR 14081-4	≥ 1,0 MPa
Cura submersa	NBR 14081-4	≥ 1,0 MPa
Cura estufa	NBR 14081-4	≥ 1,0 MPa
Tempo em aberto - 20 minutos	NBR 14081-3	≥ 0,5 MPa

*Esses valores foram obtidos com ensaios realizados em laboratório, utilizando os revestimentos para os quais a argamassa é indicada, e podem variar em função das condições de aplicação. Produto conforme NBR 14081-1.

DENSIDADE NO ESTADO FRESCO:

1500 a 1800 kg/m³

As especificações estão sujeitas a mudanças sem notificação prévia. Os resultados indicados são típicos, porém refletem os procedimentos usados para os testes. O desempenho real irá depender dos métodos de instalação e das condições do local de trabalho.