

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS
Escola de *Design* - Campus Belo Horizonte
Programa de Pós-Graduação em *Design*

DÉBORA ESCÁRLATE ANTUNES SÁTIRO

**USO DA TERMOGRAFIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS EM
REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE FACHADAS COM VISTAS
AO *DESIGN* DO CONFORTO TÉRMICO**

Belo Horizonte
2020

DÉBORA ESCÁRLATE ANTUNES SÁTIRO

**USO DA TERMOGRAFIA PARA IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS EM
REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE FACHADAS COM VISTAS AO *DESIGN* DO
CONFORTO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção de grau de Mestre em *Design*.

Linha de pesquisa: Tecnologia, materiais e ergonomia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosemary Bom Conselho Sales – UEMG.

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Viviane Gomes Marçal – IFMG.

Belo Horizonte

2020

S253u Sátiro, Débora Escárlate Antunes.

Uso da termografia para identificação de patologias em revetimentos cerâmicos de fachadas com vistas ao *design* do conforto térmico / Débora Escárlate Antunes Sátiro – 2020.

141f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Orientadora: Prof.^a Dr^a. Rosemary do Bom Conselho Sales.

Coorientadora: Prof.^a Dr^a. Viviane Gomes Marçal.

1. Conforto térmico 2. Termografia infravermelha 3. Revestimento cerâmico 4. Patologias I. Débora Escárlate Antunes Sátiro. II. Título.

Aos meus pais, Sérgio e Vera.
A minha irmã, Marina.
As minhas tias, Márcia e Renata.
E ao meu amor, Phillipe,
por sempre me apoiarem e
entenderem meus momentos.

Em especial, ao Raul, que está para
chegar e me ensinar a ser tia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me proteger, iluminar e guiar meus passos até este momento.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Rosemary do Bom Conselho Sales, pela orientação, dedicação e, acima de tudo, pelo exemplo de determinação, compromisso e competência.

À Prof^ª. Dr^ª. Viviane Gomes Marçal, pela coorientação, incentivo, auxílio e pela disponibilidade para sempre atender quando surgiam as dúvidas e ter uma palavra amiga.

A toda a equipe do Programa de Pós-graduação em *Design* (PPGD), pela ampliação das possibilidades de crescimento acadêmico e pelo apoio institucional. Em especial, a Janaína Cadar e Rodrigo Stenner, por sua eficiência profissional e atitude sempre amigável na resolução de minhas indagações.

Aos professores do PPGD, pelos conhecimentos divididos e por ampliarem o meu olhar crítico como pessoa e *designer*.

Ao Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais e aos Centro de Estudos em *Design* de Ambientes (CEDA) e Centro de Estudos em *Design* e Tecnologia (CEDtec) da Universidade do Estado de Minas Gerais, pela confiança em mim depositada ao me emprestar os equipamentos necessários à realização dos testes.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa.

À empresa Bel Lar acabamentos, por toda disponibilidade, prestatividade e, principalmente, por acreditar em meu trabalho, doando todas as placas cerâmicas de tardo branco utilizadas na confecção dos painéis estudados.

Aos colegas de mestrado, pelo convívio, pelos momentos de descontração e reflexão e por dividirem os momentos de angústias que as inquietações sobre nossas pesquisas nos trouxeram.

Ao meu amigo, Prof. Marcelo Amianti, pela ajuda preciosa na realização dos cálculos e execução dos testes necessários ao desenvolvimento deste trabalho.

A minha mãe, Bárbara (*in memoriam*), que, de onde está, também me protege, ilumina e guia meus passos.

Aos meus primos, Lucas, Vitória, Beatriz e Gabriela, por todo incentivo. Em especial à Beatriz, por sua disponibilidade em me ajudar e motivar, mesmo não entendendo sobre *design*.

Aos meus familiares, por entenderem minhas ausências e torcerem pelo meu sucesso.

“Se vi mais longe, foi porque me apoiei em ombros de gigantes”.
(Isaac Newton).

RESUMO

O *design* do conforto é um tema amplo que está voltado para as pessoas, envolve fatores motivacionais e comportamentais e busca promover soluções criativas que possam atender a desejos e proporcionar satisfação e melhor qualidade de vida. O espaço construído deve prover esse conforto de tal forma que as pessoas possam desempenhar suas atividades de forma satisfatória no seu interior. Contudo, a noção de conforto vai além da ambiência dos espaços internos, sendo os materiais de acabamento das fachadas responsáveis pelo seu desempenho térmico. A placa cerâmica é um tipo de acabamento muito utilizado no Brasil, porque apresenta características interessantes de proteção, longevidade e, principalmente, estética. Esse tipo de acabamento, no entanto, exige cuidados especiais, devido às frequentes anomalias que ocorrem durante a sua vida útil. Os tipos mais comuns são os descolamentos e a penetração de água. Técnicas de ensaios não destrutivos, como a termografia infravermelha, estão sendo utilizadas para diagnóstico, sobretudo em fachadas. No entanto, existem muitas dúvidas quanto à aplicação e à interpretação dos resultados termográficos. Neste trabalho buscaram-se definir critérios e padrões de comportamento a serem utilizados na avaliação de umidade e descolamentos cerâmicos utilizando a termografia. Foi realizada análise qualitativa do comportamento térmico dessas anomalias e análise quantitativa dos parâmetros termográficos associados aos descolamentos e umidade. Analisou-se a influência das variáveis climáticas e seu efeito nas condições de exposição. Para o estudo foram construídos modelos de fachadas revestidos com cerâmicas de duas qualidades (tardoz vermelho e branco), empregando o método de termografia passiva de investigação. Nos modelos avaliaram-se os parâmetros termográficos correlacionados ao fluxo de calor por insolação direta. Os resultados revelaram que a termografia é capaz de identificar qualitativa e quantitativamente as patologias de descolamentos e a umidade em revestimentos cerâmicos.

Palavras-chave: Conforto térmico. Termografia infravermelha. Revestimento cerâmico. Patologias.

ABSTRACT

Comfort design is a broad theme that is geared towards people, involves motivational and behavioral factors, and seeks to promote creative solutions that can meet desires and provide satisfaction and a better quality of life. The built space must provide this comfort in such a way that people can perform their activities satisfactorily inside. However, the notion of comfort goes beyond the ambience of the interior spaces, with the finishing materials of the facades responsible for its thermal performance. The ceramic plate is a type of finish widely used in Brazil, because they have interesting characteristics of protection, longevity and mainly aesthetic. This type of finish, however, requires special care, due to the frequent anomalies that occur during its useful life. The most common types are detachments and water penetration. Non-destructive testing techniques, such as infrared thermography, are being used for diagnosis mainly on facades. However, there are many doubts about the application and interpretation of thermographic results. In this work, we sought to define criteria and behavior patterns to be used in the assessment of moisture and ceramic detachments using thermography. A qualitative analysis of the thermal behavior of these anomalies and a quantitative analysis of the thermographic parameters associated with the detachments and humidity were carried out. The influence of climatic variables and their effect on exposure conditions was analyzed. For the study, façade models were constructed coated with ceramics of two qualities (red and white back), using the investigative passive thermography method. In the models, the thermographic parameters correlated to the heat flow by direct sunlight were evaluated. The results show that thermography can identify qualitatively and quantitatively the pathologies of detachments and the presence of moisture in ceramic tiles.

Keywords: Thermal comfort. Infrared thermography. Ceramic coating. Pathologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide de Maslow	30
Figura 2 – Radiação solar	39
Figura 3 – Composição da umidade atmosférica	41
Figura 4 – Vento e rugosidade do terreno	43
Figura 5 – Mecanismo de transmissão de calor em fachada	46
Figura 6 – Transferência de calor unidirecional por condução	47
Figura 7 – Camada limite na transferência de calor por convecção	49
Figura 8 – Troca de calor por radiação	50
Figura 9 – Divisão do espectro eletromagnético	54
Figura 10 – Comportamento do vidro em relação à radiação solar	56
Figura 11 – Trocas de calor através de paredes opacas	56
Figura 12 – Trocas térmicas no interior da edificação	57
Figura 13 – Argamassas colantes industrializadas	67
Figura 14 – Tipos de tardo de cerâmicas estudadas	70
Figura 15 – Patologias nos sistemas de revestimento cerâmico	77
Figura 16 – Patologia de descolamento	78
Figura 17 – Esquema simplificado de detecção por varredura	81
Figura 18 – Imagem térmica de fachada	81
Figura 19 – Etapas do trabalho experimental	88
Figura 20 – Placas cerâmicas utilizadas	89
Figura 21 – Materiais de assentamento	89
Figura 22 – Materiais de rejuntamento	90
Figura 23 – Materiais utilizados para a montagem dos painéis	91
Figura 24 – Equipamentos utilizados no experimento	92
Figura 25 – Representação esquemática da rosa dos ventos	93
Figura 26 – Carta solar de Belo Horizonte normal A 20° NNW	94
Figura 27 – Circulação de ventos	95
Figura 28 – Árvores das edificações vizinhas	95
Figura 29 – Parâmetros de ajuste do software QuickReport	96
Figura 30 – Identificações das patologias nos painéis	100
Figura 31 – Preparação da alvenaria para montagem dos painéis	100

Figura 32 – Preparação da alvenaria para montagem dos painéis	101
Figura 33 – Assentamento das placas cerâmicas	102
Figura 34 – Finalização dos painéis de referência	102
Figura 35 – Simulação da patologia de umidade	103
Figura 36 – Inserção da patologia de descolamento.....	104
Figura 37 – Rejuntamento e finalização dos painéis	105
Figura 38 – Pintura da superfície da parede	105
Figura 39 – Céu com nebulosidade no dia do ensaio preliminar.....	107
Figura 40 – Aclimação da água.....	107
Figura 41 – Medição da temperatura superficial dos painéis	108
Figura 42 – Céu claro no dia do experimento.....	109
Figura 43 – Determinação da emissividade: método da fita preta.....	113
Figura 44 – Marcação e posicionamento da termocâmara	114
Figura 45 – Localização esquemática das patologias nos painéis	115
Figura 46 – Teste preliminar termogramas	116
Figura 47 – Marcação e posicionamento da termocâmara	117
Figura 48 – Termogramas das medições realizadas durante o ensaio	119
Figura 49 – Pontos de temperatura sobre as patologias.....	120
Figura 50 – Termogramas das patologias de descolamento.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Temperaturas médias das patologias de descolamento.....	121
Gráfico 2 – Temperatura das patologias de umidade.....	123
Gráfico 3 – Temperaturas nos painéis de referência.....	125
Gráfico 4 – Temperaturas das patologias de descolamento	126
Gráfico 5 – Temperaturas das patologias de umidade.....	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de resistência térmica de espaços de ar confinado.....	63
Quadro 2 – Classificação das argamassas colantes industrializadas	66
Quadro 3 – Resistência à abrasão (PEI)	71
Quadro 4 – Aplicação conforme PEI	72
Quadro 5 – Classificação da resistência química.....	73
Quadro 6 – Identificação dos painéis (simbologia).....	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade térmica de materiais de construção.....	48
Tabela 2 – Coeficientes e resistências térmicas superficiais.....	60
Tabela 3 – Coeficientes e resistências térmicas superficiais.....	60
Tabela 4 – Condutâncias e resistências térmicas superficiais.	61
Tabela 5 – Resistência térmica de espaços de ar (Rar) confinado.	61
Tabela 6 – Absorção de água conforme métodos de fabricação.	70
Tabela 7 – Classificação pelo grupo de absorção.....	71
Tabela 8 – Variáveis climáticas medidas.	111
Tabela 9 – Temperaturas superficiais aferidas pelo termopar.....	112
Tabela 10 – Temperaturas aferidas pelo termopar e por termografia.	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica
ASHRAE	Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado
BR	Rodovia Federal Brasil
CEDA	Centros de Estudos em <i>Design</i> de Ambientes
CEDTEC	Centro de Estudos em <i>Design</i> e Tecnologia
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
d.C.	Depois de Cristo
E	Leste
ENE	Nordeste
h	Hora
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
km/h	Quilômetros por hora
km/s	Quilômetro por segundo
m/s	Metro por segundo
min	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira
NDT	<i>Non Destructive Testing</i>
NNW	Noroeste
nº	Número
°C	<i>Graus Celsius</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
PB	Painel com patologia tardoaz branco
PEI	Resistência à abrasão
PPGD	Programa de Pós-graduação em <i>Design</i>
PV	Painel com patologia tardoaz vermelho

RB	Painel de referência com tardoiz branco
RV	Painel de referência com tardoiz vermelho
SSE	Sudeste
SWS	Sudoeste

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Transmitância térmica
τ	Fração da radiação transmitida – transmitância
®	Marca registrada
c	Calor específico do material
CO_2	Dióxido de carbono
C_T	Capacidade térmica total do componente
C_{Text}	Capacidade térmica externa do componente
e	Espessura da parede
F_{So}	Fator solar
h_c	Coeficiente de trocas térmicas por convecção
h_r	Coeficiente de trocas térmicas por radiação
k	Condutividade térmica
Q	Intensidade do fluxo térmico
q_{cd}	Intensidade do fluxo térmico por condução
q_{conv}	Intensidade do fluxo térmico por convecção
q_{rad}	Intensidade do fluxo térmico por radiação
R	Resistência térmica
r	Resistência térmica específica
R_{ar}	Resistência térmica de espaços de ar
R_{si}	Resistência superficial interna
R_t	Resistência térmica
R_{text}	Resistência térmica da face externa
T	Temperatura do ar
$T_{(x)}$	Temperatura
T_{∞}	Temperatura do fluido
t_i	Tempo de insolação
T_s	Temperatura da superfície
TM	<i>Trade mark</i>
W	<i>Watt</i> (unidade de potência - equivalente a um joule por segundo)
α	Absortividade
α	Fração da radiação absorvida – absortância

ΔT	Variação de temperatura
ε	Emissividade térmica
ρ	Refletância
ρ	Fração da radiação refletida – refletância
Θ	Temperatura da superfície do sólido
Θ_e	Temperatura da superfície externa
Θ_i	Temperatura da superfície interna
Θ_r	Temperatura radiante relativa às demais superfícies

SUMÁRIO¹

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivo geral	25
1.2	Objetivos específicos	25
1.3	Justificativa	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	Considerações sobre o <i>Design</i>	27
2.1.1	<i>Conforto e design do conforto</i>	29
2.1.2	<i>Conforto térmico</i>	32
2.1.3	<i>Conforto térmico do ambiente construído</i>	34
2.2	Variáveis climáticas	36
2.2.1	<i>Radiação solar</i>	37
2.2.2	<i>Grau de nebulosidade do céu</i>	38
2.2.3	<i>Temperatura do ar</i>	40
2.2.4	<i>Umidade relativa ou umidade atmosférica</i>	41
2.2.5	<i>Ventos</i>	42
2.3	Mecanismos de trocas térmicas	45
2.3.1	<i>Condução</i>	46
2.3.2	<i>Convecção</i>	48
2.3.3	<i>Radiação</i>	50
2.4	Emissividade	52
2.5	Radiação infravermelha	53
2.6	Comportamento térmico da edificação	55
2.6.1	<i>Transferência de calor em fechamentos opacos</i>	57
2.6.2	<i>Condutância térmica superficial</i>	59
2.6.3	<i>Espaço de ar confinado</i>	61
2.6.4	<i>Inércia térmica</i>	61
2.7	Sistemas de revestimento de fachadas	62
2.7.1	<i>Placas cerâmicas</i>	68

¹ Este trabalho foi revisado com base nas novas regras ortográficas aprovadas pelo Acordo Ortográfico assinado entre os países que integram a Comunidade de Países de Língua Portuguesa (CPLP), em vigor no Brasil desde 2009. E foi formatado de acordo com a ABNT NBR 14724 de 2019.

2.7.2	<i>Execução do revestimento cerâmico em alvenaria.....</i>	73
2.7.3	<i>Manifestações patológicas das edificações.....</i>	75
2.8	<i>Ensaio não destrutivo.....</i>	79
2.8.1	<i>Termografia infravermelha.....</i>	79
2.8.2	<i>Termografia aplicada ao ambiente construído.....</i>	82
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	87
3.1	<i>Material</i>	88
3.2	<i>Métodos</i>	92
3.2.1	<i>Variáveis climáticas</i>	93
3.2.2	<i>Parâmetros de ajuste da câmera termográfica</i>	96
3.2.3	<i>Montagem dos painéis.....</i>	99
3.2.4	<i>Procedimento experimental</i>	106
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	110
4.1	<i>Variáveis climáticas</i>	110
4.2	<i>Parâmetros de ajuste da câmera termográfica</i>	112
4.2.1	<i>Emissividade.....</i>	112
4.2.2	<i>Temperatura ambiente refletida.....</i>	113
4.2.3	<i>Temperatura ambiente.....</i>	113
4.2.4	<i>Umidade relativa do ar.....</i>	114
4.2.5	<i>Distância e ângulo da câmera</i>	114
4.3	<i>Ensaio preliminar</i>	114
4.4	<i>Ensaio termográfico</i>	117
5	CONCLUSÕES	129
5.1	<i>Sugestão para trabalhos futuros</i>	130
	REFERÊNCIAS.....	131
	APÊNDICE.....	140

1 INTRODUÇÃO

A sensação de conforto térmico no corpo humano acontece quando o estado regulador está em equilíbrio, não apresenta a sensação de calor nem de frio. O conforto térmico considera aspectos básicos de trocas térmicas entre o homem e o ambiente em que ele habita, para que ele se sinta confortável em qualquer situação, sem a necessidade de acionar seus mecanismos de defesa contra o calor ou o frio, mantendo sua saúde corporal e o seu potencial de trabalho (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). Assim, atualmente percebe-se que o conforto térmico dos ambientes tem se tornado fator determinante para os usuários no momento da escolha dos locais onde irão viver e/ou trabalhar.

Os modelos de construção mais recentes normalmente utilizam sistemas artificiais de climatização e iluminação para se alcançar esse conforto, o que gera elevados índices de consumo de energia elétrica. Alguns autores alertam para a inconsciência dessas ações, visto que o direcionamento básico dos processos construtivos está sendo substituído por interesses regionais, econômicos e estéticos, sem preocupação com a origem e/ou com as características térmicas, até mesmo de resistência dos materiais (BARBOSA *et al.*, 2018; LANHAM; GAMA; BRAZ, 2004; MARÇAL, 2016; RUAS, 2002).

Quando se analisa o ambiente construído sob o ângulo do conforto, ele se desdobra em uma série de quesitos que dependem da relação que o homem desenvolve com o local em que habita. O termo “*design* do conforto” surgiu nesse cenário a partir dos estudos de Lana e Lage (2007) e tem merecido a atenção de outros pesquisadores, como Sales *et al.* (2017),; Pedra (2011), Barbosa (2014) e Alvarenga, Pedra e Sales (2012), entre outros. O *design* do conforto torna-se um ponto importante a ser considerado, uma vez que abarca níveis como os relativos ao clima, ao meio ambiente, aos projetos e construções das edificações e aqueles relativos ao próprio usuário. Suas raízes estão no conforto humano e têm direcionado seus esforços no sentido de satisfazer as condições da mente que expressam conforto/desconforto no local ou situação em que o ser humano esteja inserido. O ambiente construído deve, portanto, servir ao homem e ter características que promovam conforto ambiental, o que abrange o conforto térmico externo e interno das edificações, sejam quais forem as condições climáticas.

No Brasil, existe uma variedade de acabamentos para fachadas. Percebe-se, no entanto, predominância de fachadas revestidas de cerâmica. Dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica (ANFACER) mostram que o Brasil é o terceiro produtor mundial de cerâmica e o segundo em consumo. Em 2018 foram produzidos 871,9 milhões de metros quadrados e as vendas no mercado interno atingiram 769,2 m² (ANFACER, 2020). Apesar das inovações tecnológicas, Bauer (2014) e Nunes (2016) destacam as várias ocorrências de manifestações patológicas desses produtos quando aplicados em fachadas.

O conjunto desses materiais exerce forte influência no conforto térmico no ambiente construído. No entanto, a escolha desses materiais muitas vezes não considera aspectos do comportamento térmico, sendo as definições, na maioria das vezes, condicionadas a fatores estéticos, regionais ou de custo. As fachadas revestidas em placas cerâmicas requerem cuidado especial no momento da construção, pois irregularidades durante o processo de assentamento podem gerar problemas ao longo da vida útil das construções. Esses defeitos manifestam-se na forma de anomalias ou patologias como trincas, manchas, descolamentos, eflorescências, deformações, umidade, entre outros (BAUER, 2014; EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2014; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; NUNES, 2016).

Diferentes fenômenos podem contribuir para o surgimento de patologias em fachadas, sendo a causa mais comum a movimentação dos materiais provocada por variações térmicas. Essas movimentações estão relacionadas às propriedades termofísicas dos materiais, visto que materiais com diferentes coeficientes de dilatação e submetidos às mesmas condições térmicas trabalham de forma diferente (CALLISTER, 2016; INCROPERA; DEWITT, 2014). É, portanto, importante a identificação precoce desses problemas, pois eles podem interferir na integridade e durabilidade das construções (BAUER *et al.*, 2016; KIRIMTAT; KREJCAR, 2018; NUNES, 2016).

Segundo Lourenço, Matias e Faria (2017), entre as falhas mais comuns, as que suscitam mais preocupação são as infiltrações, o descolamento ou perda de aderência da peça cerâmica ao substrato, pois podem ocasionar danos materiais e, principalmente, riscos à segurança das pessoas. Ferreira (2010) afirma que os custos relacionados à correção de patologias de fachadas são altos. Para a detecção de anomalias, normalmente são utilizadas técnicas destrutivas que afetam a estética da estrutura e podem prejudicar a mobilidade e o uso das instalações.

A dimensão das fachadas é outro dificultador, pois as técnicas mais comuns são onerosas e requerem que se façam verificações em pequenas áreas, sendo necessário extrapolar os resultados obtidos para todo o revestimento, como, por exemplo, os testes de percussão, ultrassom, colisão de esfera etc. (FLORES-COLEN; BRITO; BRANCO, 2009; TAKEDA; MAZER, 2018).

Existem técnicas de inspeção que utilizam resistividade elétrica, radioatividade, ressonância magnética nuclear e termografia infravermelha (VALERO *et al.*, 2019). A avaliação de fachadas por termografia está sendo cada vez mais utilizada, pois permite que grandes áreas sejam inspecionadas em tempo real, o que agiliza o processo de diagnóstico (HUH *et al.*, 2016; LOPES, 2009; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; NUNES, 2016). A termografia infravermelha é uma técnica que vem sendo estudada por diferentes pesquisadores em todo o mundo, seu uso em diferentes áreas contribui para avaliar as características térmicas dos materiais nos quais fenômenos de transferência de calor estão envolvidos (BARBOSA *et al.*, 2018; MÁXIMO; SALES; AGUILAR, 2016; MENDONÇA, 2005; MEOLA; CARLOMAGNO, 2004; MEOLA *et al.*, 2005; SALES *et al.*, 2017).

A técnica também se destaca pela facilidade de operação do equipamento, alta velocidade de medição e obtenção de respostas, podendo ser pelo método passivo ou ativo de forma qualitativa ou quantitativa (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017). No método ativo uma variação térmica é necessária para provocar o aquecimento do material. O método passivo consiste na interpretação das temperaturas superficiais sem imposição de qualquer tipo de fluxo térmico artificial. As variações térmicas são provocadas pela ação direta do sol (HART, 1992). O ponto de consenso entre os autores é que, independentemente do método, as inspeções por tomografia são realizadas em menos tempo, com custo mais baixo e agilidade no diagnóstico (FREITAS; DE FREITAS; BARREIRA, 2014; KIRIMTAT; KREJCAR, 2018; VALERO *et al.*, 2019).

Nesse sentido, o uso da termografia infravermelha permite que estudos sejam desenvolvidos tanto em laboratório quanto em campo, em pequenas ou em grandes áreas, como o caso das fachadas. Entre os estudos destacam-se as aplicações direcionadas ao *design* do conforto e determinação de propriedades térmicas como condutividade, difusividade e emissividade (BARBOSA *et al.*, 2018; MÁXIMO; SALES; AGUILAR, 2016; SALES *et al.*, 2014).

A norma brasileira (NBR) 15220-2 (ABNT, 2005b) apresenta zonas bioclimáticas para os climas de 330 cidades do país e sugere diretrizes construtivas para cada zona. Para as vedações externas, a norma recomenda que sejam avaliadas três propriedades térmicas: a transmitância térmica, o atraso térmico e o fator de ganho de calor solar. Logo, o desempenho térmico dos materiais pode ser avaliado pela condutividade térmica, uma vez que essa propriedade fornece a taxa de energia transferida por difusão, sendo ela um indicativo da capacidade que o material tem de conduzir calor. No entanto, ela não fornece informações sobre a capacidade do material em armazenar o calor. Verifica-se, portanto, a necessidade de se estudar mais profundamente a capacidade que os materiais possuem em absorver, armazenar e transferir calor, em especial as cerâmicas de revestimentos de fachadas. Outro aspecto a ser considerado é a influência do clima local e dos mecanismos de trocas térmicas, pois eles podem interferir no comportamento dos materiais e, conseqüentemente, interferir nas análises por termografia nos estudos de fachadas (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Neste trabalho, essa temática é abordada a partir da termografia infravermelha. Trata-se de técnica de ensaio não destrutivo de larga aplicação, “que consiste na captura”, sem contato direto, da radiação térmica infravermelha emitida pela superfície dos materiais por meio de equipamento que transforma a energia térmica em pulsos elétricos e, após serem tratados por programa específico, são exibidos na forma de uma imagem térmica, com o perfil de temperatura do objeto em estudo (FLIR, 2015). A técnica vem sendo empregada para avaliar as características de materiais em uma variedade de investigações que envolvem os fenômenos de transferência de calor. Estudos recentes de diferentes pesquisadores relatam aplicações práticas que estão sendo direcionadas ao conforto térmico do ambiente construído, como: Valero *et al.* (2019), Santos, Rocha e Póvoas (2019); Bauer, Milhomem e Aidar (2018), Khoukhi (2018), Kirimtat e Krejcar (2018), Lourenço, Matias e Faria (2017), entre outros. De modo a alinhar esta pesquisa com a área do *design* do conforto térmico, foi realizado estudo experimental com base na revisão da literatura, cujos painéis revestidos de cerâmica receberam patologias e foram monitorados por tomografia pelo método passivo de investigação.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desse trabalho foi avaliar a capacidade da termografia infravermelha para detecção de patologias de descolamento e umidade em alvenarias revestidas com cerâmica utilizando o método passivo de investigação.

1.2 Objetivos específicos

- a) Identificar os fatores externos (variáveis climáticas) que influenciam as medições termográficas e os parâmetros de ajuste da termocâmera.
- b) Desenvolver ensaios preliminares para conhecer as variáveis climáticas do local e os equipamentos de medição, em especial a termocâmera.
- c) Construir modelos experimentais com e sem patologias de descolamento e umidade, sobre alvenaria existente utilizando cerâmica (tardoz² vermelho e tardoz branco) e submetê-los a insolação natural.
- d) Analisar de forma qualitativa o comportamento térmico dessas anomalias e de forma quantitativa os parâmetros termográficos associados aos descolamentos e umidade.
- e) Avaliar a influência do tipo de revestimento cerâmico (tardoz vermelho e tardoz branco) na detecção das patologias e no comportamento térmico das fachadas.

1.3 Justificativa

Atualmente, o setor da construção civil é o maior consumidor mundial de energia primária, sendo as edificações responsáveis por mais de 35% do consumo mundial de energia e 40% das emissões de dióxido de carbono (CO₂), segundo a agência internacional de energia - *UN Environment and International Energy Agency* (2017). Grande parte desse consumo está ligada às questões de uso de sistemas artificiais de climatização pós-ocupação. Assim, a eficiência energética das edificações deve ser otimizada, o que requer, entre outras, a minimização de problemas de fachadas. Medidas preventivas podem ser tomadas para alterar e/ou

² Tardoz. Face fosca de um tijolo, ladrilho ou azulejo que se prende à parede. Dicionário Michaelis. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/tardoz/>>. Acesso em: 10 Jun. 2020.

adaptar as edificações de forma a se alcançar o conceito das políticas energéticas de edificações. O uso correto de materiais com mais capacidade térmica favorece a temperatura superficial das fachadas e pode evitar o surgimento de patologias, além de propiciar ambientes termicamente mais confortáveis para os usuários quanto à sua saúde e potencial de trabalho (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2018; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016; RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

Os profissionais responsáveis por projetos construtivos atuam em áreas distintas e necessitam articular seus conhecimentos, buscando um entendimento multidisciplinar que possibilite melhorar as condições de conforto térmico nas edificações. Torna-se, portanto, importante para os *designers* conhecer não somente os aspectos relativos ao usuário, mas as propriedades termofísicas dos materiais e as características climáticas que cercam as edificações, pois elas auxiliam na compreensão do entorno imediato e das variáveis climáticas atuantes. Tais conhecimentos conjuntos podem contribuir para que os *designers* de ambientes e os profissionais da construção se relacionem melhor, de forma a atuarem conjuntamente na fase de projeto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Considerações sobre o *Design*

A palavra *design* pode ser considerada um termo polissêmico e é utilizada em várias disciplinas. O Dicionário Houaiss (2013) e Cardoso (2008) referem que a palavra é de origem inglesa e foi apropriada para o português. O *design* tem sua origem no verbo latino *designare*, com o múltiplo significado de desenhar, indicar, designar, traçar, representar, ordenar, dispor, regular. O verbo teve seu uso no sentido contemporâneo da palavra *design* com Leon Battisti Alberti, por volta de 1452 d.C., em sua obra “*De re aedificatoria*” na qual sugeriu que “o arquiteto deve usar o seu intelecto para dar ordem aos eventos no mundo” (ANSTEY, 2005, p. 295). A partir disso, a palavra *design* passou a ser interpretada como uma ação realizada por pessoas, significando uma atividade.

Nos anos de 1960 ocorreram movimentos relevantes para o reconhecimento do *design* como profissão no Brasil. Sua institucionalização foi favorecida pela propagação de escolas, inicialmente voltadas para a metodologia projetual e o surgimento de associações e sociedades científicas. A metodologia projetual relaciona os problemas cotidianos a determinadas áreas de pensamento, definindo subáreas de atuação do *design*. Autores como Anstey (2005), Possatti, Van Der Linden e Silva (2014) e Van Der Linden e Lacerda (2012) explicam que as principais subáreas do *design* foram definidas da seguinte forma:

- a) Problemas de comunicação, informação ou ideias que se referem à comunicação visual e simbólica pertencem ao *design* gráfico;
- b) problemas de construção, manuseabilidade e fatores estéticos dos objetos cotidianos que necessitam de mais integração com outras áreas do conhecimento destinam-se ao *design* de produto;
- c) problemas de conexões e logística de recursos (sejam físicos, econômicos, naturais ou pessoas) que impactam nas experiências dos usuários reportam-se ao *design* de serviços;
- d) problemas relacionados ao desenvolvimento, utilização/manutenção, integração e adaptação das pessoas aos ambientes direcionam-se ao *design* de ambientes.

Apesar de subdivididas, estas áreas podem ser compartilhadas e interconectadas pelos profissionais envolvidos nessa atividade. A organização internacional dedicada à discussão e ao reconhecimento do *design* e de sua comunidade - *International Council of Societies of Industrial Design* (ICSID, 2013) define *design* como sendo:

Uma atividade criativa [e projetual] cujo objetivo é estabelecer as qualidades multifacetadas de objetos, processos, serviços e seus sistemas em ciclos de vida completos. Portanto, *design* é o fator central da humanização inovadora de tecnologias e o fator crucial de intercâmbio cultural e econômico. Assim, o *design* é uma atividade que envolve um amplo espectro de profissões nas quais produtos, serviços, gráficos, interiores e arquitetura tomam parte. Juntas, essas atividades devem melhorar ainda mais – em consonância com outras profissões relacionadas – o valor da vida (ICSID, 2013, p. 25)³.

Autores como Cara (2010), Cardoso (2012), Krucken (2008) e Moraes (2008) definem o *design* como uma atividade transversal a outras disciplinas, capaz de abordar de forma singular e criativa os questionamentos complexos da sociedade contemporânea, marcada principalmente pelo incentivo à inovação, pela diversidade de materiais e tecnologias, pelo processo de globalização e pela necessidade do consumo sustentável. Dessa maneira, o *designer* é considerado um profissional tecnicamente capacitado e habilitado a compreender o modo de vida e as demandas contemporâneas, propondo soluções que promovam o conforto, bem-estar e qualidade de vida das pessoas a partir do uso responsável e eficiente de materiais e recursos naturais.

Assim, o processo de *design* inicia-se com a formulação de uma questão geradora cujo objetivo é propor soluções funcionais e estéticas para ela. Essa interpretação é complexa e exige dos profissionais que atuam nesse segmento uma abordagem criativa e multidisciplinar na busca por soluções viáveis e eficientes. Os usuários, suas necessidades e demandas são o centro da atenção do projeto, ao mesmo tempo em que deve haver preocupação com a utilização e esgotamento dos recursos naturais (LIRA; CÂNDIDO, 2013). Dessa forma, o *design* encontra-se estreitamente ligado a diversos campos do conhecimento, nos quais as soluções devem ser tomadas frente às necessidades do homem contemporâneo. Elas podem ser avaliadas em termos de uso eficiente de recurso, economia e reaproveitamento

3 Tradução da autora. Texto original: “*Design is a creative activity whose aim is to establish the multifaceted qualities of objects, processes, services and their systems in whole life cycles. Therefore, design is the central factor of innovative*” (ICSID, 2013, p. 25).

de materiais, entre outros, de modo a colaborem para o desenvolvimento sustentável do planeta (BALSAMO, 2010; BONSIPE, 2011; CARA, 2010; CARDOSO, 2012; POSSATTI; VAN DER LINDEN; SILVA, 2014).

2.1.1 Conforto e design do conforto

A palavra conforto está relacionada a eficiência, conveniência e bem-estar físico. No dicionário Houaiss (2013) registra-se que é o ato ou efeito de confortar e significa comodidade material e aconchego. Kolcaba e Wilson (2002) prelecionam que o conforto das pessoas tem diferentes aspectos inter-relacionados e classificam quatro importantes contextos: a) conforto físico - relacionado às sensações corporais e mecanismos homeostáticos do equilíbrio do corpo; b) conforto psicoespiritual - relacionado à consciência interna de si, em que se pode incluir estima, conceito, sexualidade, significado na vida de alguém; c) conforto sociocultural - pertencente a relações interpessoais, familiares e sociais e também a tradições familiares, rituais e práticas religiosas; d) conforto ambiental - ligado à base externa da experiência humana, como, por exemplo, temperatura, luz, som, odor, cor, mobiliário, paisagem, etc.

Quando se analisa o ambiente construído sob o ângulo do conforto, ele se desdobra em uma série de quesitos que dependem da relação que o homem desenvolve com o local onde habita. Fica bem caracterizado quando considerados alguns âmbitos de conforto, como: ergonomia, iluminação, acústica, contexto térmico, entre outros. O que se pode dizer é que, tanto o conforto quanto a satisfação e bem-estar físico das pessoas, são necessidades primárias do ser humano que ele desenvolveu ao longo de sua evolução como forma de sobrevivência. Para isso, aprendeu a lidar com os artefatos, com o ambiente que o circunda, a aproveitar as condições ambientais locais, como a insolação, a ventilação, a proximidade da água, entre outros (BORGSTEIN; LAMBERTS; HENSEN, 2018; FROTA; SCHIFFER, 2007).

A hierarquia das necessidades humanas, explicada pela teoria de Abraham Maslow (1954) sugere que muito do comportamento humano pode ser esclarecido pelas suas necessidades e pelos seus desejos. Percebe-se que uma necessidade humana particular pode se tornar um estímulo à ação e impulsionar as atividades do indivíduo. Apesar de sua restrição, por se basear em pesquisas empíricas, a pirâmide de Maslow na atualidade ainda é uma das teorias mais conhecidas e compreendidas

no que diz respeito ao atendimento das necessidades humanas, principalmente em áreas como a Engenharia, Arquitetura e *Design*, que lidam com soluções para atender às demandas de conforto (DE MORAES, 2010).

Na base da pirâmide de Maslow (FIG. 1), segundo De Moraes (2010), juntamente com as questões de saúde, segurança e moradia, pode-se inserir a necessidade de conforto em seus diferentes sentidos. Esse conforto, quando alcançado e percebido pelo indivíduo, cria condições para o desenvolvimento das outras faixas de aspirações humanas. Essa necessidade determina a ordem de importância de realização para o sujeito e molda o seu comportamento como tal, o que pode ser considerado uma ação intencionalmente voltada para o objeto ou objetivo, cujo indivíduo se obriga a aliviar a tensão (agradável ou desagradável) gerada pela necessidade ou desejo.

Figura 1 – Pirâmide de Maslow



Fonte: adaptado de De Moraes (2010, p. 50).

Lana e Lage (2007) explicitam que um ambiente que propicie conforto, satisfação e bem-estar é campo favorável para o desenvolvimento das potencialidades criativas e são estas que irão impulsionar o sujeito em direção ao vértice da pirâmide. As autoras consideram o conceito de conforto bastante ampliado e deve-se considerar a evolução do ser humano não somente nos aspectos que permeiam a base da pirâmide, mas em todos os seus níveis.

Ao analisar o ambiente construído segundo a pirâmide de Maslow, os aspectos do conforto ambiental devem ser considerados, visto ser uma abordagem segmentada, pois além de confortável o ambiente construído deve ser saudável.

Contudo, nem todas as condições de conforto do ambiente construído correspondem a condições saudáveis. O homem, por meio dos sentidos, é levado a conferir relevância às condições de conforto, quase sempre ignorando as demais (TEIXEIRA; PEREIRA, 2001). O conforto ambiental refere-se, portanto, à adequação da edificação as condicionantes climáticas e, à medida que o *design* foca sua atenção nessa adequação, ele é direcionado para o estudo do *design* do conforto.

O termo “*design* do conforto” surgiu a partir dos estudos de Lana e Lage (2007) e tem merecido atenção de outros pesquisadores como Sales *et al.* (2017), Pedra (2011), Barbosa (2014) e Alvarenga, Pedra e Sales (2012), citando alguns. O termo tem suas raízes no conforto humano, em que o *design* busca satisfazer de forma efetiva as condições da mente que expressam conforto/desconforto no lugar ou situação na qual o sujeito esteja inserido. As várias áreas do conhecimento, diretamente ligadas ao conforto humano, como Arquitetura, Engenharia e *Design*, devem trabalhar em conjunto para melhorar o entorno das pessoas em uma perspectiva também voltada para o *design* do conforto.

Para Lana e Lage (2007), o *design* do conforto é um tema bastante amplo e atual, pois busca compreender os fatores motivacionais e comportamentais relacionados às necessidades humanas. Dessa forma, o *design* do conforto visa desenvolver soluções inovadoras e criativas que possam atender a seus desejos e proporcionar-lhes satisfação e melhor qualidade de vida. Assim, as autoras propõem a ampliação do conceito de conforto e chamam a atenção para a importância da presença do *design* como ferramenta estratégica na projeção de ambientes. No primeiro caso, entende-se conforto direcionado a todos os aspectos da relação humana; e no segundo, é tido como uma área do conhecimento mais adequada e não menos complexa.

Outros fatores, portanto, podem intervir no conforto ambiental das edificações, e o *design* do conforto torna-se um ponto importante a ser considerado, uma vez que o estudo do conforto pode ser dividido em três níveis distintos: os fatores relativos ao clima e ao meio ambiente; os relativos aos projetos e a construções dos edifícios; e aqueles relativos ao próprio usuário.

Diferentes aspectos podem afetar o padrão e a percepção de conforto de determinado ambiente quando se relaciona ao clima: a radiação solar, a temperatura, o movimento do ar, a umidade relativa, a temperatura radiante, iluminação natural e sua distribuição. São determinadas zonas de conforto de acordo com a necessidade

do ser humano em manter, por exemplo, o conforto lumínico, acústico, olfativo, tátil e térmico.

Autores como Rheingantz (2013) e Souza, (2006) conceituam o conforto lumínico como sendo os aspectos relacionados à qualidade da luz que auxilia o indivíduo no desenvolvimento de tarefas visuais, sem que haja esforço e/ou prejuízo da visão. O conforto acústico está relacionado à saúde auditiva no que se refere a uma propagação de níveis toleráveis de ruído e uma satisfatória reprodução do som no ambiente. O conforto olfativo são gestões da qualidade do ar (umidade, pureza e olfação), o que engloba desde o controle de odores até os níveis de poluição presentes no ambiente. O conforto tátil relaciona-se às características das superfícies, como rugosidade, textura (liso, áspero, duro, macio), temperatura (frio/quente), polimento, assepsia, entre outros. O conforto térmico é definido, de acordo com a norma internacional *American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers* (ASHRAE, 2013), como a sensação de bem-estar ambiental em relação tanto à temperatura, à umidade relativa e à movimentação do ar, bem como à radiação solar e à radiação infravermelha emitida pelo entorno.

Percebe-se, portanto, que nos últimos anos as pessoas, de modo geral, conscientizaram-se dos benefícios de atuarem e inovarem segundo indicações de profissionais de *design*. O ambiente construído deve servir ao homem e conter características que promovam conforto ambiental, o que abrange o conforto térmico, sejam quais forem as condições climáticas externas. Neste estudo, cabe ressaltar que as discussões são direcionadas às questões do conforto térmico e ao *design* do conforto, foco desta pesquisa.

2.1.2 Conforto térmico

A norma internacional ASHRAE 55 (2013, p. 3), define o conforto térmico como a “condição mental que expressa a satisfação com o ambiente térmico em que a pessoa está inserida a partir de uma avaliação subjetiva”⁴. Remete-se a um estado que pode ser atingido quando os aspectos físicos do ambiente térmico interno e os aspectos pessoais dos indivíduos estão aliados de forma a proporcionar uma zona de conforto onde as condições são aceitáveis para a maior parte dos ocupantes. Assim,

⁴ Tradução da autora. Texto original: “that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment and is assessed by subjective evaluation” ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013, p. 3).

ao associar a sensação térmica ao conforto térmico do indivíduo, a mesma norma define: “uma expressão subjetiva consciente da percepção térmica dos ocupantes do ambiente, expressa pelas seguintes categorias: muito frio, frio, ligeiramente frio, neutro, ligeiramente quente, quente, muito quente” ⁵.

A norma *International Organization for Standardization - ISO 7730* (ISO, 2005) define conforto térmico como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. A norma permite quantificar o índice de pessoas que estão insatisfeitas com as condições térmicas do local e possibilita estimar os ocupantes ou trabalhadores daquele espaço, que estão desconfortáveis ou termicamente insatisfeitos.

Na NBR 15220-1 (ABNT, 2005a), o conforto térmico é definido como a satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente. A edificação deve lhe oferecer condições térmicas internas compatíveis com o conforto térmico humano, independentemente das condições climáticas externas.

Neste trabalho, o conceito clássico para o conforto térmico está baseado nas normas técnicas e principalmente em Frota e Schiffer (2007) e Lamberts, Dutra e Pereira, (2016). Salienta-se que para Frota e Schiffer (2007) o conforto térmico corresponde às exigências humanas e estão relacionadas ao funcionamento do organismo no que diz respeito ao fluxo de calor que ele absorve e perde para o ambiente por meio das trocas térmicas. As autoras acrescentam que a sensação de conforto depende de condições ambientais e humanas e principalmente dos fatores pessoais que interferem nessa percepção, como o metabolismo, a temperatura da pele e as roupas que o indivíduo está usando. No que diz respeito às condições ambientais, a percepção se dá pela temperatura radiante média, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar.

Lamberts, Dutra e Pereira (2016) argumentam que o conforto térmico baseia-se na sensação de bem-estar que é necessária para que o indivíduo desenvolva normalmente suas atividades sem acionar, de forma perceptível, seus mecanismos de defesa contra o calor ou contra o frio. Do ponto de vista desses autores, é importante que se compreendam os mecanismos físicos que fundamentam os modos de transferência de calor entre o corpo humano e o ambiente em que ele vive.

⁵ Tradução da autora. Texto original: “a conscious subjective expression of na occupant’s thermal perception of the environment, commonly expressed using the categories ‘cold,’ ‘cool,’ ‘slightly cool,’ ‘neutral,’ ‘slightly warm,’ ‘warm,’ and ‘hot’ ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013, p. 3).

Contudo, além das variáveis físicas, passíveis de quantificação, deve-se também levar em conta o usuário, pois quando ele está em desconforto, ele tende a reagir para restabelecer suas condições favoráveis. Tendo-se que as preferências pessoais são subjetivas, torna-se mais difícil estabelecer critérios objetivos para a definição de parâmetros de conforto interno dos ambientes (CHAPPELLE; SHOVE, 2004), criando-se, assim, amplo campo para a pesquisa científica.

2.1.3 Conforto térmico no ambiente construído

O corpo humano é um sistema termodinâmico que produz calor e interage continuamente com o ambiente, buscando alcançar o equilíbrio térmico indispensável à vida. Para isso, existe uma constante troca de calor entre o corpo e o meio em que ele habita, regida pelas leis da Física e pela influência dos mecanismos de adaptação fisiológica, das condições ambientais e dos fatores individuais, na busca da satisfação da sensação de conforto térmico (RUAS, 2002). Gonçalves (2015) menciona que as análises pós-ocupação de edifícios mostram que existe influência das condições de conforto térmico sobre a qualidade do ambiente e sobre o desempenho dos usuários, sendo o desconforto térmico uma das maiores queixas entre os fatores que compõem o conforto ambiental. Frota e Schiffer (2007) descrevem que os primeiros trabalhos desenvolvidos em 1916, pela Comissão Americana de Ventilação, confirmaram que, para trabalhos físicos, o aumento da temperatura de 20°C para 24°C diminui o rendimento em 15% e quando essa temperatura atinge 30°C, com umidade relativa do ar em 80%, o rendimento cai 28%.

Para o estudo do conforto térmico em edificações existem duas abordagens distintas, o modelo estático e modelo adaptativo. O modelo estático foi o adotado pela norma internacional ASHRAE 55 (2013) e aborda como metodologia para avaliação do conforto térmico em edificações o voto médio estimado e a porcentagem de pessoas insatisfeitas. Nesse contexto surge o modelo adaptativo, que estabelece que os usuários, quando submetidos a situações de desconforto, podem tomar medidas para se adaptarem melhor ao ambiente. Essa adaptação, segundo Frota e Schiffer (2007), acontece em três âmbitos: biofísicos, que se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos; fisiológicos, que calcam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura do ar seco,

temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do vento; e as subjetivas, que têm suporte nas sensações particulares de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

O organismo humano pode ser, a (*sic*) grosso modo, comparado a uma máquina térmica que produz calor segundo sua atividade e precisa liberar calor em quantidade suficiente para que sua temperatura interna se mantenha em equilíbrio e na ordem de 37°C - homeotermia (FROTA; SCHIFFER, 2007, p. 17).

As autoras reforçam que as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, quando estão em equilíbrio, promovem a sensação de conforto térmico e maximizam capacidade de trabalho. Quando acontece o desequilíbrio das condições térmicas ambientais, tem-se a sensação de frio ou calor, indicando perda do organismo de mais ou menos calor necessário para a manutenção da homeotermia. Essa sensação passa a ser conseguida com um esforço adicional que sempre representa sobrecarga ao corpo humano e que provoca queda de rendimento no trabalho até o limite, sob condições de rigor excepcionais: perda total de capacidade para realização de trabalho e/ou problemas de saúde.

Ruas (2002), em sua tese de doutorado, mostra que a manutenção da termorregulação, em ambientes cujas condições termo-higrométricas são diversas e variáveis, é coordenada pelo hipotálamo, que recebe os impulsos originados nas células termossensíveis existentes na pele e manda comandos que acionam os mecanismos de compensação que interferem nas trocas térmicas do corpo com o ambiente, de forma a manter a temperatura interna estável. A pele possui duas camadas responsáveis pelo controle térmico. Ao ser exposta ao desconforto térmico, a camada periférica é a primeira a ser ativada pelo mecanismo de regulação vasomotora realizada pelos vasos sanguíneos. Logo após, é ativada a camada subcutânea, onde ocorre a contração ou dilatação dos vasos sanguíneos. Quando a vasodilatação não é suficiente para manter o equilíbrio térmico, é iniciada a produção de suor para que o corpo possa perder calor com a sua evaporação. De modo inverso, quando a vasoconstrição é insuficiente para manter o equilíbrio térmico, o sistema termorregulador provoca o tremor muscular, que aumenta o metabolismo nos músculos e, portanto, a produção de calor interno. Apesar de ser o meio natural de controle de perdas e ganhos de calor pelo organismo, a termorregulação representa esforço extra e, por conseguinte, queda na potencialidade de trabalho (RUAS, 2002).

A sensação de conforto térmico, segundo Frota e Schiffer (2007), acontece quando o organismo perde calor produzido pelo seu metabolismo para o ambiente sem recorrer ao mecanismo de termorregulação, fase em que o organismo se encontra em repouso, conhecido como anabolismo. O catabolismo corresponde à fase de fadiga metabólica suportada diariamente pelo corpo humano. Sob o ponto de vista fisiológico, envolve três tipos de fadiga: a física (muscular, resultante do trabalho de força), a termo-higrométrica (relativa ao calor ou ao frio) e a nervosa (visual e sonora). O conforto térmico humano e sua resposta fisiológica ao estresse térmico dependem da produção de calor metabólico, do nível de fatores ambientais, do trabalho desenvolvido e do tipo de vestimenta que o indivíduo estiver usando. O efeito conjugado destes é que definirá o grau de conforto ou desconforto térmico sentido pelas pessoas.

Segundo a norma internacional ISO 7730 (ISO, 2005), mesmo quando os indivíduos estão perante um ambiente com neutralidade térmica, existem 5% de pessoas insatisfeitas com aquelas condições. A quantidade de calor liberado pelo organismo é, portanto, função da atividade desenvolvida e é dissipado a partir de mecanismos de trocas térmicas entre o corpo e o ambiente.

Diante desse cenário, tanto Frota e Schiffer (2007) quanto Lamberts, Dutra e Pereira (2016) concordam em um ponto: devido às particularidades no que diz respeito à sensação de conforto dos indivíduos, satisfazer todos os ocupantes de um mesmo espaço é bastante difícil, sendo necessário reduzir ao máximo o número de indivíduos insatisfeitos. Nesse sentido, torna-se relevante o estudo do conforto térmico não somente pelo ponto de vista das subjetividades humanas, mas também pela perspectiva das condições ambientais e das variáveis climáticas.

2.2 Variáveis climáticas

As variáveis climáticas descrevem as características gerais de uma região em termos de radiação solar, grau de nebulosidade do céu, temperatura do ar, umidade e ventos. O levantamento do local escolhido para os testes baseou-se no microclima, conforme Lamberts, Dutra e Pereira, (2016) e Frota e Schiffer (2007), que opinam que a natureza dos elementos climáticos está condicionada por fatores do entorno imediato.

É importante o conhecimento dos diferentes conceitos existentes entre tempo e clima. Tempo é a variação diária das condições atmosféricas, enquanto clima é a condição média do tempo em uma dada região baseada em medições realizadas por longos períodos. As variáveis climáticas são quantificadas em estações meteorológicas e descrevem as características gerais de uma região em termos de radiação solar, grau de nebulosidade do céu, temperatura do ar, umidade e ventos. Frota e Schiffer (2007) e Lamberts, Dutra e Pereira (2016) enfatizam que as variáveis climáticas podem ser analisadas sob três diferentes escalas: o macroclima, o mesoclima e o microclima. O macroclima refere-se às características gerais de uma extensa região, normalmente medidas em estações meteorológicas e oferecidas em séries de dados calculados para períodos de 30 em 30 anos. O mesoclima é caracterizado pela altitude, vegetação, topografia, tipo de solo e existência de obstáculos que influenciam as condições locais do clima. O microclima representa lugares pequenos e bem delimitados, onde a natureza dos elementos climáticos está muito mais condicionada por fatores do entorno imediato do que por fatores regionais, podendo ser concebido ou alterado pelo projeto do ambiente construído.

No entendimento de Prado e Ferreira (2005), o albedo ou refletância (razão entre a quantidade de radiação solar refletida por uma superfície e a quantidade total que ela recebe) exerce influência sobre o ganho térmico na superfície dos materiais que recebem incidência de radiação solar. Em uma edificação, as regiões que mais recebem radiação solar são a fachada e o telhado.

2.2.1 Radiação solar

A radiação solar, principal fonte de energia do planeta, é uma onda eletromagnética curta, que atinge a Terra após ser parcialmente absorvida pela atmosfera. Sua maior influência é na distribuição da temperatura do globo, que varia em função da época do ano e da latitude. Esse fenômeno pode ser mais bem elucidado ao examinar o movimento aparente do Sol em relação à Terra. A inclinação de $23^{\circ}27'$ do eixo da Terra em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol e seu movimento de translação determinam as variações na intensidade da radiação ao longo do ano e durante o dia, definindo as quatro estações e influenciando na distribuição da temperatura pelo planeta em escala macro.

A radiação solar, como asseveram Lamberts, Dutra e Pereira (2016) e Frota e Schiffer (2007), quando atinge a atmosfera terrestre, é dividida entre porção direta e difusa. Após sua penetração na atmosfera, a radiação sofre interferências. No inverno a umidade relativa do ar é menor e o céu apresenta nuvens com estruturas verticais menos elevadas. Já no verão, a umidade relativa do ar é maior e o céu possui nuvens com estruturas verticais mais elevadas. A energia solar pode ser recebida na superfície terrestre de três modos: radiação direta, radiação difusa e radiação refletida. A radiação direta é a forma mais intensa, corresponde à parcela que atinge diretamente a terra. A radiação difusa é a que é difundida em todas as direções pelas moléculas de gases e partículas sólidas presentes na atmosfera, sofre um espalhamento pelas nuvens e pelas partículas da atmosfera, sendo refletida na abóbada celeste, nas nuvens e reirradiada para a Terra. A radiação refletida é a parcela da energia solar que volta para o espaço e que foi refletida por outras superfícies. No entanto, os autores explicam que a quantidade de radiação solar que chega à superfície da Terra dependerá da altitude solar e da nebulosidade.

Desse modo, quanto menor a altitude solar, mais longo é o trajeto e, conseqüentemente, menos radiação alcança a superfície terrestre. As altitudes solares mais baixas são ao nascer e no pôr do sol. Na medida em que a trajetória aparente do sol vai se elevando no horizonte, a altura solar vai aumentando e a insolação é mais intensa. A maior altura solar acontece ao meio-dia, quando a radiação é perpendicular ao objeto exposto na superfície terrestre (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

2.2.2 Grau de nebulosidade do céu

Sobre a nebulosidade, quanto mais nublado estiver o céu, mais difusa é a radiação que atinge a superfície terrestre. A radiação direta diminui e toda superfície exposta tenderá a receber a mesma quantidade de radiação difusa. A luz solar direta varia de 60.000 a 100.000 lux^6 , enquanto a luz solar difusa varia de 5.000 a 20.000 lux . Lamberts, Dutra e Pereira (2016) afirmam que, em dias de céu limpo, a percentagem de radiação que chega ao solo é cerca de 50% da emitida pelo sol,

⁶ Lux (lx): É considerado no Sistema Internacional de Unidades a unidade de iluminamento, intensidade de iluminação ou iluminância, NBR 5461 (ABNT, 1991).

sendo a percentagem de radiação difusa baixa. Já em um dia com nuvens, a radiação difusa pode variar entre 10 e 100% da radiação que chega ao solo.

A quantidade de radiação solar que atinge o solo dependerá da percentagem de recobrimento e da espessura das nuvens no céu. Se for suficientemente espessa poderá formar uma barreira que impedirá a penetração da radiação direta do sol. Da mesma forma, dificultará a dissipação do calor da Terra para a atmosfera à noite, que foi absorvido durante o dia (calor desprendido do solo e dos objetos). Esse fenômeno é o principal causador do efeito estufa (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). Tanto a radiação solar quanto a luz natural podem variar de um instante para outro. Para facilitar o entendimento dessa variação (FIG. 2), o céu pode se apresentar limpo (claro), com radiação direta intensa; parcialmente nublado, denominado anisotrópico; e nublado, conhecido como isotrópico.

Figura 2 – Radiação solar



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2016, p. 77).

No caso do céu claro, a radiação direta é predominante e provém diretamente do Sol, e a radiação difusa é mais intensa próxima do horizonte e ao redor do Sol. No caso do céu parcialmente nublado, a radiação solar direta torna-se variável dependendo da quantidade e da espessura das nuvens que a filtram. A radiação difusa apresenta-se de forma hegemônica e a distribuição da luminância natural tende a ser mais heterogênea. No caso do céu nublado, existe um turvamento da abóboda celeste que impede a visibilidade do Sol, porém torna a distribuição da radiação e da luminância mais uniforme.

Lamberts, Dutra e Pereira (2016) ressaltam ainda que na escala do microclima a radiação solar pode ser interceptada pela vegetação e topografia local. A vegetação perene de folhas caducas (que caem no inverno) sombreia a edificação no verão e permite a penetração do sol durante o inverno. A vegetação também é responsável por cerca de 60 a 90% da absorção da radiação solar para a realização da

fotossíntese, causando substancial redução da temperatura do solo. Além disso, existe também o movimento do ar entre as folhas, que retira grande parte do calor absorvido pela edificação. A quantidade de radiação solar recebida pelas superfícies externas de uma construção varia de acordo com a sua orientação e a época do ano, demonstrando o quão relevante se faz a forma da estrutura arquitetônica para as condições de conforto térmico em seu interior. Como exemplo, os *iglus* possuem formas arredondadas (hemisféricas) para diminuir a região de contato com o exterior, diminuindo as perdas de calor de seu interior. Já os chalés de regiões frias possuem cobertura inclinada para evitar o acúmulo de neve e aumentar a superfície de exposição aos raios solares. Por meio da análise da posição do sol incidente sobre a edificação é possível obter-se o registro das sombras projetadas e compreender como é feita a absorção de calor pelos materiais que a revestem, sua inércia e trocas térmicas (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

2.2.3 Temperatura do ar

A temperatura do ar é a principal variável do conforto térmico, sendo também a mais conhecida e mais fácil de ser medida. Sua alteração é resultante basicamente dos fluxos de grandes massas de ar e da variação da absorção solar pelas diferentes regiões terrestres. Contudo, a temperatura do ar não é consequência somente da ação direta dos raios solares. Ela acontece de forma indireta quando a radiação solar atinge superfície terrestre. Parte dessa radiação é absorvida pelo solo, enquanto outra fração é refletida e, desse modo, a temperatura do solo aumenta e, por convecção, aquece o ar.

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2016), quando a velocidade dos fluxos de ar é pequena, a temperatura resultante, em sua maior parte, é proveniente dos ganhos térmicos solares do local. Nesses casos, a radiação solar que atinge a superfície terrestre é recebida de forma desigual, como consequência do tipo de solo, de vegetação, da topografia e da altitude local. Em um processo contrário, quando a velocidade do ar é alta, a influência dos fatores locais é bem menor. Assim, por meio de dados meteorológicos é possível conhecer o comportamento da temperatura local ao longo do ano, obtendo-se valores de temperatura máxima, média e mínima para cada estação climática, o que facilita a identificação dos períodos de mais probabilidade de desconforto térmico.

2.2.4 Umidade relativa ou umidade atmosférica

A umidade atmosférica é a variável climática mais estável ao longo do dia, sendo ela o resultado da evaporação da água dos mares, rios, lagos e na terra, bem como da evapotranspiração das plantas. Lamberts, Dutra e Pereira (2016) e Frota e Schiffer (2007) definem a umidade absoluta como a quantidade máxima (peso) do vapor de água contido em uma unidade de volume de ar (g/m^3), ou seja, quando o ar está saturado, nessa condição qualquer quantidade de água adicional em estado de vapor condensará, originando a névoa, o orvalho e a chuva. A umidade relativa, portanto, é um percentual da umidade absoluta de saturação, ou seja, quando o conteúdo de vapor de água no ar é menor que o máximo possível para aquela temperatura.

Esse fenômeno se dá em função de as partículas de água em suspensão no ar terem a capacidade de receber calor do sol e se aquecerem. Essas partículas têm a propriedade de reter grande parte da energia solar, amenizando a sensação de “calor” durante o dia. No período da noite, a energia térmica armazenada é liberada lentamente, contribuindo para uma suave oscilação de temperatura, mantendo, assim, baixa amplitude térmica. Parte desse calor será devolvida na direção do solo e a outra parte para a atmosfera, resultando em temperaturas noturnas do ar não muito divergente das diurnas, conforme mostrado de forma esquemática por Lamberts, Dutra e Pereira (2016) na FIG. 3.

Figura 3 – Composição da umidade atmosférica



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2016, p. 80).

Em clima quente e seco, o solo pode perder, à noite, esse calor armazenado durante o dia, com muito mais facilidade, pois não terá muitas partículas de água em suspensão agindo como barreira térmica. Do mesmo modo, o calor adicional transmitido por essas partículas de água no período noturno também não será significativo, tornando a temperatura diurna bastante discrepante da noturna, ou seja, com grande amplitude térmica. Dessa forma, quanto mais seco for o clima, mais receberá radiação solar direta e mais acentuadas serão suas temperaturas extremas (mínimas/máximas). Deve-se compreender que, em altas umidades relativas, temos mais dificuldade em evaporar o suor, assim como, em baixas umidades relativas, o suor evapora muito rápido, aumentando a sensação de desconforto térmico (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Assim, o projeto do ambiente construído para uma região que apresente, por exemplo, clima seco e quente e, conseqüentemente, alta amplitude térmica deve dar atenção a essa alta variação de temperatura diária, possibilitando, durante o dia, que a temperatura no interior da edificação seja menor que a externa e que, durante a noite, seja maior que a externa. Para o clima quente e úmido, as estratégias diferem das mencionadas. Nesse caso, em que há baixa amplitude térmica diária, recomendam-se aberturas suficientemente grandes para permitir a ventilação do ar, principalmente no período noturno, quando a temperatura externa está mais baixa que a interna. Recomenda-se, também, a utilização de bloqueadores solares, sem, contudo, atrapalhar o deslocamento do vento. Em relação à vegetação, que muito contribui para a regulação da umidade do ar, deve ser escolhida com base em suas dimensões, uma vez que, simultaneamente, não pode obstruir a circulação do ar e deve projetar sombra (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

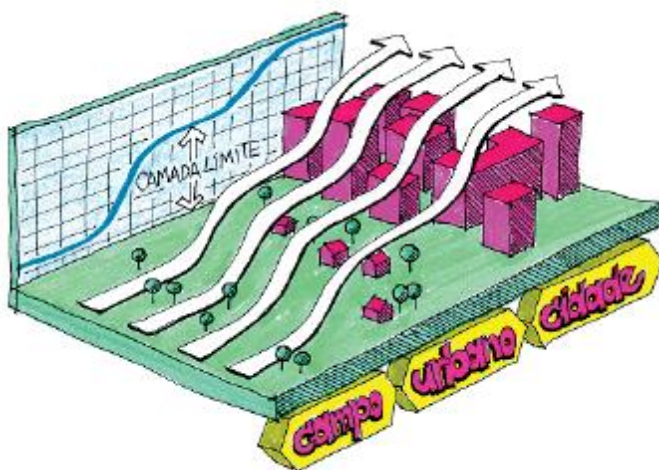
2.2.5 Ventos

Em nível local, entre os fatores que influenciam as correntes de ar, destacam-se o relevo, a vegetação, as edificações, outros anteparos naturais ou artificiais e a altitude. A influência do relevo acontece na medida em que, quanto mais acidentado, mais se constitui em barreira aos ventos, modificando as condições de umidade e de temperatura do ar em relação ao macroclima. A vegetação, assim como as edificações e os anteparos, pode alterar as condições do vento local, causando seu desvio,

canalização ou obstrução conforme o perfil topográfico do terreno (FIG. 4). Além disso, a vegetação contribui fortemente para umidade diária do ar. Em relação à altitude, quanto maior ela for, menor será a temperatura do ar e maior será a velocidade do vento (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Frota e Schiffer (2007) acentuam que, em nível global, a principal determinante das direções e características dos ventos é a variação na distribuição das pressões atmosféricas, conforme as estações do ano. Essa variação pode ser explicada, entre outros fatores, pelo aquecimento e resfriamento das terras e mares, pelo gradiente de temperatura no globo e pelo movimento de rotação da Terra.

Figura 4 – Vento e rugosidade do terreno



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2016, p. 80).

Oliveira (2006) propõe uma avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente-úmido. Ele afirma que o vento deve ser levado em consideração nos estudos de conforto térmico, uma vez que o aumento das taxas de ventilação diminui as variações de comportamento térmico da edificação, podendo mascarar o desempenho térmico do ambiente. Por exemplo, uma edificação com envoltória inadequada quanto à transmitância térmica pode obter bom desempenho térmico diante de elevadas taxas de ventilação. Também cita que não se pode garantir ventilação natural constante e adequada nas edificações, devido às variações na disponibilidade do vento, principalmente em zonas urbanas. Assim, o impacto da escolha da envoltória é maior em condições de pouca ventilação, dado que suas características serão mais importantes na obtenção do conforto térmico.

Além disso, a velocidade do fluxo de ar no ambiente influi nos processos de troca de calor do corpo com o meio por convecção e por evaporação. Nos ambientes internos, a movimentação do ar geralmente não sofre ação direta do vento e costuma ter valores abaixo de 1 m/s. A convecção ocorre naturalmente devido à diferença de temperatura no ambiente, cujo ar quente, por ser menos denso, sobe e o ar frio mais denso desce. A redução da sensação de calor acontece à medida que o deslocamento do ar retira a água em contato com a pele e aumenta a evaporação do corpo humano (MARÇAL, 2016; MOURA; XAVIER, 2012; RUAS, 2002).

Essa redução da sensação de calor pode ser benéfica quando o aumento da velocidade do ar provoca uma desejável aceleração nos processos de perda de calor do corpo. Também pode ser prejudicial quando a perda de calor é indesejável e provoca o resfriamento excessivo do corpo como um todo ou em uma de suas partes, efeito internacionalmente conhecido como *draught* (RUAS, 2002).

É importante ressaltar que as variáveis climáticas atuam e se interferem mutuamente e, por isso, devem ser pensadas sob essa ótica em análises de conforto térmico. Como exemplo, regiões que apresentam uma mesma temperatura podem gerar sensações de conforto divergentes em função da velocidade e da umidade do ar. Essas variáveis devem, também, ser analisadas sob a ótica de indivíduos aclimatados, saudáveis e adequadamente vestidos. Para tal, existe uma série de índices que determinam as condições de conforto térmico e oferecem os vários graus de conforto ou desconforto por sensação de frio ou de “calor”. Frota e Schiffer (2007) e Lamberts, Dutra e Pereira (2016) acreditam que esses índices são desenvolvidos fixando-se tipos de atividade e vestimenta do indivíduo e relacionando-os a variáveis ambientais, para reunir sob a forma de cartas ou nomogramas as diversas condições climáticas que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos.

Conforme exposto pelos autores, esses estudos originaram as chamadas zonas de conforto, que são o resultado do cruzamento de variáveis como a temperatura do bulbo seco, a umidade e a velocidade do ar. Essas zonas de conforto, entretanto, devem ser entendidas como uma indicação, devendo ser analisadas sob a ótica de sua aplicabilidade em relação às condições climáticas locais e às especificidades de cada projeto. Os dados obtidos por meio dos referidos índices de conforto térmico devem, durante a etapa de planejamento e de projeção do ambiente construído, ser cruzados com os dados referentes às formas arquitetônicas, para que a estrutura da edificação e o seu entorno imediato possam contribuir com o

microclima. Os autores chamam a atenção e destacam que, assim como a forma da edificação, as relações entre homem e espaço também devem ser consideradas no planejamento dos interiores das construções. As funções das edificações (empresarial, residencial, pública ou industrial) são distintas e, conseqüentemente, necessitam de planejamento e projeto igualmente distintos, sendo fator influente na definição das estratégias bioclimáticas a serem adotadas. Portanto, é importante que a delimitação de uma zona de conforto térmico para aplicação nos ambientes construídos considere aspectos básicos de trocas térmicas homem-ambiente, permitindo ao ser humano manter constante a temperatura do seu corpo sem acionar, de forma perceptível, seus mecanismos de defesa contra o calor ou contra o frio, sejam quais forem as condições climáticas externas (FROTA; SCHIFFER, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

2.3 Mecanismos de trocas térmicas

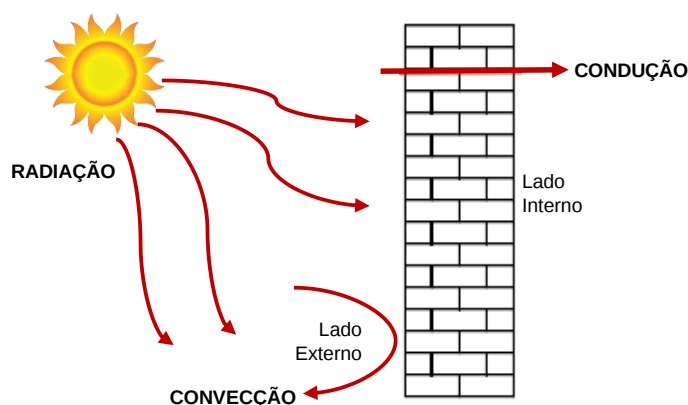
As trocas térmicas acontecem sempre que corpos de temperaturas diferentes são colocados em contato em um mesmo ambiente. A transferência de calor é o processo pelo qual a energia é transportada, ou seja, ela acontece sempre que houver diferença de temperatura entre os corpos em contato ou em um mesmo corpo. Os corpos de temperatura mais elevada perdem energia para os corpos de temperatura mais baixa até que o sistema entre em equilíbrio térmico. De acordo com a primeira lei da termodinâmica, “a energia não pode ser criada nem destruída, somente modificada de uma para outra forma”. Desse modo, a energia total do universo é constante e um sistema pode perder ou receber calor, mas nunca o armazena. A termodinâmica explica a relação entre o calor e o estado inicial e final de equilíbrio térmico de um corpo, além de determinar a quantidade de calor necessária ao sistema para transição entre os estados de equilíbrio. Essa ciência tem foco no entendimento dos fenômenos de transferência de calor, nos meios pelos quais esse calor é transferido, no cálculo das equações, das taxas pelas quais essa transferência de calor acontece. O calor, responsável pela variação da energia interna de um sistema, não pode ser medido ou observado diretamente (CALLISTER, 2016; KREITH, 2003).

Incropera e Dewitt (2014) afirmam que os processos de transferência de calor podem ser quantificados em termos de equações de taxas apropriadas. Para o tratamento de problemáticas que envolvam essas questões, fazem-se necessárias

definições de hipóteses, idealizações e aproximações, que devem ser levadas em conta durante a análise dos resultados.

Existem duas condições que possibilitam a transferência de energia térmica, as trocas de calor que envolvem variações de temperatura, conhecidas como troca seca ou calor sensível, e as trocas por mudança de estado de agregação da matéria, conhecidas como troca úmida ou calor latente. Autores como Callister (2016) e Kreith (2003) descrevem esses mecanismos de transferência de calor e mostram que as trocas úmidas acontecem por condensação e evaporação, enquanto as trocas secas envolvem a condução, convecção e radiação térmica. Estes são considerados os principais aspectos básicos de trocas térmicas no ambiente construído. É importante, portanto, compreender esses mecanismos físicos que fundamentam a transferência de calor, pois eles são responsáveis pela delimitação da zona de conforto aplicada à Arquitetura, à Engenharia e ao *design* do conforto e, em especial, os fenômenos de trocas térmicas por condução, convecção e radiação, conteúdo fundamental para o entendimento sobre o comportamento térmico das edificações (FIG. 5).

Figura 5 – Mecanismo de transmissão de calor em fachada



Fonte: adaptado de Incropera e Dewitt (2014, p. 34).

2.3.1 Condução

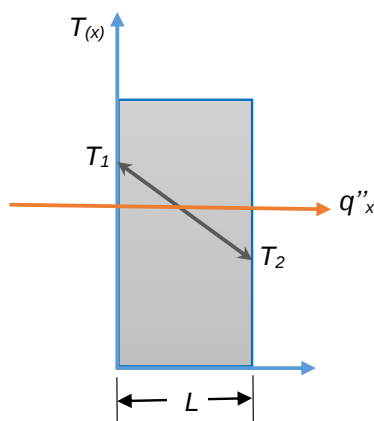
No estudo da transferência de calor, a condução térmica pode ser considerada a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas de menos energia, devido às interações que existem entre elas. Acontece com base em meio sólido ou em líquidos e gases, mas, nesses casos, sempre acompanhada do mecanismo de convecção e/ou radiação. A condução acontece pela troca de calor

entre dois corpos que se tocam e que estejam em temperaturas diferentes ou através de um mesmo corpo que também esteja submetido à diferença de temperatura. Devido às interações que existem entre as moléculas acontece a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas com menos energia. A transferência de calor em meios sólidos acontece apenas por condução, em regime permanente (estacionário), em que o perfil de temperatura é constante ao longo do meio e do tempo ou em regime transiente (não estacionário), cuja temperatura varia com o tempo. Em ambos os casos, a transferência de calor pode acontecer em diferentes direções (INCROPERA; DEWITT, 2014). Segundo os autores, é possível quantificar o processo de transferência de calor em termos de equações e de taxas apropriadas. Essas equações podem ser utilizadas para calcular a quantidade de energia transferida por unidade de tempo. Para a condução de calor a taxa de transferência é conhecida pela Lei de Fourier. Para parede plana (FIG. 6), que apresenta distribuição de temperatura $T_{(x)}$, a equação da taxa de transferência de calor é dada pela Equação 1:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Equação 1}$$

sendo o fluxo de calor q''_x (W/m^2) a taxa de transferência na direção x por unidade de área perpendicular à direção de transferência, proporcional ao gradiente de temperatura, dT/dx , nessa direção. A constante de proporcionalidade k é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica ($W/m.K$) e é característica do meio sólido.

Figura 6 – Transferência de calor unidirecional por condução



Fonte: adaptado de Incropera e Dewitt (2014, p. 37).

Observa-se que a Equação 1 fornece o fluxo de calor, ou seja, a taxa de transferência de calor por unidade de área. A taxa de transferência de calor por condução, $q_x(W)$, através da parede plana de área A é, portanto, o produto do fluxo de calor pela área, $q_x = q''_x.A$.

Incropera e Dewitt (2014) esclarecem, ainda, que a condutividade térmica depende da densidade do material (a matéria é sempre muito mais condutora que o ar contido em seus poros), da natureza química do material (materiais amorfos são, em geral, menos condutores que os cristalinos) e da umidade do material, pois a água é mais condutora que o ar. O coeficiente k varia com a temperatura, porém, para as faixas de temperatura correntes na construção, deve ser considerada a característica de cada material. Assim, a TAB. 1 registra valores médios relativos ao coeficiente de condutividade térmica k para alguns materiais de construção. Os valores demonstram que os concretos e argamassas possuem condutividade térmica mais alta do que os materiais cerâmicos.

Tabela 1 – Condutividade térmica de materiais de construção

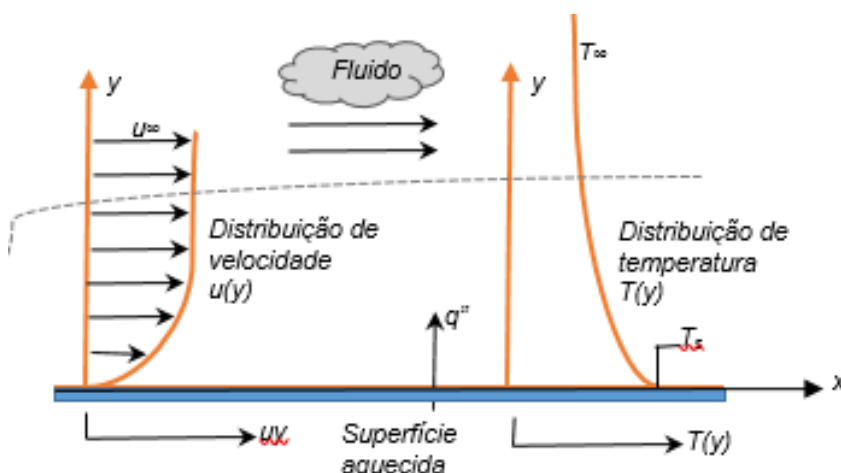
Material	$k [W/(m.K)]$
Argamassa comum	1,15
Argamassa de gesso (ou cal e gesso)	0,70
Cerâmica	0,90
Tijolos e telhas de barro	0,70
	0,90
	1,00
	1,05
Concreto com agregado de pedra (concreto normal)	1,75
Areia seca	0,30
Isolantes térmicos - Poliestireno expandido moldado	0,040

Fonte: adaptado da NBR 15220-2 (ABNT, 2005b).

2.3.2 Convecção

É a troca de calor que acontece entre um fluido em movimento e uma superfície quando os dois se encontram a diferentes temperaturas. Quando se considera o escoamento do fluido sobre uma superfície aquecida, como consequência irá ocorrer a interação entre fluido em movimento e a superfície aquecida, gerando distribuição de velocidade que varia entre zero, na superfície, e um valor u (infinito) associado ao fluxo. Essa região no fluido é conhecida como camada limite de velocidade. Se $T_s > T^\infty$, acontecerá a transferência de calor por convecção entre a superfície e o fluido (FIG. 7).

Figura 7 – Camada limite na transferência de calor por convecção



Fonte: adaptado de Incropera e Dewitt (2014, p. 4).

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos, a transferência de calor devido ao movimento molecular aleatório (difusão) que acontece próximo da superfície, onde a velocidade do fluido é baixa ($y=0$). A energia transferida por meio do movimento global do fluido, a espessura da camada limite cresce à medida que o escoamento progride na direção de x . Independentemente das características particulares do processo de transferência de calor, a Equação 2, segundo Incropera e Dewitt (2014), é apropriada para essa taxa de transferência:

$$q'' = h (T_s - T_\infty) \quad \text{Equação 2}$$

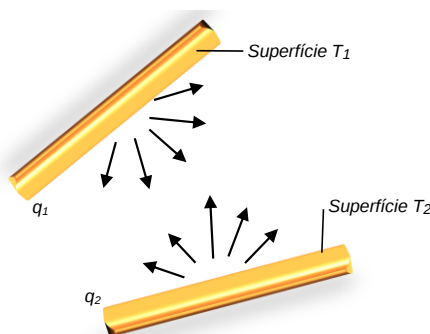
sendo q'' o fluxo de calor convectivo (W/m^2) proporcional à diferença de temperatura da superfície e do fluido, T_s e T_∞ , respectivamente.

Essa expressão é conhecida como a lei do resfriamento de Newton, e a constante de proporcionalidade h ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) é chamada de coeficiente de transferência por convecção. A variável h depende das condições na camada limite, as quais, por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do movimento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte de fluido. Incropera e Dewitt (2014) concluem afirmando que todo estudo de convecção, em última análise, se reduz ao estudo dos procedimentos pelos quais h pode ser determinado.

2.3.3 Radiação

Toda matéria que se apresenta em uma temperatura não nula, ou seja, acima do zero absoluto ($-273,15^{\circ}\text{C}$), emite energia em forma de radiação térmica. A radiação é o mecanismo de troca de calor entre corpos que se encontram em uma determinada distância, pela sua capacidade de emitir e de absorver energia térmica. Independentemente da forma da matéria, as emissões podem ser atribuídas a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. Nesse processo, a energia em movimento é chamada de calor radiante. Segundo Incropera e Dewitt (2014), na radiação térmica o transporte da energia é instantâneo e a energia não é transportada ponto a ponto no interior do meio, e sim a partir de troca direta entre as superfícies afastadas e a diferentes temperaturas (FIG. 8).

Figura 8 – Troca de calor por radiação



Fonte: adaptado de Incropera e Dewitt (2014, p. 1).

Esse mecanismo é consequência da natureza eletromagnética das partículas que, ao serem absorvidas pelo material, provocam efeito térmico, o que permite sua transmissão sem necessidade de meio para propagação, ocorrendo mesmo no vácuo (INCROPERA; DEWITT, 2014). A radiação acontece mediante dupla transformação da energia: uma parte do calor do corpo com alta temperatura converte-se em energia radiante, que chega até o corpo com baixa temperatura, onde é absorvida em proporção que depende da superfície receptora, sendo novamente transformada em calor. O sol é um grande fornecedor de energia. As ondas eletromagnéticas transmitidas por ele são absorvidas e transformadas, em grande parte, em energia

térmica. A essa propagação de energia por meio de ondas eletromagnéticas dá-se o nome de radiação (VILLAS BÔAS, 2010).

Incropera e Dewitt (2014) afirmam que existem muitas aplicações nas quais é conveniente expressar a troca de calor líquida por radiação. O fluxo de calor envolvido nesse mecanismo de troca se dá pela Equação 3, que fornece a diferença entre a energia térmica que é liberada devido à emissão da radiação e aquela que é ganha devido à absorção da radiação.

$$q_r = h_r(T_s - T_{viz}) \quad \text{Equação 3}$$

sendo que T_s representa a temperatura da superfície, T_{viz} a temperatura da vizinhança e h_r o coeficiente de transferência de calor por radiação.

De acordo com Incropera e Dewitt (2014), o fluxo de calor envolvido nesse mecanismo de troca é um parâmetro simplificado, que resume todos os fatores que interferem nas trocas de radiação: as temperaturas das superfícies, os aspectos geométricos e físicos das superfícies envolvidas e, principalmente, a emissividade térmica ε da superfície.

Existem quatro formas de troca de calor por radiação: emissão, absorção, reflexão e transmissão. A emissão acontece quando um material libera energia. Na absorção, o material retém a energia, enquanto a reflexão acontece quando a energia é refletida pelo mesmo. Quando a energia atravessa o material, acontece a transmissão. Assim, a radiação, ao incidir em um corpo, uma fração dessa energia pode ser absorvida – absorptância α , uma fração pode ser refletida – refletância ρ e outra parcela pode ser transmitida – transmitância τ . Incropera e Dewitt (2014) consideram que um corpo tem certa capacidade para absorver, refletir ou transmitir energia. A soma desses três coeficientes, para um mesmo comprimento de onda, sempre será igual a 1, conforme Equação 4.

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

Para materiais opacos que possuem transmitância igual a zero, essa relação se simplifica para a Equação 5:

$$\alpha + \rho = 1 \quad \text{Equação 5}$$

Incropera e Dewitt (2014) atestam que uma porção ou toda a irradiação pode ser absorvida pela superfície, aumentando, dessa forma, a energia térmica do

material. A capacidade ou habilidade que um corpo tem de absorver energia radiante incidente é sempre a mesma que ele tem de emitir sua própria energia em forma de radiação infravermelha, chamada de poder emissivo ou “emissividade” ϵ .

2.4 Emissividade

A radiação emitida pela superfície de um material tem sua origem na energia térmica da matéria limitada pela superfície, e a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área é denominada poder emissivo da superfície. Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela lei de Stefan-Boltzmann e de Planck (teoria do corpo negro). Um corpo negro é um objeto ideal que absorve, em qualquer comprimento de onda, toda a radiação incidente sobre ele. O corpo negro tem poder emissivo igual a 1. Ou seja, tudo que ele recebe ele emite. A relação existente entre a energia emitida por um corpo real em relação a um corpo negro sob a mesma temperatura é conhecida como “emissividade” ϵ , conforme mostrado por Incropera e Dewitt, (2014) na Equação 6:

$$\alpha = \epsilon \quad \text{Equação 6}$$

sendo: α coeficiente de absorção ou absortância, ϵ coeficiente de emissividade.

A emissividade determina a maior ou menor quantidade de energia que um corpo real emite em um dado comprimento de onda. Ela depende fortemente do comprimento de onda, do ângulo de incidência, da superfície do material, de sua temperatura absoluta, de suas características físicas e geométricas e de seu acabamento. Assim, como a emissividade de um corpo negro é igual a 1, essa propriedade para superfícies reais será sempre menor que 1, e nunca menor que zero, conforme expresso pela Equação 7:

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

sendo ϵ coeficiente de emissividade, ρ coeficiente de reflexão ou refletividade e τ coeficiente de transmissão ou transmissividade.

De forma simplificada, pode-se dizer que emissividade é a capacidade que um corpo tem de emitir radiação térmica quando comparado a um corpo negro, ou seja, tudo que ele recebe ele emite. A quantidade total de energia térmica que um corpo

pode emitir independe de sua temperatura e de sua fonte original e é influenciada apenas pelas radiações emitidas e absorvidas. Um corpo de emissividade elevada irradia mais energia que um corpo com emissividade baixa, à mesma temperatura. Além da energia emitida do próprio corpo, existe a interferência de energias refletidas e transmitidas de outras fontes. Como as radiações refletidas e transmitidas não causam consequências ao material, no âmbito da energia térmica, materiais de alta refletividade são utilizados com frequência como isolantes térmicos. As propriedades radiativas podem ser afetadas ou não por revestimentos sintéticos ou texturas aplicados na superfície dos materiais. A absorvidade é influenciada significativamente pela cor da superfície que, conseqüentemente, interfere no comportamento térmico da superfície analisada (INCROPERA; DEWITT, 2014).

A emissividade pode ser determinada por meio de duas técnicas: temperatura conhecida ou emissividade conhecida. Em ambas se utiliza o valor de um parâmetro já conhecido, sendo que, na primeira técnica, utiliza-se a leitura realizada por termopar para ajustar o parâmetro emissividade na termocâmara até que esta acuse o mesmo valor indicado pelo termopar. Na segunda técnica, insere-se na termocâmara o valor de emissividade de um material com características semelhantes ao que se deseja medir, de acordo com o estipulado pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Em seguida, realiza-se a leitura da temperatura do material em que se deseja identificar a emissividade, para ajustar os valores obtidos pela termocâmara, até que o valor de temperatura lido no material de emissividade desconhecida seja igual ao valor utilizado de referência (INCROPERA; DEWITT, 2014; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; MALDAGUE, 2002; NUNES, 2016). Toda onda eletromagnética transporta energia, porém apenas as da faixa do infravermelho são chamadas “ondas de calor”. O infravermelho, ao ser absorvido, transforma-se mais facilmente em energia térmica.

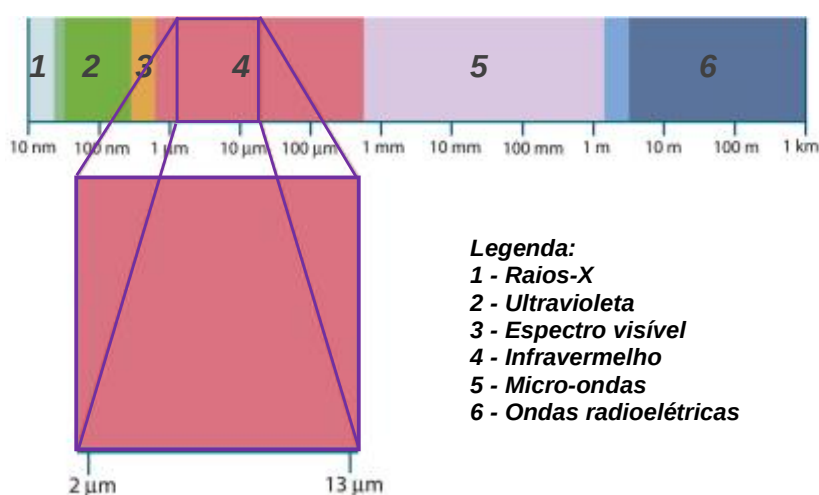
2.5 Radiação infravermelha

De acordo com as características físicas, as ondas classificam-se em mecânicas e eletromagnéticas. As ondas mecânicas são provenientes da propagação de energia por meio de partículas de um meio material sem que estas sejam transportadas. As ondas eletromagnéticas são formadas por um campo elétrico e outro magnético, que podem se propagar no vácuo a uma velocidade aproximada de 300.000 km/s e em alguns meios materiais com velocidades muito inferiores a 300.000

km/s. As frequências das ondas eletromagnéticas são uma de suas principais características. Quanto mais altas, mais energia possuem. Ao conjunto de todas as frequências das ondas eletromagnéticas dá-se o nome de “espectro eletromagnético” (FIG. 9).

A luz visível é aquela parte do espectro eletromagnético que os olhos são capazes de perceber e que compreende pequena parte do espectro (3). As frequências acima do visível são chamadas de “ultravioleta” (2). Além do ultravioleta, encontram-se os Raios-X (1). Na região intermediária ($2\mu\text{m}$ a $13\mu\text{m}$) encontra-se a faixa da radiação térmica, que compreende o infravermelho (4), o espectro visível (3) e uma parcela do ultravioleta. Abaixo, na extremidade das ondas longas, fundem-se as micro-ondas (5) com as ondas radioelétricas (6), em milímetros (FLIR, 2015).

Figura 9 – Divisão do espectro eletromagnético



Fonte: adaptado do catálogo técnico FLIR (2015, p. 144).

Dependendo das frequências das ondas eletromagnéticas, as radiações do espectro são portadoras de quantidades de energia diferentes. Quanto mais curto o comprimento de onda, mais alta é a energia de um fóton⁷. As ondas de frequências diferentes não interferem entre si, fazendo com que a frequência seja uma das principais características das ondas eletromagnéticas. Como todos os objetos emitem radiação infravermelha em função da sua temperatura, a energia infravermelha é

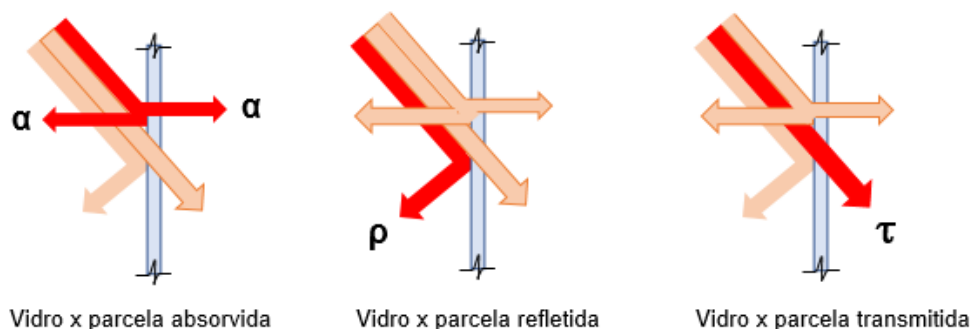
⁷ Partícula com massa de repouso nula, carga elétrica nula e *spin* 1, constituída por uma partícula de luz ou *quantum* de radiação eletromagnética cuja energia, calculada por $h \times f$, é o produto da constante de Planck (h) pela frequência da radiação em hertz (f). Dicionário Michaelis. Disponível em: < <https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/f%C3%B3ton/>>. Acesso em: 15 Jun. 2020.

gerada pela vibração e rotação dos átomos e moléculas. Quanto mais aquecido um objeto, maior é a agitação atômica e molecular e maior é a energia infravermelha por ele emitida. O calor percebido quando se está exposto ao sol, ou próximo de uma chama, é, em grande parte, devido à radiação infravermelha. Portanto, a radiação infravermelha pode ser refletida, absorvida, emitida e transmitida através de um corpo sólido (INCROPERA; DEWITT, 2014).

2.6 Comportamento térmico da edificação

Quando o sol incide sobre uma edificação, tal fato representa ganho de calor nos materiais que compõem as fachadas. Os fatores que contribuem para o ganho de calor pela ação solar são a incidência de radiação e as características termofísicas dos materiais da edificação. Os elementos de fechamento da edificação, quando expostos aos raios solares, diretos ou difusos, podem ser classificados como opacos ou semitransparentes/translúcidos. A principal diferença entre esses fechamentos é que os classificados como semitransparentes/ translúcidos, em especial os vidros, possuem capacidade de transmitir a radiação solar para interior do ambiente, enquanto os opacos (tijolos, argamassa e revestimentos) são incapazes de transmitir a radiação. Os fechamentos em vidro (semitransparentes) comportam-se da seguinte maneira: absorvem (α), refletem (ρ) e transmitem (τ), para o interior, parte da radiação solar incidente (FIG. 10). Ao mesmo tempo em que transmitem a radiação no comprimento de onda solar (proveniente de alta temperatura – ondas curtas) para o interior da envoltória da construção, bloqueiam a radiação na faixa de comprimento de ondas emitidas pelo interior da construção (proveniente de baixa temperatura – ondas longas), culminando no efeito estufa (CALLISTER, 2016; INCROPERA; DEWITT, 2014; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Figura 10 – Comportamento do vidro em relação à radiação solar

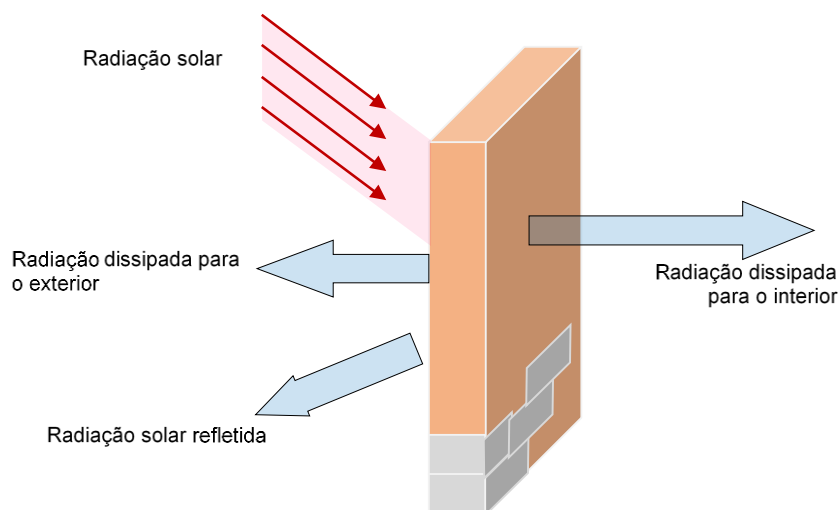


Fonte: adaptado de Lamberts, Dutra e Pereira (2016, p. 200).

Conforme afirmam Lamberts, Dutra e Pereira (2016), fatores como a orientação e o tamanho desse tipo de fechamento (exposição ao sol), a característica do vidro (referente à sua transmitância térmica) e o uso de proteções solares internas (cortinas, persianas e películas) e externas (*brises*) são relevantes quanto ao planejamento do desempenho térmico do ambiente construído.

Os fechamentos opacos comportam-se refletindo ρ e absorvendo α a radiação solar, e por serem mais seletivos à radiação de ondas curtas, apresentam transmitância τ nula. Como não transmitem diretamente a radiação solar para o interior da edificação, a energia solar incidente é parcialmente refletida, parcialmente absorvida, dissipada para o interior e parcialmente dissipada para o exterior (FIG. 11) (CALLISTER, 2016; KREITH, 2003; LAMBERTS; DUTRA, PEREIRA, 2016).

Figura 11 – Trocas de calor através de paredes opacas



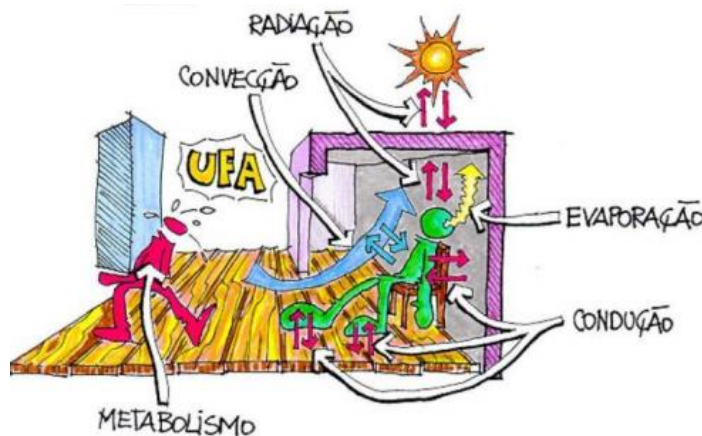
Fonte: adaptado de Frota e Schiffer (2007, p. 42).

A transferência de calor entre meio externo e interno acontece quando as paredes opacas recebem calor do meio externo por convecção e radiação, aumentando a temperatura da superfície externa e, por condução, devido à diferença de temperatura entre as superfícies externa e interna, conduzem o calor à superfície interna. Por fim, a energia térmica da superfície interna é transmitida ao interior da edificação pelos processos de radiação e convecção (FIG. 12). O inverso acontece quando a temperatura no interior da edificação é maior do que a do exterior (ABNT, 2005b).

A radiação solar que incide nas paredes pode aumentar a temperatura interna do ar, provocando desconforto térmico no ambiente. Esse efeito pode ser reduzido utilizando-se na estrutura do sistema de fechamento materiais e paredes com mais capacidade calorífica para amortecer internamente a variação da temperatura superficial externa (ABNT, 2005b).

Diante do exposto, o presente trabalho trata nesta revisão de literatura apenas da transferência de calor nos fechamentos opacos, visto ser este o seu objeto.

Figura 12 – Trocas térmicas no interior da edificação



Fonte: Lamberts, Dutra e Pereira (2016, p. 40).

2.6.1 Transferência de calor em fechamentos opacos

A transmissão do calor em fechamentos opacos acontece por um diferencial de temperatura nas duas faces da alvenaria (externa e interna). O sentido do fluxo térmico quando a superfície é submetida à incidência solar segue no sentido da face mais aquecida em direção à menos aquecida. Dessa forma, o calor proveniente da radiação solar é absorvido pela parede, aumentando a sua temperatura superficial

externa, enquanto uma parcela dessa radiação é refletida e outra parcela é transmitida através do material, interferindo na temperatura interna do ambiente. Cada parcela absorvida da radiação tem seu valor proporcional ao material utilizado na parede (absortividade), visto que a superfície externa da parede que absorveu o calor apresenta temperatura superior à da superfície oposta, ocasionando um fluxo térmico no sentido da superfície menos aquecida por condução. Sua intensidade depende da condutividade térmica do material, isto é, da densidade do material (propriedade de conduzir mais ou menos calor por unidade de tempo), assim como da espessura do material, que determina a resistência térmica (capacidade em resistir à passagem de calor) ou mesmo da refletividade do material. Por exemplo, um fechamento de cor clara, de absortividade $\alpha = 0,30$ significa que a parede absorverá 30% da radiação solar e refletirá 70% (ABNT, 2005b; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Incropera e Dewitt (2014) chamam a atenção para o fluxo de calor que pode ter sentido ascendente ou descendente, dependendo dos espaços de ar confinados ou espaços não ventilados entre as lâminas paralelas da parede. Dessa forma, a troca térmica pode acontecer por convecção e radiação. Logo, a resistência térmica vai acontecer em função da espessura da lâmina de ar dentro da parede, do sentido do fluxo de calor e da emissividade da superfície de contato.

Finalmente, as trocas térmicas podem acontecer por radiação e convecção. As perdas por convecção acontecem em função da resistência superficial interna da parede. As perdas por radiação dependem da emissividade da superfície do material em contato com o ar externo, visto que podem ocorrer oscilações de emissividade devido à dissipação do calor pelo vento. A superfície oposta na qual o sentido do fluxo térmico tende a se dissipar apresenta temperatura aumentada em relação à temperatura do ar em seu meio. Essa propriedade física da camada superficial do material emissor determina a quantidade de calor que será emitida por unidade de tempo. Essa radiação térmica é liberada para o exterior e para o interior da alvenaria, que pode ser captada por equipamentos de termografia infravermelha (CALLISTER, 2016; INCROPERA; DEWITT, 2014).

Por meio da transmitância térmica é possível avaliar o comportamento do fechamento opaco em relação à transmissão de calor. A transmitância pode ser considerada o inverso da resistência total dos fechamentos, isto é, da soma das resistências térmicas superficiais internas e externas, e das camadas dos fechamentos (ABNT, 2005b).

2.6.2 Condutância térmica superficial

A condutância térmica superficial, segundo a NBR 15220-1 (ABNT, 2005a) e Incropera e Dewitt (2014), engloba as trocas térmicas que se dão na superfície da parede. O coeficiente de condutância térmica superficial expressa as trocas de calor por convecção (h_c) e por radiação (h_r). Assim, se uma lâmina separa dois ambientes, um externo e outro interno, havendo diferenças de temperatura, as trocas térmicas superficiais podem ser expressas por meio dos coeficientes de condutância térmica superficiais, pela Equação 8:

$$h_c + h_r = h_e \text{ ou } h_i \quad \text{Equação 8}$$

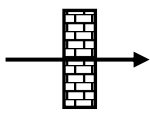
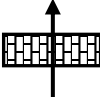
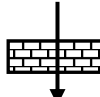
sendo h_e o coeficiente combinado de convecção e radiação térmica superficial externa ($\text{W/m}^2\text{°C}$) e h_i o coeficiente combinado de convecção e radiação térmica superficial interna ($\text{W/m}^2\text{°C}$).

Os coeficientes h_e e h_i são parâmetros simplificados, válidos para condições convencionalmente simplificadas admitidas para h_r . Se h_e e h_i são coeficientes de condutância térmica superficiais, as resistências térmicas superficiais são:

$$\frac{1}{h_e} \text{ e } \frac{1}{h_i}, \text{ externa e interna, respectivamente (ABNT, 2005a).}$$

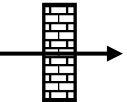
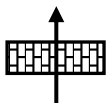
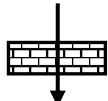
Nas TAB. 2 e 3 apresentam-se os valores dos coeficientes e resistências térmicas superficiais para paredes externas e internas sujeitas a velocidades do ar de 2 m/s para superfícies externas e 0,5 m/s para superfícies internas (FROTA; SCHIFFER, 2007).

Tabela 2 – Coeficientes e resistências térmicas superficiais

Posição das paredes e sentidos do fluxo	Unidades	Paredes exteriores				
		h_i	$\frac{1}{h_i}$	h_e	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$
Parede vertical 	$W/2^{\circ}C\ m^2$	8	-	20	-	-
	$^{\circ}C/W$	-	0,12	-	0,05	0,17
Parede horizontal (fluxo ascendente) 	$W/m^2\ ^{\circ}C$	11	-	20	-	-
	$m^2\ ^{\circ}C/W$	-	0,09	-	0,05	0,14
Parede horizontal (fluxo descendente) 	$W/m^2\ ^{\circ}C$	6	-	20	-	-
	$m^2\ ^{\circ}C/W$	-	0,17	-	0,05	0,22

Fonte: adaptado de Frota e Schiffer (2007, p. 190).

Tabela 3 – Coeficientes e resistências térmicas superficiais

Posição das paredes e sentidos do fluxo	Unidades	Paredes interiores				
		h_i	$\frac{1}{h_i}$	h_e	$\frac{1}{h_e}$	$\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}$
Parede vertical 	$W/m^2\ ^{\circ}C$	8	-	8	-	-
	$m^2\ ^{\circ}C/W$	-	0,12	-	0,12	0,24
Parede horizontal (fluxo ascendente) 	$W/m^2\ ^{\circ}C$	10	-	10	-	-
	$m^2\ ^{\circ}C/W$	-	0,10	-	0,15	0,20
Parede horizontal (fluxo descendente) 	$W/m^2\ ^{\circ}C$	6	-	6	-	-
	$m^2\ ^{\circ}C/W$	-	0,17	-	0,17	0,34

Fonte: adaptado de Frota e Schiffer (2007, p. 191).

Na TAB. 4 apresenta-se a variação do coeficiente superficial externo h_e , segundo a velocidade do vento, para casos especiais e conhecidos, posto que há consenso em se adotar 2 m/s ou, no máximo, 3 m/s para a velocidade do ar externo, em se considerando o meio urbano.

Tabela 4 – Condutâncias e resistências térmicas superficiais

Tipo de vento	Velocidade do vento (m/s)	h_e (W/m ² °C)
Ar calmo	0,1	8
Velocidade muito fraca	0,5	10
Velocidade fraca	1	13
Velocidade média	3	21
Velocidade forte	9	35
Velocidade muito forte	18	50

Fonte: adaptado de Frota e Schiffer (2007, p. 192).

2.6.3 Espaço de ar confinado

Para espaços de ar confinados, aqueles não ventilados, entre duas lâminas paralelas, a resistência térmica é função dos seguintes fatores: espessura da lâmina de ar, sentido do fluxo térmico e emissividade das superfícies em confronto. Na TAB. 5 abordam-se valores de resistência térmica de espaços de ar (R_{ar}) confinados entre duas lâminas paralelas.

Tabela 5 – Resistência térmica de espaços de ar (R_{ar}) confinado

Posição espaço de ar	Direção e sentido do fluxo de calor	Espessura do espaço de ar (cm)	Temperatura das faces		h_{ar} (m ² °C/W), para $\epsilon_r =$			
			Média (°C)	Diferença (°C)	0,82	0,47	0,20	0,11
Vertical	Horizontal	2 a 10	32	5,5	0,15	0,22	0,38	0,51
			10	5,5	0,18	0,26	0,41	0,54
Horizontal	Vertical ascendente	2 a 10	10	5,5	0,16	0,21	0,32	0,39
Horizontal	Vertical descendente	2	32	11	0,15	0,21	0,36	0,46
		4	32	11	0,16	0,26	0,48	0,66
		10	32	11	0,17	0,28	0,58	0,86

Sendo:

$$\epsilon_r = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

Para: ϵ_1 = emissividade térmica relativa

ϵ_1 e ϵ_2 = emissividade de cada uma das lâminas paralelas que confinam o espaço de ar

Fonte: Frota e Schiffer (2007, p. 192).

2.6.4 Inércia térmica

Outra característica dos fechamentos a ser considerada é sua inércia térmica. Inicialmente, os fechamentos absorvem calor tanto do meio externo quanto do interno, dependendo do lado onde o ar está com temperatura mais alta. A inércia térmica é associada a dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico do edifício: o amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais (CALLISTER, 2016; INCROPERA; DEWITT, 2014; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Quando, por exemplo, a temperatura externa da parede que estava inicialmente igual à temperatura interna se eleva, certa quantidade de fluxo de calor penetra na parede, porém esse fluxo não atravessa a parede imediatamente, parte fica retida em seu interior como consequência de sua capacidade térmica. Quanto maior a capacidade térmica, maior será a quantidade de calor retido, e este pode ser devolvido para o interior do ambiente quando o ar presente estiver com temperatura mais baixa que da superfície do fechamento (FROTA; SCHIFFER, 2007).

2.7 Sistemas de revestimento de fachadas

Os revestimentos de fachadas são importantes para as edificações, uma vez que, além da estética, possuem como função principal a proteção das edificações. Os sistemas de revestimento de fachadas se apresentam por diferentes meios: aplicação de pinturas, placas pétreas, tijolo aparente, argamassa decorativa, cerâmica, entre outras. Em determinadas cidades brasileiras, como é o caso de Belo Horizonte, os revestimentos cerâmicos são bastante utilizados devido às suas características estéticas e técnicas. Embora existam vários sistemas de utilização dos revestimentos cerâmicos, o mais usual em fachadas no Brasil são os sistemas aderidos. Eles trabalham completamente unidos sobre bases e substratos. Existem também os sistemas não aderidos, ou seja, entre o revestimento e as camadas não existe aderência entre elas, e podem apresentar divisões com funções de isolamento térmico, acústico e de impermeabilização (NUNES, 2016).

Os requisitos para execução, fiscalização e recobrimento de paredes externas com placas cerâmicas e argamassa colante são estabelecidos pela NBR 13755 – Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização

de argamassa colante (ABNT, 1996b). Essa norma define o sistema de revestimento externo como o conjunto de camadas que devem estar superpostas e intimamente ligadas. O sistema de revestimento externo deve ser composto de: estrutura suporte, alvenarias, camadas sucessivas de argamassas e revestimento final. A função do revestimento externo é proteger das intempéries e dar acabamento estético à edificação. A NBR 13816 – Placas cerâmicas para revestimento: Terminologia (ABNT, 1997a) define revestimento cerâmico como o conjunto formado pelas placas cerâmicas, argamassa de assentamento e o rejunte. As camadas e os materiais que constituem os revestimentos cerâmicos de fachadas aderidos são definidos com base na NBR 13817 - Placas cerâmicas para revestimento – Classificação (ABNT, 1997b) e são apresentados no QUADRO 1. A NBR13818 – Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaio (ABNT, 1997c) classifica e especifica os métodos de ensaio para os revestimentos cerâmicos aderidos.

Quadro 1 – Valores de resistência térmica de espaços de ar confinado

Denominação da camada	Materiais constituintes
Alvenaria / Estrutura	Concreto armado Concreto moldado <i>in loco</i> Concreto pré-moldado Alvenaria de tijolos maciços Alvenaria de blocos cerâmicos Alvenaria de blocos vazados de concreto Alvenaria de blocos de concreto celular Alvenaria de blocos sílico-calcários
Chapisco	Argamassa de cimento e areia, podendo ou não conter adesivos.
Argamassa de regularização (se necessário)	Camada com o mesmo traço do emboço, aplicada em uma ou mais demãos sobre o chapisco, sempre que a espessura do emboço for maior que 25 mm
Emboço	Argamassa de cimento, areia e/ou outro agregado fino, com adição ou não de cal e aditivos finos
Assentamento ou fixação	Argamassa adesiva ou colante, à base de cimento, areia e/ou outros agregados finos, inertes não reativos, com adição de um ou mais aditivos químicos
Cerâmica	Argamassa de rejunte à base de cimento, areia e/ou outros agregados finos, inertes não reativos, com adição de um ou mais aditivos químicos

Fonte: adaptado da NBR 13818 (ABNT, 1997c).

Por se tratar de um sistema, a qualidade e desempenho do revestimento cerâmico dependem, além das características dos materiais envolvidos, de alguns outros fatores, como a condição da base ou substrato, a condição do chapisco e o

correto assentamento do sistema. Contudo, o assentamento envolve algumas variáveis, sendo algumas delas a correta especificação, preparação e aplicação das argamassas de assentamento e de rejunte, além da capacitação da mão de obra para tal finalidade. As condições da alvenaria são muito importantes para a qualidade do revestimento cerâmico. Para montagem da alvenaria, utilizam-se vários tipos de argamassas, que podem ser dosadas em obra ou industrializadas. As preparadas em obra são confeccionadas a partir da mistura homogênea de aglomerantes (cimento), agregado miúdo (areia) e água. Em alguns casos pode conter aditivos ou adições minerais (GASTALDINI; SICHIERI, 2007; NUNES, 2016).

As argamassas de assentamento possuem a função de conectar as unidades de alvenaria para auxiliar na resistência aos esforços laterais; distribuir uniformemente as cargas que atuam na parede; selar as juntas, para garantir a estanqueidade do pano de alvenaria e absorver as deformações naturais a que a alvenaria está sujeita. Essas funções são definidas por algumas propriedades, como a trabalhabilidade; aderência; resistência mecânica; e a capacidade de absorver deformações. A trabalhabilidade garante as condições para executar a parede. A aderência auxilia na resistência aos esforços de cisalhamento e tração, além de também garantir a estanqueidade. Ela pode ocorrer por ancoragem mecânica e/ou química. A ancoragem mecânica depende da penetração da pasta nos poros das camadas adjacentes e é utilizada, principalmente, em cerâmicas e substratos lisos e/ou polidos e que absorvam pouca ou nenhuma umidade, a partir do acréscimo de aditivos químicos na argamassa (CARASEK, 2007; GASTALDINI; SICHIERI, 2007; NUNES, 2016).

A resistência mecânica da argamassa não influencia significativamente a resistência final do pano da alvenaria, mas deve apresentar ganho de resistência suficiente para que seja possível o assentamento de diversas peças do revestimento em um mesmo dia. Além disso, a argamassa precisa ter a capacidade de absorver deformações sem influenciar no comportamento do sistema. Sobre a base de alvenaria assentada com argamassa é aplicado o substrato, que é constituído, nas fachadas externas, pelo chapisco e pelo emboço. Essa camada pode ser executada com materiais e técnicas variadas, desde que atenda às especificações previstas em projeto, assim como às normas correspondentes. As propriedades de resistência mecânica, deformabilidade, estanqueidade, resistência ao fogo e a textura superficial devem ser compatíveis com a camada final de revestimento a ser aplicado. O

substrato influencia, também, na resistência de aderência das camadas que constituem o sistema. O chapisco de fachadas externas é regulamentado pela NBR 13755 (ABNT, 1996b) e tem a função de preparar a base, a fim de uniformizar a superfície em relação à propriedade de absorção de água, e melhorar a aderência do revestimento e garantir mais ancoragem do emboço à base (CARASEK, 2007; GASTALDINI; SICHIERI, 2007; NUNES, 2016).

O emboço para fachadas externas, assim como o chapisco, também é regulado pela NBR 13755 (ABNT, 1996b). A NBR 13749 (ABNT, 1996c) faz recomendações relativas à sua resistência e aderência. O emboço tem a função de cobrir e regularizar a base, possibilitando a aplicação de nova camada, que pode ser reboco ou um revestimento decorativo. Para aplicação do reboco, o emboço deve estar finalizado há, no mínimo, 14 dias, para que sejam reduzidos os riscos de descolamentos devido à movimentação da base por retração hidráulica. Essa camada deve se apresentar seca, isenta de quaisquer elementos ou patologias que possam interferir na aderência com a argamassa colante. Para que resista aos esforços durante sua vida útil, a argamassa de emboço deve apresentar algumas propriedades, como: trabalhabilidade, aderência, durabilidade, resistência mecânica e capacidade de absorver deformações, assim como a argamassa de assentamento. Além dessas propriedades, durante seu preparo devem ser observados alguns parâmetros, como a retenção de água, consumo de cimento e a retração após secagem (CARASEK, 2007; NUNES, 2016).

O reboco é utilizado para recobrir o emboço e permitir a aplicação da camada de revestimento decorativo, que tem a função de regularizar e decorar a superfície. As argamassas colantes industrializadas são compostas de uma mistura pré-dosada pulverulenta, no estado seco, e são as mais utilizadas para assentamento das placas cerâmicas (NUNES, 2016; OLIVEIRA, 2017). São definidas pela NBR 14081-1 (ABNT, 2012) como sendo um produto industrial, no estado seco, composto de cimento *Portland*, agregados minerais e aditivos químicos que, ao ser misturado com água, forma uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada principalmente no assentamento de placas cerâmicas para revestimento. Essa norma classifica as argamassas colantes nas seguintes categorias: AC I, AC II, AC III tipo E e tipo D, conforme indicado no QUADRO 2.

Quadro 2 – Classificação das argamassas colantes industrializadas

Designação da argamassa colante industrializada	Características
AC I	Características de resistência às solicitações mecânicas e termogrométricas típicas de revestimentos internos.
AC II	Características de adesividade que permitem absorver os esforços existentes em revestimentos de pisos e paredes internos e externos sujeitos a ciclos de variação termo-higrométrica e à ação do vento.
AC III	Apresenta aderência superior em relação às argamassas tipos I e II.
Tipo E	Argamassa colante industrializada dos tipos I, II e III, com tempo em aberto estendido.
Tipo D	Argamassa colante industrializada dos tipos I, II, e III, com deslizamento reduzido.

Fonte: adaptado de NBR 14081-1 (ABNT, 2012) e Nunes (2016, p. 26).

A capacidade de retenção de umidade é a propriedade que diferencia a argamassa industrializada da que é preparada na obra: a industrializada retém melhor a umidade, o que permite sua aplicação em camadas finas sem prejuízo da hidratação da pasta. Além disso, o aditivo retentor de água presente na argamassa colante elimina a necessidade de deixar as placas cerâmicas imersas em água antes do assentamento (NUNES, 2016; OLIVEIRA, 2017). Além da categorização da argamassa colante industrializada conforme suas características, ela também pode ser classificada conforme sua aplicação e utilização. Argamassa colante industrializada – AC I é indicada para áreas internas, exceto onde haja elevadas varrições de temperatura (saunas, churrasqueiras); a argamassa colante industrializada – AC II é indicada para áreas internas e externas sujeitas a variações termo-higrométricas e ação do vento. E, por último, a argamassa colante industrializada – AC III apresenta a mesma função que a AC I e AC II, porém com maiores valores de aderência (FIG. 13).

Figura 13 – Argamassas colantes industrializadas



Fonte: Oliveira (2017, p. 4).

A argamassa colante, ao ser misturada com água, origina um sistema composto de três fases: sólido granulado, líquido e ar. Os aditivos se interpõem entre as partículas de cimento e lubrificam o contato entre as partículas sólidas, modificando a plasticidade da argamassa. A aderência inicial da argamassa colante depende dessa plasticidade e da atividade superficial do aditivo. Conforme explicam Bauer (2014), Oliveira (2017) e Nunes (2016), após o preparo da argamassa existe um intervalo de tempo mínimo para que a argamassa colante adquira as propriedades necessárias à sua aderência. Esse tempo é, geralmente, de 15 minutos e deve estar especificado na embalagem do produto, pois alguns aditivos podem alterá-lo. Quando pronta, a argamassa tem vida útil, que é condicionada ao tempo de pega. Assim, seu tempo de uso máximo é, geralmente, de 2h30 min. Após seu endurecimento, a mistura deve ser descartada e não se deve adicionar mais água para sua utilização. O tempo em aberto da argamassa é considerado pela NBR 14081-1 (ABNT, 2012) como o maior intervalo de tempo no qual uma placa cerâmica pode ser assentada sobre a pasta de argamassa colante, após a aplicação desta última sobre a base.

Segundo Oliveira (2017), a argamassa de rejuntamento ou rejunte é um composto que tem por finalidade absorver as deformações e impermeabilizar as juntas entre as placas cerâmicas. Ele deve ser aplicado de acordo com a exigência do sistema, ou seja, quanto à sua flexibilidade, retenção de água, uniformidade de textura, dureza, resistência à mancha e aspecto visual. A argamassa de rejuntamento tem em sua composição cimento, agregados minerais, pigmentos, aditivo celulósico, polímeros e aditivo hidrofugantes. São classificados como cimentício, acrílico ou epóxi

e sua aplicação varia conforme o tamanho da junta que devem recobrir. O recomendado para juntas entre 3 e 10 milímetros é o rejunte cimentício, e para as juntas menores que 3 milímetros o rejunte acrílico ou epóxi. São vários os sistemas de revestimento de fachada. Em função do interesse deste trabalho são descritas apenas as placas cerâmicas.

2.7.1 Placas cerâmicas

A placa cerâmica é a face mais externa do revestimento cerâmico, sendo utilizado tanto em ambientes internos quanto em áreas externas. O Brasil é o quarto maior produtor mundial de placas de revestimento cerâmico e o terceiro maior exportador, ficando atrás somente da China, Itália e Espanha (INMETRO, 2018)⁸. As normas ISO 13006 (ISO, 2012) e NBR 13816 (ABNT, 1997a) definem as placas cerâmicas para revestimento como um material composto de argila e outras matérias-primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformadas por extrusão ou por prensagem, podendo também ser conformadas por outros processos. De acordo com as normas, a placa cerâmica é uma peça porosa, esmaltada em uma das faces, sendo esta a face que recebe um corante. A face posterior ou base, tecnicamente chamada de tardo, não é esmaltada e possui algumas saliências, com o objetivo de proporcionar mais aderência no assentamento.

O tardo da cerâmica pode apresentar coloração vermelha ou branca, dependendo da massa utilizada para sua fabricação, havendo diferenças entre elas. As massas que dão origem a produtos de coloração vermelha são compostas predominantemente de argilas mais ou menos carbonáticas, com alto teor de ferro Fe_2O_3 . As massas brancas possuem adição de outros minerais (feldspato, quartzito, dolomita) para obtenção dessa coloração. Além disso, o preparo e a queima das massas de cor vermelha acontecem por via seca⁹, enquanto nas massas de cor branca esse processo acontece por via úmida¹⁰. Na fabricação, as placas cerâmicas

⁸ INMETRO. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/revestimentos.asp>>. Acesso em: 05 de mai. 2018.

⁹ Via seca – utiliza as seguintes etapas: a) lavra; b) secagem; c) moagem a seco; d) conformação, decoração e queima. A secagem é realizada naturalmente, expondo-a ao sol. As maiores vantagens desse processo são os baixos custos energéticos e o reduzido impacto ambiental (OLIVEIRA, 2000).

¹⁰ Via úmida – utiliza as seguintes etapas: a) mistura de várias matérias-primas: argilas, matérias fundentes (K_2O , Na_2O), talco, carbonatos, que são moídas e homogeneizadas em moinhos de bola, em meio aquoso; b) secagem e granulação da massa em *spray dryer* (atomizador); c) conformação, decoração e queima. A

são secas e queimadas à temperatura de sinterização que varia de 1.150°C para massas vermelhas a mais de 1.200°C para massas brancas. Ambas podem ser ou não esmaltadas, são incombustíveis e não sofrem pela ação da luz solar. A fabricação por via úmida permite ao fabricante melhor controle sobre a produção em termos de estabilidade dimensional, resistência mecânica e térmica, etc., porém acarreta custo mais elevado do que por via seca utilizada para vermelha (RAZERA, 2015; OLIVEIRA, 2000).

No Brasil, o processo de produção da cerâmica com tardo vermelho por via seca concentra-se no polo de Santa Gertrudes, localizado no estado de São Paulo, formado, além do município, pelas cidades de: Rio Claro, Cordeirópolis, Itacemópolis, Ipeúna, Limeira e Piracicaba, e representa cerca de 70% da produção nacional. Já a produção da cerâmica com tardo branco por Via Úmida é mais utilizada na região Sul, no polo cerâmico de Criciúma (SC) e no estado do Paraná. Na Espanha, a maioria das fábricas utiliza somente processo por via úmida, porém a cor do tardo é predominantemente vermelha (ASSOCIAÇÃO PAULISTA DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO. REVESTIMENTOS CERÂMICOS - ASPACER, 2016).

Os diferentes processos de preparo e queima entre as massas de cores vermelha e branca são determinantes para a caracterização da principal diferença entre estas, a absorção de água. Na FIG. 14 ilustram-se os dois tipos de cerâmica estudados. As cerâmicas de fundo vermelho possuem mais porosidade e melhor absorção de água, sendo menos indicadas para banheiros, cozinhas e demais lugares úmidos. Já as cerâmicas de fundo branco têm menos porosidade e absorção de água (RAZERA, 2015; OLIVEIRA, 2000).

A superfície da placa cerâmica apresenta algumas propriedades, que independem da cor de seu tardo, apenas de seu processo de produção e queima, e devem ser observadas para adequação a cada aplicação, como: absorção de água, expansão por umidade, resistência à abrasão, ao manchamento e ao ataque de agentes químicos. A absorção de água está diretamente relacionada à porosidade da peça e a outras características como resistência mecânica, resistência a umidade etc. A capacidade de absorção de água da placa é uma característica importante, pois é ela que irá determinar a expansão e o aumento de tamanho da peça em contato com a água, o que pode ocasionar trincas no esmalte da sua superfície, uma vez que este

maior vantagem desse processo é não precisar esperar a secagem da argila pelo sol e também conseguir uma massa mais homogênea (OLIVEIRA, 2000).

não acompanha a dilatação da base cerâmica (BAUER, 2014; GASTALDINI; SICHIERI, 2007; NUNES, 2016; RAZERA, 2015; SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS - SINDUSCON, 2009).

Figura 14 – Tipos de tardo de cerâmicas estudadas



Cerâmica de tardo de vermelho

Cerâmica de tardo de branco

Fonte: da autora.

A NBR 13818 (ABNT, 1997c) classifica as placas em grupos de absorção de água expressa em porcentagem, conforme os métodos de fabricação expressos na TAB. 6. Na especificação da tabela, deve-se utilizar um código constituído pelo método de fabricação A (extrudado), B (prensado) ou C (outros), acrescido do grupo de absorção I, II ou III, utilizando-se subgrupos (a ou b).

Tabela 6 – Absorção de água conforme métodos de fabricação

Absorção de água (%)	Métodos de fabricação		
	Extrudado (A)	Prensado (B)	Outros (C)
Abs $\leq$ 0,5	AI	Bla	CI
0,5 < Abs $\leq$ 3,0		Blb	
3,0 < Abs $\leq$ 6,0	Alla	Blla	Clla
6,0 < Abs $\leq$ 10,0	Allb	Bllb	ClIb
Abs acima de 10,0	All	BIII	CIII

Fonte: adaptado de SINDUSCON (2009, p. 11).

Quanto maior for a porcentagem de absorção de água, mais poroso é o material analisado e, conseqüentemente, menor sua qualidade. A classe de absorção de uma cerâmica é que determina se esta é porcelanato, *grês*, *semigrês*, semiporoso e poroso, indicado na TAB. 7.

Tabela 7 – Classificação pelo grupo de absorção

Absorção de água (%)	Produto	Grupo de absorção
$Abs \leq 0,5$	Porcelanato	Quase nula
$0,5 < Abs \leq 3,0$	Grês	Baixa
$3,0 < Abs \leq 6,0$	Semigrês	Média
$6,0 < Abs \leq 10,0$	Semiporoso	Média Alta
$Abs > 10,0$	Poroso	Alta

Fonte: adaptado de SINDUSCON (2009, p. 12).

A expansão por umidade é o nome dado ao inchamento que acontece na cerâmica logo após a saída do forno, quando ela entra em contato com o meio ambiente ou após ter sido assentada. Esse fenômeno também é conhecido entre os ceramistas como “*moisture expansion*” ou dilatação higroscópica. A expansão por umidade de uma cerâmica deve ser menor ou igual a 0,6 mm/m, caso seja maior, além de provocar fissuras e/ou gretamento, também pode ocasionar o destacamento cerâmico, uma vez que a expansão da cerâmica será excessiva e, provavelmente, não será suportada pelas argamassas do sistema. A resistência à abrasão é definida como a resistência da placa cerâmica ao desgaste superficial do seu esmalte, causado pelo movimento de pessoas e/ou objetos, inerente, portanto, somente aos pisos. Essa resistência pode ser medida por meio de uma unidade conhecida como *Porcelan Enamel Institute* (PEI), sendo dividida em categorias de acordo com o destino de utilização da placa cerâmica (QUADROS 3 e 4).

Quadro 3 – Resistência à abrasão (PEI)

Abrasão	Resistência
Grupo 0	Baixíssima
Grupo 1- PEI-1	Baixa
Grupo 2-PEI-2	Média
Grupo 3-PEI-3	Média Alta
Grupo 4-PEI-4	Alta
Grupo 5-PEI-5	Altíssima e sem manchas após abrasão

Fonte: adaptado de SINDUSCON (2009, p. 13).

Quadro 4 – Aplicação conforme PEI

Índice	Classificação	Aplicação
PEI 0	-	Paredes (desaconselhável para pisos)
PEI 1	Baixo	Banheiros residenciais, quartos de dormir, etc.
PEI 2	Médio	Cômodos sem portas para o exterior e banheiros
PEI 3	Médio Alto	Cozinhas, corredores, <i>halls</i> e sacadas residenciais e quintais
PEI 4	Alto	Residências, garagens, lojas, bares, bancos, restaurantes, hospitais, hotéis e escritórios
PEI 5	Altíssimo	Residência, áreas públicas, <i>shoppings</i> , aeroportos, padarias e <i>fast-foods</i>

Fonte: adaptado de SINDUSCON (2009, p. 13).

De acordo com a NBR 13818 (ABNT, 1997c), a resistência ao manchamento indica a facilidade de remoção das manchas da superfície cerâmica, o que está diretamente relacionada à manutenção do revestimento. Essa propriedade possui a seguinte classificação:

Classe 5: máxima facilidade de remoção de mancha (água quente);

Classe 4: mancha removível com produto de limpeza fraco;

Classe 3: mancha removível com produto de limpeza forte;

Classe 2: mancha removível com ácido clorídrico, hidróxido de potássio e tricloroetileno;

Classe 1: Impossibilidade de remoção da mancha.

A resistência ao ataque de agentes químicos compreende a resistência do esmalte da placa cerâmica, quando em contato direto com os mais diferentes produtos químicos utilizados para a limpeza doméstica, para que o material assentado não seja danificado.

A mesma NBR 13818 (ABNT, 1997c) qualifica os revestimentos em classes, referente ao grau de resistência ao ataque químico após serem feitos os ensaios, na qual essa especificação deve usar um código constituído por três letras. A primeira, G ou U, é referente ao tipo de placa cerâmica, se esmaltada (*glazed*) ou não esmaltada (*unglazed*); seguida das letras H ou L, relativas à concentração de ácidos e álcalis; e a terceira letra referente às classes de resistências químicas A, B ou C, conforme mostrado no QUADRO 5. Portanto, a sequência do código é a seguinte: primeira letra: G ou U - esmaltada ou não esmaltada. Segunda letra: H ou L - alta ou baixa concentração de ácidos e álcalis. Terceira letra: classes de resistências químicas - A, B ou C - alta, média e baixa, respectivamente.

Quadro 5 – Classificação da resistência química

Agentes químicos		Níveis de resistência química		
		Alta (A)	Média (B)	Baixa (C)
Ácidos e álcalis	Alta concentração (H)	HA	HB	HC
	Baixa concentração (L)	LA	LB	LC
Produtos domésticos e de piscinas		A	B	C

Fonte: adaptado de SINDUSCON (2009, p. 14).

Alguns estudiosos recomendam que, para produtos cerâmicos de uso doméstico e que tenham contato com tratamentos de água, como no caso de piscinas, as placas cerâmicas devem possuir classe de resistência química maior ou igual a B. Para ácidos e bases de baixa concentração, é necessária a declaração da classe da placa pela empresa fabricante (BAUER, 2014; GASTALDINI; SICHIERI, 2007; NUNES, 2016; SINDUSCON, 2009).

2.7.2 Execução do revestimento cerâmico em alvenaria

Para que o revestimento cerâmico seja eficaz durante sua vida útil, é indispensável a atenção em todas as fases de execução. Recomenda-se a correta especificação de materiais, o emprego de mão de obra qualificada, assim como um projeto executivo a ser seguido. A base que irá receber o revestimento deve atender a alguns requisitos construtivos: a estrutura e a alvenaria devem estar finalizadas, a argamassa de regularização deve atender à NBR 7200 (ABNT, 1998) e à NBR 13749 (ABNT, 1996c), não deve exceder 3,0 cm de espessura, não deve conter em sua composição cimento ou gesso e deve estar finalizada com no mínimo 14 dias de cura em relação ao início da execução do revestimento. A superfície deve estar limpa, isenta de materiais que possam comprometer a aderência das placas cerâmicas, sem trincas, no esquadro, com planeza e com acabamento sarrafeado áspero. Orienta-se para que a superfície seja umedecida, sem saturação, em casos de locais com insolação e vento (BAUER, 2014; GASTALDINI; SICHIERI, 2007; NUNES, 2016; OLIVEIRA, 2017).

Os mesmos autores chamam a atenção para o fato de que algumas características do material ou da superfície podem influenciar o desempenho do sistema, como a rugosidade, pois ela interfere na aderência do sistema à base, na capacidade de absorção, já que a água presente na argamassa de emboço é parcialmente perdida para o ambiente e para a base, na presença ou não de materiais

contaminantes e na falta de planicidade das superfícies. Existem tolerâncias em relação às características geométricas do substrato, para que o revestimento desempenhe suas funções corretamente e ao mesmo tempo se evitem desperdícios de material e mão de obra. A especificação da argamassa colante adequada ao uso é de fundamental importância para o bom desempenho do sistema de revestimento cerâmico. As argamassas colantes devem atender à NBR 14081-1 (ABNT, 2012) que especifica os diversos parâmetros necessários ao seu desempenho, como resistência de aderência, cura, tempo em aberto e resistência ao deslizamento.

Outra variável que, segundo os mesmos autores, interfere no desempenho do revestimento cerâmico são as juntas de movimentação: juntas intermediárias, mais largas que as de assentamento, com a função de aliviar as tensões geradas pela movimentação da parede e do revestimento. A execução inadequada das juntas de assentamento pode originar patologias relacionadas à infiltração de água no sistema, ocasionando esforços na argamassa e na placa cerâmica resultantes de variação volumétrica por absorção de água, assim como possível formação de vapor d'água e eflorescências. A NBR 13754 (ABNT, 1996a) e a NBR 13755 (ABNT, 1996b) regulamentam as características das juntas para revestimentos cerâmicos.

Quando se executa corretamente todas as etapas correspondentes ao processo de assentamento do revestimento cerâmico em fachadas, este apresenta algumas vantagens, como a durabilidade (devido à sua composição química estável); a baixa higroscopicidade; o comportamento ininflamável; e o atendimento aos padrões de estética. Outra vantagem que só se percebe ao longo do tempo é o custo, pois este, quando comparado com uma pintura, não necessitará de manutenção onerosa, apenas de manutenção preventiva. Por se tratar, porém, de um sistema complexo, principalmente quando aliado a má execução de seus processos, o revestimento cerâmico pode apresentar desvantagens, como a dificuldade de reposição de peça em relação à tonalidade e dimensões; o aumento de resíduos na obra, devido ao índice de perdas para recortes ser elevado; e principalmente o surgimento de patologias (NUNES, 2016; OLIVEIRA, 2017).

2.7.3 Manifestações patológicas das edificações

A palavra “patologia” vem da junção de duas palavras gregas: *pathos* (sofrimento ou doença) e *logia* (estudo), ou seja, a patologia é um ramo da ciência que estuda as diferentes doenças, indicando suas causas e como se apresentam. Na área da Engenharia Civil a patologia nas edificações estuda todas as falhas de construção que, por algum motivo, surgem na edificação e prejudicam o seu correto funcionamento, seja ele estrutural, funcional ou estético. Diferentes autores, como Oliveira (2017), Bauer (2014), Silva, Viégas e Póvoas (2016) e Callister (2016) estudam as patologias das edificações e a descrevem como manifestações da construção civil, que ocorrem com o passar do tempo. Elas se manifestam por meio de trincas, manchas, descolamentos, eflorescências, corrosão de armaduras e deformações, entre outros, e podem acontecer em função de diferentes fenômenos, sendo a movimentação provocada por variações térmicas, uma das causas mais estudadas. Essas patologias estão relacionadas às propriedades físicas e à intensidade da variação da temperatura dos materiais utilizados. Ela acontece em função da junção de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica, sujeitos às mesmas variações de temperatura e à exposição de elementos a diferentes solicitações térmicas naturais.

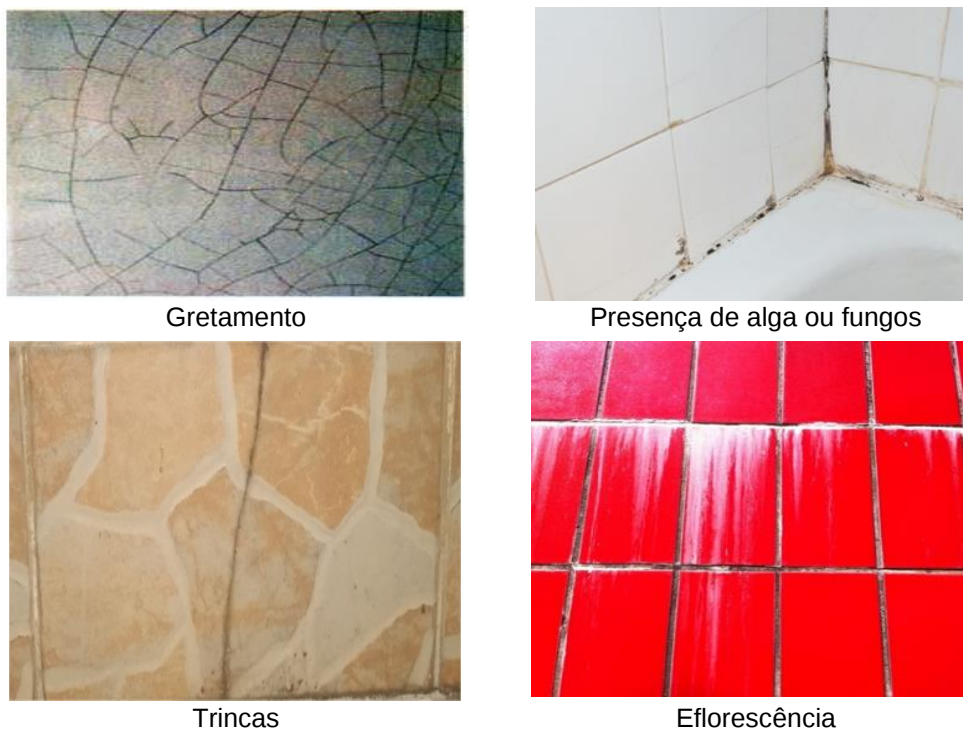
O surgimento de patologia nas edificações, além de comprometer a segurança dos usuários, gera produção de resíduos, custos de reparo e, principalmente, diminui a vida útil da edificação. Ferreira (2010) sugere que, mesmo em países onde os sistemas de construção são avançados, os custos relacionados à correção de patologias são altos. Na França, entre 1995 e 2006, os reparos de fachada atingiram cerca de 380.000.000 €. Em Portugal, cerca de 2% do custo total da obra são gastos no período de garantia (cinco anos após a construção). No Brasil, os custos relacionados à correção de defeitos nas estruturas são bastante significativos, chegando a ultrapassar o patamar de 40% em relação aos custos de execução de uma obra (BRIQUE, 2016).

As manifestações patológicas nos sistemas de revestimento cerâmico de fachada são caracterizadas pela deterioração de parte ou de todo o sistema e necessitam de atenção especial, sobretudo em função do risco que geram aos usuários, como o destacamento e queda de peças cerâmicas (BAUER, 2014; BRIQUE, 2016; NUNES, 2016; SILVA; VIÉGAS; PÓVOAS, 2016). Para esses

mesmos autores, entre as patologias que atingem os sistemas de revestimento cerâmico das edificações, as que mais se destacam são as patologias de fachada, como: gretamento, fungos/algas, trincas, eflorescência e os descolamentos. O gretamento corresponde à fissuração que acontece na camada superficial do esmalte da placa cerâmica e se desenvolve devido às diferenças na capacidade de absorver deformações entre a base da placa cerâmica e a camada de esmalte. Apresenta-se por meio do aparecimento de várias microfissuras em forma de círculos irregulares ou formando uma teia de aranha na superfície esmaltada da peça. A existência de fungos e algas acontece principalmente em razão da elevada porosidade da argamassa de rejunte, favorecendo a proliferação de micro-organismos. Não representa grave risco ao usuário, no entanto, resulta em uma estética comprometida, necessitando de manutenção periódica.

As trincas são rupturas que acontecem no corpo da peça cerâmica, que por esforço mecânico causa a separação de suas partes. As principais causas para o surgimento dessas manifestações são decorrentes da dilatação e retração do componente cerâmico em razão da variação térmica ou de umidade; da deformação estrutural excessiva, originando tensões não previstas na alvenaria; e da ausência de detalhes da construção, como vergas e contravergas, pingadeiras e juntas de movimentação dos revestimentos. A eflorescência corresponde aos depósitos cristalinos de cor branca que surgem na superfície do revestimento, resultantes da migração e posterior evaporação de soluções aquosas salinizadas. Os depósitos acontecem quando os sais solúveis nos componentes do sistema de revestimento cerâmico são transportados pela água utilizada na construção, na limpeza ou oriunda de infiltrações através dos poros dos componentes do revestimento (BAUER, 2014; BRIQUE, 2016). Exemplos dessas patologias são mostrados na FIG. 15.

Figura 15 – Patologias nos sistemas de revestimento cerâmico



Fonte: <https://www.performance.eco.br>, 2018.

O descolamento de peças é a patologia que suscita mais preocupação e que ocorre com mais frequência no sistema de revestimento cerâmico, representando aproximadamente 50% das anomalias verificadas em alguns países e 71% dos casos no Brasil (BRIQUE, 2016; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; NUNES, 2016). Em pesquisa de Silva, Viégas e Póvoas (2016) realizada nas edificações em Recife, no estado de Pernambuco, o descolamento do revestimento cerâmico teve mais ocorrência, alcançando 37%, seguido do bolor 30%, escurecimento de rejunte 19%, mancha de água 6%, destacamento de tinta 5% e efflorescência 3%.

Os descolamentos (FIG. 16), são caracterizados pela perda de aderência entre o tardo das peças e a argamassa colante ou ocorrem quando as tensões surgidas no revestimento cerâmico ultrapassam a capacidade de aderência das ligações entre a placa cerâmica e a argamassa colante e/ou o emboço. No início, a perda de adesão dá lugar a um espaço vazio que pode ser preenchido com ar ou água. O problema geralmente evolui para descolamento completo e consequente queda da cerâmica. Entretanto, especialmente se o distanciamento é provocado pela expansão térmica, podem-se observar cerâmicas empenadas/curvadas (BAUER, 2014; BRIQUE, 2016; EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2014; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; NUNES, 2016).

Figura 16 – Patologia de descolamento



Fonte: da autora.

As causas mais comuns para o descolamento das cerâmicas são a inexistência ou deficiência de projeto, ausência de juntas de movimentação, desconhecimento das características da argamassa, das placas cerâmicas e dos materiais utilizados nas juntas, uso de materiais inadequados, erros de execução em qualquer etapa do revestimento, não observância às normas técnicas e problemas de manutenção. O descolamento só pode ser detectado por contato e às vezes por métodos destrutivos (como método de percussão, teste de colisão de esfera, ultrassonografias ou retiradas). A técnica mais utilizada para identificar descolamentos em revestimentos cerâmicos é a técnica do som cavo.

A NBR 13755 (ABNT, 1996b) define, como uma das formas de verificar a aderência do revestimento, a percussão das placas cerâmicas com objeto não contundente. A presença do som cavo indica problema de aderência, que pode ser da placa à camada de regularização subjacente, desta ao chapisco ou do chapisco à base (alvenaria ou estrutura). Esse método é subjetivo, por depender da experiência e conhecimento do profissional. O diagnóstico de falhas e patologias é realizado por meio de ensaios específicos, que podem ser destrutivos ou não. Os primeiros causam danos à amostra, podendo inutilizá-la. Já os ensaios não destrutivos não comprometem a integridade ou a vida útil da amostra. Tendo em conta todos os inconvenientes e limitações associados aos ensaios destrutivos, torna-se necessário estudar métodos de inspeção não destrutivos, mais práticos e rápidos, capazes de detectar anomalias numa fase de estágio preliminar (EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2014; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; NUNES, 2016).

2.8 Ensaios não destrutivos

Ensaios não destrutivos - ou do inglês *Non Destructive Testing* (NDT) - não danificam o objeto em estudo e apresentam vantagens sobre os outros métodos tradicionais, que normalmente danificam o material. Suas principais vantagens são a possibilidade de realização *in loco*, rápida execução, baixo custo, repetitividade e possibilidade de acompanhamento sistemático do fenômeno. Contudo, eles requerem certos cuidados, pois exigem alto grau de conhecimento por parte do especialista ou profissional que o executa. Existem várias técnicas de ensaios não destrutivos disponíveis para a construção civil. Os mais utilizados são: ultrassom, esclerometria, resistividade elétrica, radioatividade, ressonância magnética nuclear e, atualmente, a termografia infravermelha (VALERO *et al.*, 2019).

A termografia infravermelha é uma técnica que vem sendo estudada por diferentes pesquisadores em todo o mundo, por permitir que grandes áreas sejam inspecionadas em tempo real. Seu uso contribui para avaliar as características térmicas dos materiais nas quais fenômenos de transferência de calor estão envolvidos. De acordo com Nunes (2016), a utilização de ensaios térmicos não destrutivos como a termografia no diagnóstico de edificações tem se tornado cada vez mais comum, por se tratar de um método rápido e que não necessita de contato direto com a estrutura, o que permite sua aplicação em diferentes campos, inclusive para manutenção e investigação das condições de edificações e a identificação precoce de patologias. Contudo, os especialistas recomendam que as informações obtidas por esses métodos sejam analisadas com cautela, levando-se em consideração cada método e o material estudado. Sugere-se que seja feita uma combinação de técnicas de ensaios não destrutivos, para mais assertividade e qualidade dos resultados (HUH *et al.*, 2016; LOPES, 2009; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; NUNES, 2016).

2.8.1 Termografia infravermelha

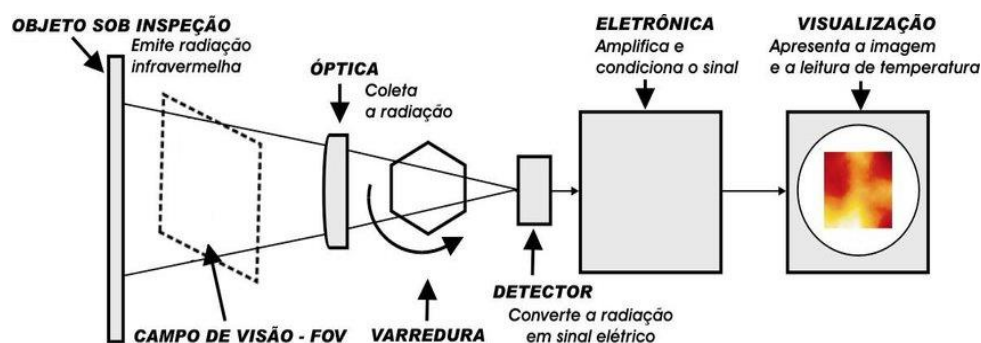
A história da termografia surgiu por volta de 1800, quando Willian Herschel (1738-1822) decompôs a luz solar por meio de um prisma, tendo como base as experiências de Isaac Newton. A evolução da técnica de termografia surgiu no período pós-guerra como principal meio de localizar e rastrear alvos noturnos a partir de imagens térmicas. O radiômetro foi uma evolução do sistema infravermelho que

possibilitou medição mais rápida em pontos determinados e em curtas distâncias. Somente nas décadas de 1970/80 a tecnologia de circuitos integrados viabilizou a fabricação de equipamentos mais leves e fáceis de transportar e manejar. A partir de então, a técnica para produção de equipamentos mais eficientes, com detectores mais ágeis e sensíveis vem evoluindo a cada dia (MEOLA; CARLOMAGNO, 2004).

A técnica ainda é considerada, em algumas áreas, como um método emergente no campo dos ensaios não destrutivos, apesar de se apresentar promissora para medição de temperatura de todos os tipos de materiais. Pelo seu caráter não invasivo, a termografia tem se mostrado uma alternativa para o diagnóstico de defeitos e identificação de anomalias ou falhas em materiais a partir da radiação infravermelha emitida por eles, o que pode ser de grande valia para o controle de elementos estruturais no campo da construção civil e para o estudo do conforto térmico. Além da velocidade de execução e a ausência de danos nas estruturas, a técnica permite que seja realizada repetidas vezes, possibilitando investigação mais abrangente e acompanhamento sistemático do elemento em estudo. Vários pesquisadores buscam conhecer melhor e aplicar a técnica: Castanedo (2005), Meola e Carlomagno (2004), Sales *et al.* (2017), Pedra (2011), Nunes (2016), Silva, Viégas e Póvoa (2016) e Brique (2016), entre outros. O conhecimento das condições de trabalho deve servir de guia para o estabelecimento de critérios de qualidade e de funcionamento, uma vez que os resultados são, na maioria das vezes, de caráter qualitativo e com significado indireto. Portanto, para os estudos é importante conhecer os equipamentos termográficos disponíveis bem como seu perfeito funcionamento.

Termocâmeras são equipamentos de detecção por varredura que utilizam um conjunto eletromecânico de espelhos e/ou prismas rotativos com os quais se faz a varredura da cena de interesse. Nessa configuração utiliza-se apenas um detector linear dotado basicamente de lente (óptica) que coleta a radiação no campo de varredura e a envia para um detector de radiação que capta a energia radiante na faixa do infravermelho e converte a radiação em um sinal elétrico e direciona para um amplificador eletrônico, que amplia o sinal por meio de um *software* e converte a leitura da temperatura em imagens térmicas ou termogramas (FIG. 17).

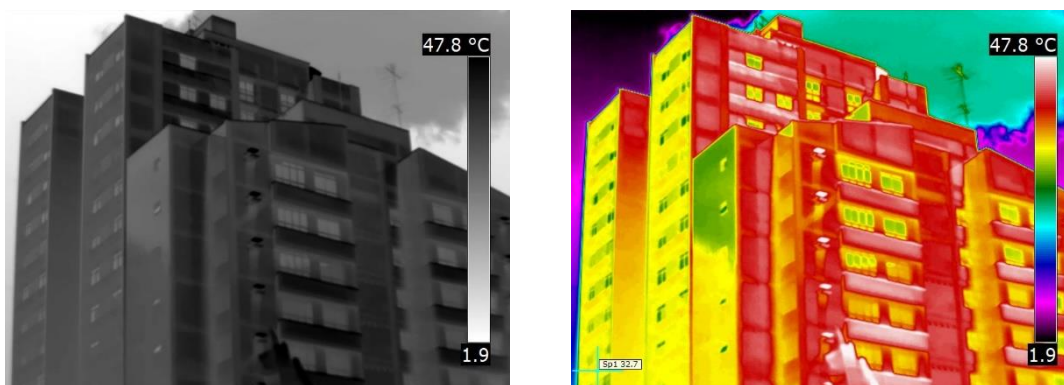
Figura 17 – Esquema simplificado de detecção por varredura



Fonte: Santos (2006, p. 54).

Os termogramas ou imagens térmicas podem ser trabalhados em *software* específicos e podem ser apresentadas em imagens com graduação de tons de cinza escuros/claros ou em uma escala de cores variadas, segundo os limites de temperatura em estudo. As análises podem ser feitas tomando-se como base a escala de temperatura do lado direito da imagem e relacionando-as às cores da imagem, como mostrado na FIG. 18.

Figura 18 – Imagem térmica de fachada



Paleta em tons de cinza

Paleta em cores variadas

Fonte: imagens gentilmente cedidas por Rosemary Bom Conselho Sales (2020), do seu acervo pessoal.

O conhecimento e o domínio da técnica podem auxiliar nas avaliações de perdas e/ou ganhos de calor e no comportamento dos elementos de construção. São várias as aplicações práticas da termografia, como: avaliar propriedades térmicas de fachadas e telhados, detecção e perdas de calor provenientes da falta de isolamento térmico ou danificado, focos de umidade, entre outras. Normalmente se utiliza a termografia em situações que envolvem diferenças de temperatura não visíveis ao

olho humano (LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017; MEOLA *et al.*, 2005; PEDRA, 2011; SALES *et al.*, 2017).

Dependendo da aplicação e dos objetivos desejados, a técnica de registro de imagens por termografia pode ser dividida em três segmentos: termografia qualitativa, quantitativa e analítica. Na termografia qualitativa, as informações obtidas sobre determinado material provêm da análise de diferenças em seus padrões de distribuição térmica. Na termografia quantitativa, as informações obtidas provêm da medição direta das temperaturas associadas aos padrões de distribuição térmica. Já a termografia analítica dedica-se à otimização de métodos de trabalho em inspeções, ao tratamento estatístico dos resultados obtidos e à tradução dos dados térmicos em termos econômicos e de aumento da qualidade. Quando se utilizam os sensores térmicos, a captação da radiação incidente é obtida a partir da estimulação, que promove o aquecimento ou resfriamento do objeto. Dependendo da forma como é feita essa estimulação, o método de ensaio é classificado em passivo e ativo (MALDAGUE, 2002; MEOLA; CARLOMAGNO, 2004; MEOLA *et al.*, 2005; VERATTI, 2011).

Esses mesmos autores citados anteriormente reconhecem que nos sistemas passivos nenhuma estimulação artificial é utilizada, devendo existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto em estudo e o meio no qual ele está inserido, que frequentemente está sob temperatura mais elevada. A análise qualitativa é feita por comparação com uma situação padrão, ficando os resultados sujeitos à experiência do avaliador. A análise pelo método passivo conta com as condições naturais da estrutura estudada e do seu entorno, sendo o calor do sol um fator determinante. Na termografia ativa, ao contrário da termografia passiva, um estímulo externo é necessário para gerar diferenças relevantes de temperatura. Em geral, sua aplicação se dá em casos em que se desejem resultados quantitativos. Na termografia ativa, diferentes técnicas de estimulação térmica podem ser empregadas para provocar um fluxo de calor no objeto estudado, cada qual com características e limitações próprias.

2.8.2 Termografia aplicada ao ambiente construído

O uso e as pesquisas que utilizam a termografia infravermelha aumentaram em todo o mundo. No Brasil, a técnica vem sendo cada vez mais empregada e estudada

para mensurar, avaliar ou analisar as características de superfícies em uma variedade de investigações que envolvem os fenômenos de transferência de calor. Estudos e aplicações práticas da termografia infravermelha estão sendo direcionados ao trato do *design* do conforto térmico do ambiente construído no que se refere à determinação das propriedades térmicas dos materiais de construção e à análise do comportamento térmico das envoltórias (BARBOSA *et al.*, 2018; PEDRA *et al.*, 2012; SALES *et al.*, 2014). Na literatura percebem-se os esforços de vários pesquisadores para conhecer e melhorar as estratégias de ensaio, buscando evoluir com a técnica e obter diagnóstico mais assertivo em diferentes setores que tanto influenciam no conforto térmico dentro dos ambientes e em especial no *design* do conforto térmico.

Edis, Flores-Colen e De Brito (2014) utilizaram a termográfica passiva para detectar problemas de umidade em fachadas com revestimento cerâmico, antes que ocorressem sinais visíveis. Desenvolveram pesquisa *in situ* para adaptar os procedimentos e utilizá-los em revestimentos cerâmicos vitrificados. Os resultados revelaram que a termografia passiva utilizando o aquecimento solar tem potencial e pode ser usada como técnica de inspeção preliminar para detectar umidade em revestimentos cerâmicos.

Testes laboratoriais e *in situ* foram realizados por Freitas, De Freitas e Barreira (2014) para avaliar descolamentos do reboco em fachada usando termografia infravermelha e comparados os resultados com simulação numérica. As patologias tornam-se visíveis pela ação da radiação solar ou em laboratório usando uma fonte de calor adicional, uma vez que criam uma camada de ar entre o reboco e a alvenaria. E isso causa resistência térmica, alterando a distribuição de temperatura nas áreas com anomalias.

Edis, Flores-Colen e De Brito (2015) adotaram abordagem semiquantitativa baseada em inspeção de fachadas de cerâmica onde a umidade já havia sido identificada. Foram estudados métodos quantitativos de subtração simples de imagem (*simple image subtraction*), fatoração matricial não negativa (*nonnegative matrix factorization*) e análise de componentes principais (*principal component analysis*). O teste de percussão e as medições de umidade da superfície foram técnicas auxiliares usadas. Os resultados mostraram que a abordagem semiquantitativa tem grande potencial em detectar alterações na umidade e também eliminar indicações falsas causadas por reflexos e sombras inevitáveis.

Análise paramétrica de paredes foi proposta por Albatici, Tonelli e Chiogna (2015) com diferentes tipologias e exposições, mas com as mesmas condições de contorno. O estudo propõe abordagem sistemática, com base em uma atividade de pesquisa realizada durante três anos em um edifício experimental onde as estruturas de madeira (leve) e tijolo (pesada) foram testadas simultaneamente por tomografia infravermelha. O estudo apurou que o método fornece bons resultados para construções pesadas, enquanto outras pesquisas ainda são necessárias para paredes leves e com isolamento.

Menezes, Gomes e Flores-Colen (2015) desenvolveram uma metodologia para inspeções *in situ* do desempenho em serviço de rebocos aplicados em paredes externas. Foram realizados três ensaios de diferentes tipos de processamentos e diferentes condições de serviço. Foram exibidas as vantagens do uso da inspeção visual e de técnicas *in situ* associadas. As técnicas foram usadas para avaliar o desempenho físico de rebocos e seu estado de deterioração. A metodologia permitiu identificar fatores que interferem nos resultados das técnicas selecionadas. Além disso, ficou evidente que existem vantagens na comparação cruzada de diferentes resultados, que em determinadas situações podem complementar a inspeção visual.

De acordo com Bauer *et al.* (2016), um dos principais problemas enfrentados para identificar e avaliar defeitos em fachadas por termografia infravermelha passiva é a definição do momento mais apropriado para a realização da inspeção. Os autores estudaram o comportamento do delta-t e defeitos induzidos em amostra para simular os problemas de descolamento que ocorrem em cerâmica de diferentes espessuras e com trincas de diferentes profundidades. As amostras foram avaliadas em laboratório durante ciclos de aquecimento direto e inverso. Os resultados mostraram que é possível detectar diferenças na profundidade das trincas considerando-se as funções delta-t e o contraste nos termogramas.

Estudo foi conduzido por Lourenço, Matias e Faria (2017) no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, sobre a capacidade da termografia infravermelha em detectar patologias de descolamento e umidade no sistema de revestimento cerâmico e o grau de influência das cores (preto e branco) das placas que compõem esse sistema. Compararam a um sistema de revestimento cerâmico íntegro, quando submetido à exposição da radiação solar e consequentes variações de temperaturas. Após análise dos termogramas, comprovou-se a capacidade da termografia em avaliar e detectar patologias e a

influência das cores sobre os diferenciais térmicos dos sistemas de revestimento cerâmico, porém não sendo possível avaliar o grau de desenvolvimento das patologias, o que sugere, portanto, que a técnica deve ser utilizada em conjunto com demais testes complementares.

Análise experimental teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da termografia infravermelha para detectar fuga de ar através da moldura de janelas, visto que na União Europeia os edifícios utilizam 40% do consumo total de energia e geram 36% de gases de efeito estufa (BARREIRA; ALMEIDA; MOREIRA, 2017). Os pesquisadores acreditam que a eficiência energética dos edifícios deve ser otimizada, o que requer, entre outros, a minimização de infiltrações nas fachadas.

Lucchi (2018) apresentou revisão da literatura sobre o uso da termografia infravermelha em inspeção de edifício e fez um apanhado histórico das técnicas mais utilizadas e emergentes. Salienta que a abordagem passiva é a mais comum para detectar defeitos termicamente significativos, existindo problemas e dificuldades como as fontes de erros. Também foram descritos os tipos de câmera, as vantagens e desvantagens, tendências futuras, potencial para inspeção energética de edifícios e avaliação do conforto humano.

Avanços, aplicações, métodos de medição, esquemas/tipos de análise, oportunidades práticas e futuras foram publicadas em revisão detalhada da literatura feita por Kiritat e Krejcar (2018). A termografia é vista nessa publicação como um método promissor para detectar alterações térmicas, vazamentos de ar, anormalidades de umidade, favorecer o cumprimento das exigências impostas pela Comissão Europeia de políticas energéticas, contribuindo para melhorar a eficiência energética dos edifícios.

O impacto combinado da transferência de calor e umidade na condutividade térmica do poliestireno usado como isolamento térmico para fachadas de edifícios foi demonstrado por Khouri (2018). Na condutividade térmica da envoltória das edificações, o valor-k do material é uma função complexa de muitos fatores, como temperatura, umidade e densidade. Obteve-se efeito combinado da temperatura operacional e do teor de umidade na condutividade térmica do poliestireno e seu impacto no desempenho energético dos edifícios. Os resultados revelaram que o valor-k do poliestireno é significativamente influenciado pelo seu teor de umidade em diferentes temperaturas de operação.

Bauer, Milhomem e Aidar (2018) desenvolveram estudo por simulação higrotérmica para compreender a dinâmica do fluxo de calor e auxiliar na interpretação de termogramas sob diferentes condições de aquecimento ou resfriamento. O estudo investiga o uso da termografia passiva quantitativa para medir o grau de dano de trincas na fachada de um edifício. As conclusões corroboram a importância da simulação higrotérmica como técnica de pré-termografia, o que possibilitou limitar o período de investigação com foco nos fenômenos de interesse.

A viabilidade do uso da termografia para a detecção de infiltrações em paredes internas foi investigada em laboratório por Santos, Rocha e Póvoas (2019). Foram construídos modelos de parede de alvenaria com diversas configurações de revestimento e inseriu-se uma tubulação danificada para simular vazamento. Os ensaios foram feitos após 2h, 48h e uma semana. Os resultados encontrados confirmam que a termografia pode ser eficaz na detecção da região que contém o foco da infiltração oculta, desde que o revestimento não seja impermeável.

Inspeção *in situ* de fachadas utilizando técnicas não destrutivas de termografia infravermelha e resistência elétrica para detectar umidade em edifícios históricos apurou que os dois métodos identificam as mesmas áreas de umidade. Além disso, são eficientes para obter resultados qualitativos rápidos, precisos e econômicos em estudos de monitoramento ou preservação do patrimônio histórico (VALERO *et al.*, 2019).

Fica evidenciado que na maioria desses estudos a análise é qualitativa e não se avaliou a influência dos materiais construtivos individualmente. Assim, esta pesquisa ressalta a análise da influência não somente das patologias e da cor do tardo (branco e vermelho) das placas cerâmicas, mas do sistema de revestimento que compõem as fachadas, levando-se em consideração o reboco e o sistema estrutural. Quando expostos ao aquecimento por radiação solar, como funcionam esses sistemas quanto à aquisição ou à transmissão do calor pela alvenaria e à consequente obtenção do conforto térmico no ambiente construído.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo experimental para identificação de patologias em revestimento cerâmico de fachada utilizando a termografia infravermelha tomou como base estudos como os de Lourenço, Matias e Faria (2017), Bauer, Milhomem e Aidar (2018), Lucchi (2018) e Valero *et al.* (2019), entre outros, que utilizaram a termografia infravermelha para detectar patologias em sistemas construtivos e fachadas.

Para os testes, utilizaram-se dois tipos de cerâmica, um de massa vermelha e outro de massa branca. Com o intuito de se avaliar se tal característica tem influência na detecção de patologias, empregaram-se nesta pesquisa cerâmicas de tardo vermelho e de tardo branco.

A parte experimental foi realizada na Escola de Design - Universidade do Estado de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos, nº 7.545, Bairro São Luís, região da Pampulha, em Belo Horizonte, MG.

Para o estudo, foram construídos quatro modelos (painéis) de cerâmica em uma edificação existente na área externa da escola de Design, sendo dois de tardo (massa) branco e dois de tardo vermelho. Dos quatro painéis, dois (um de tardo vermelho e um de tardo branco) receberam patologias de descolamento e de umidade e dois (um de tardo vermelho e um de tardo branco) serviram de referência. Visto que as variáveis climáticas como a umidade relativa do ar e os ventos atuantes podem interferir nos resultados de termografia (OLIVEIRA, 2006), foi feita no local dos testes uma análise do entorno imediato e do microclima. Tal avaliação teve como objetivo avaliar o local dos experimentos, o horário em que os raios solares melhor incidem sobre a fachada, direção dos ventos, entre outras, na estação do ano escolhida para o ensaio (outono). As etapas do trabalho experimental estão apresentadas na FIG. 19.

Figura 19 – Etapas do trabalho experimental



Fonte: da autora.

3.1 Material

Os materiais necessários para a construção dos painéis foram adquiridos no comércio de Belo Horizonte e parte da cerâmica foi doada por empresas do setor. Utilizou-se cerâmica com dois tipos de tardo (branco e vermelho), ambas do tipo *grês*, medindo 20 por 20 cm, acabamento acetinado e para uso em revestimento de fachadas externas.

Na FIG. 20 são apresentados os dois tipos de cerâmica utilizados, sendo a de tardo vermelho da marca Strufaldi®, com baixa absorção de água (Bib entre 0,5 e 3,0%), alta resistência à abrasão (PEI 5) e a ataques químicos (classe A). A cerâmica de tardo branco da marca Eliane¹¹, linha Decortiles® apresenta baixa absorção de água (Bib 0,5 a 3%), resistência à abrasão (PEI 5), a produtos químicos (classe A), aos raios ultravioletas e a fungos, conforme indicação dos fabricantes e dentro das exigências da NBR 13818 (ABNT, 1997c).

¹¹ Doada pela empresa Bel Lar Acabamentos.

Figura 20 – Placas cerâmicas utilizadas



Strufaldi (tardoz vermelho)

Cerâmica Decortiles (tardoz branco)

Fonte: da autora.

Para o assentamento, utilizou-se argamassa colante tipo AC II cor cinza, marca Precon®, indicada para assentamento de placas cerâmicas e azulejos em fachadas de peças com tamanho até 20 por 20 cm, conforme recomendação da NBR 14081-1 (ABNT, 2012). Foram usados espaçadores plásticos de 4 mm da marca Meikon® para o rejuntamento das placas, em obediência à recomendação do fabricante (FIG. 21).

Figura 21 – Materiais de assentamento



Argamassa colante Precon

Espaçador 4 mm Meikon

Fonte: da autora.

Para o rejuntamento das cerâmicas utilizou-se argamassa da marca Quartzolit® tipo flexível AC II, sem pigmentação e específica para rejunte. A argamassa é indicada pela NBR 14992 (ABNT, 2003) para revestimentos internos e externos de piso e parede. Utilizou-se espátula flexível para aplicação do rejunte da marca Rejunflex®

(FIG. 22). A água adotada para hidratar e preparar as argamassas colante e de rejuntamento foi da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

Figura 22 – Materiais de rejuntamento



Argamassa de rejuntamento e espátula

Fonte: da autora.

Para auxiliar na montagem dos painéis foi necessário adquirir alguns materiais de uso pessoal e necessários à preparação dos materiais e das patologias: luvas de borracha para segurança das mãos, caixa plástica para a mistura das argamassas com capacidade para 20 litros; balde plástico de 12 litros para transportar a água do preparo da argamassa; colher de pedreiro triangular para mistura e aplicação da argamassa; réguas de alumínio para demarcar a área de instalação e apoiar as placas cerâmicas; desempenadeira dentada de 6 mm para aplicação da argamassa; marreta de borracha para fixar as placas sobre a argamassa; seringa para injetar a água; e pedaços de feltro para simular as patologias de umidade (FIG. 23).

Figura 23 – Materiais utilizados para a montagem dos painéis



Fonte: da autora.

O instrumento utilizado no experimento para aferir a temperatura ambiente e velocidade dos ventos foi um termoanemômetro digital modelo TAN 100 da marca Incoterm^{®12} com faixa de medição de temperatura entre -30°C e 60°C, 0,4 m/s e 30 m/s (ou 1,44 km/h e 108 km/h) de velocidade do ar, precisão $\pm 3\%$ da leitura. Também foram utilizados: um termo-higrômetro digital modelo SH-122¹³ com faixa de medição de temperatura de -10°C e 70°C, umidade de 20 a 90% e precisão de $\pm 1\%$ na leitura da medição; um termopar tipo *T Agilent* 34970A com sistema de aquisição de dados digital para registrar as temperaturas superficiais; uma *Thermacam* da marca *Flir Systems*, modelo P640, com escala de temperatura de -40°C a 500°C e precisão de $\pm 2\%$ da leitura de medição; e uma trena para determinar as distâncias da câmera ao objeto de estudo (FIG, 24).

¹² Manual de instruções. Disponível em: <<http://www.incoterm.com.br/tecnica/termo+anemometro+digital+incoterm+tan100>>. Acesso em: 25 maio 2018.

¹³ Equipamento distribuído por PS Controles Industriais Ltda. Manual de instruções. Disponível em: <<https://www.fxbiometria.com.br/termo-higrometro-digital-com-cabo-extensor-1566-1-com-afericao-inmetro.html>>. Acesso em: 25 maio 2018.

Figura 24 – Equipamentos utilizados no experimento



Termoanemômetro



Termo-higrômetro



Termopar



Câmera de infravermelho
P640



Trena

Fonte: da autora.

Os equipamentos foram calibrados pelos fabricantes e foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais e pelos centros de Estudos em Design de Ambientes (CEDA) e Centro de Estudos em *Design* e Tecnologia (CEDtec), ambos da Escola de *Design* da Universidade do Estado de Minas Gerais.

Utilizou-se o *software ThermaCAM™ QuickReport 1.2* versão SP2-(2020) disponibilizado pela *Flir Systems* para as análises dos dados (termogramas). Os gráficos e tabelas foram produzidos pelos programas *Microsoft Word* e *Excel*.

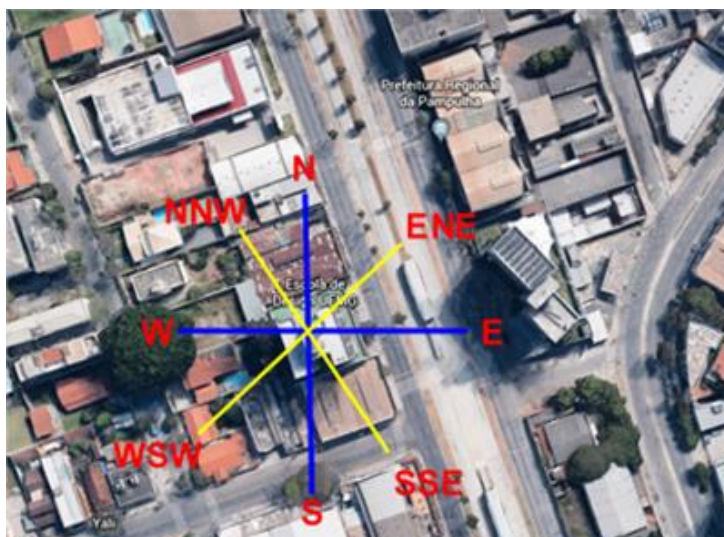
3.2 Métodos

Após definir o local de realização do experimento (edificação existente na área externa da Escola de *Design*, Av. Antônio Carlos nº 7.545, Pampulha, BH), foram feitas a análise e interpretação das variáveis climáticas atuantes do entorno imediato e microclima do local.

3.2.1 Variáveis climáticas

Para avaliar a direção dos ventos e a influência da altimetria das edificações no entorno, foi feito o estudo do clima para garantir que o local apresentasse as condições ideais de insolação e ventos para realização dos ensaios por tomografia. Na FIG. 25 mostra-se de forma esquemática a imagem do *Google Maps*, onde foi introduzida a rosa dos ventos com os quatro sentidos fundamentais ou pontos cardeais: Norte (0° de azimuth cartográfico), Sul (180°), Leste (90°), Oeste (270°) e os intermediários, que são os pontos colaterais: Nordeste (45°), Sudeste (135°), Noroeste (315°) e Sudoeste (225°).

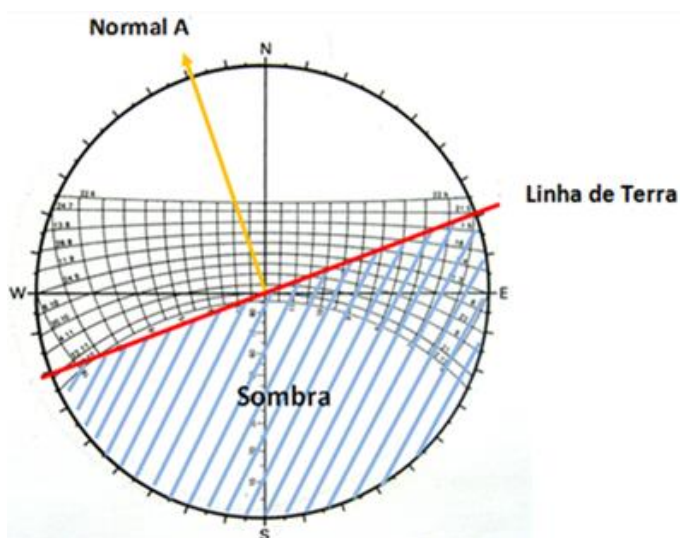
Figura 25 – Representação esquemática da rosa dos ventos



Fonte: adaptada de imagem de satélite, 2018.

A edificação está situada na direção Sudoeste (WSW), onde existem casas residenciais com altimetria média de 6 metros. Na lateral direita Sudeste (SSE) existem galpões com cerca de 10 metros de altura; na lateral esquerda Noroeste (NNW) os galpões possuem cerca de 15 metros de altura; na direção Nordeste (ENE) as construções são em torno de seis metros. Tomando como base os exemplos de Frota e Schiffer (2007), fez-se a análise da carta solar de Belo Horizonte da fachada escolhida (situada a noroeste – NNW), para entender o horário de incidência dos raios solares sobre a fachada na estação escolhida (outono), para a realização dos testes (FIG. 26).

Figura 26 – Carta solar de Belo Horizonte normal A 20° NNW



Fonte: adaptado de Frota e Schiffer (2007).

Na FIG. 27 mostram-se a direção e circulação de ventos no entorno da edificação escolhida para os testes, representada pelas setas verdes. Os ventos que correm na direção noroeste (NNW), quando alcançam a Av. Antônio Carlos são desviados pela maior altimetria das duas edificações situadas na esquina e por uma edificação que possui altura média de 36 metros situada em frente à Escola de Design (hotel). Outro corredor de ventos identificado é formado na Av. Antônio Carlos em frente à fachada sudeste (SSE). Nesse corredor os ventos correm suaves, devido à amplitude das 10 pistas da avenida e da altimetria mais homogênea das edificações, cerca de 10 metros, subindo na direção norte da região.

A topografia de aclave (desnível médio de três metros) não impede a circulação de ventos, uma vez que estes são desviados por cima das construções por causa de uma depressão na região. Percebem-se alguns prédios afastados do local, situados do lado contrário da avenida, mas que não impedem a circulação de ventos e não interferem no sombreamento, permitindo boa insolação da edificação.

Figura 27 – Circulação de ventos



Fonte: adaptado de imagem de satélite, 2018.

Verifica-se que as ruas do entorno são asfaltadas e as calçadas e as edificações da vizinhança são revestidas de material cimentício. Esses materiais de revestimentos possuem alta inércia térmica, o que potencializa a elevação da temperatura do local durante o dia. Soma-se a isso a pouca permeabilidade do solo, devido ao asfalto, o que provoca a baixa umidade relativa do ar no local, principalmente em dias mais quentes e secos. Percebe-se, contudo, que na parte posterior da edificação existem árvores de grande porte (FIG. 28), que formam uma barreira natural dos ventos, protegendo a área de estudo de ventos fortes, além de permitir melhor permeabilidade do solo e da evapotranspiração do entorno próximo do local dos testes.

Figura 28 – Árvores das edificações vizinhas



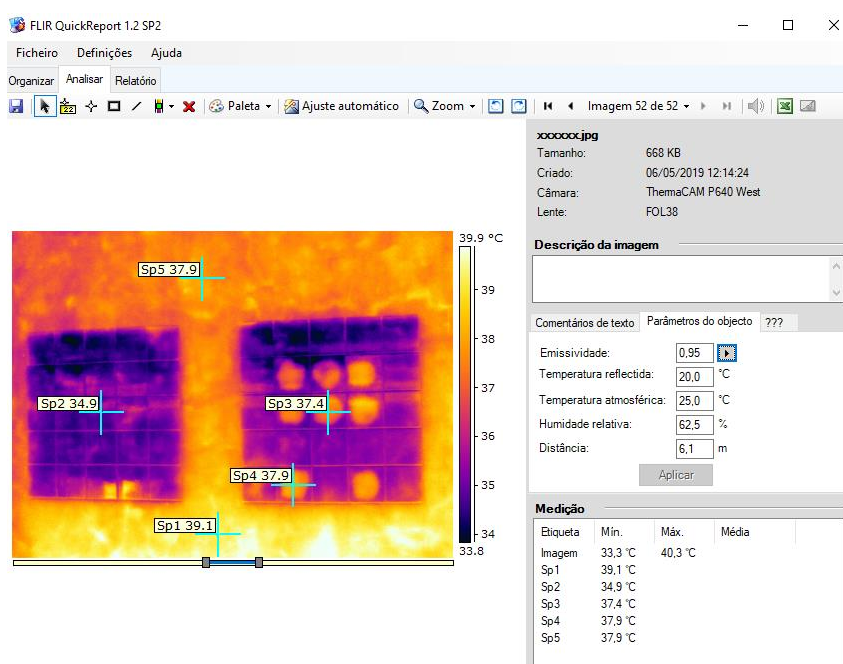
Fonte: da autora.

Os parâmetros relacionados às variáveis climáticas necessárias aos testes de termografia estão descritos a seguir, pois são necessários como dados de entrada na câmera termográfica durante os testes para informar a situação do microclima local nos dias dos ensaios.

3.2.2 Parâmetros de ajuste da câmera termográfica

Sempre que possível, devem-se levantar os parâmetros de ajuste da câmera termográfica, que são a emissividade, temperatura ambiente ou atmosférica, temperatura refletida, umidade relativa do ar e distância do objeto em estudo. Esses parâmetros são importantes tanto para ajuste da câmera como do *software* durante as análises dos resultados. Caso esses parâmetros não tenham sido ajustados durante os testes eles devem ser inseridos nas análises das imagens, como mostrado na tela do *software* *ThermaCAM™ QuickReport 2.1 AP2* (FIG. 29).

Figura 29 – Parâmetros de ajuste do *software* QuickReport



Fonte: imagens gentilmente cedidas por Rosemary Bom Conselho Sales (2020), do seu acervo pessoal.

Na tela aparecem as ferramentas disponíveis, como: salvar, definir pontos, área, linhas de perfil e paleta de cores, promover ajuste automático, além da interação direta do programa com o *Excel* para gerar gráficos e relatório a partir das imagens. Na lateral esquerda encontra-se a área de estudo onde aparecem os termogramas e

na lateral direita as informações relacionadas à imagem estudada. Existe um local para descrição da imagem, comentário de texto e local para inserir os parâmetros do objeto, que são a emissividade, temperatura refletida, temperatura atmosférica, umidade relativa, velocidade dos ventos e a distância do elemento em estudo. Logo abaixo dessas informações estão os valores de medição dos pontos marcados no termograma, com a possibilidade de se registrarem temperaturas mínimas, máximas e a média das medidas.

a. Determinação da emissividade do material

A emissividade é a capacidade que uma superfície possui de emitir radiação térmica quando comparada à de um corpo negro ($=1$). Esse fator depende do comprimento de onda, da direção de observação em relação à superfície e da temperatura do material (INCROPERA; DEWITT, 2014). A emissividade é, portanto, considerada um número adimensional, sempre inferior a 1,0 para corpos reais. Esse parâmetro é considerado por muitos autores como o mais importante para a inspeção de fachadas por termografia infravermelha, sobretudo para materiais com baixo valor, como é o caso das cerâmicas, visto que pequenas variações podem levar a grandes alterações nas temperaturas (BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018; EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2015; FREITAS; DE FREITAS; BARREIRA, 2014; LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017). Apesar de existirem tabelas com valores de emissividades, elas devem ser usadas apenas como referência, e sempre que possível a emissividade deve ser determinada (FLIR, 2015).

O método utilizado nesta pesquisa para determinação da emissividade foi o da “fita preta”, para tanto, uma fita isolante (*Scott Safety* - 3M) de emissividade conhecida (0,95) foi fixada sobre a superfície da placa cerâmica em estudo. A temperatura da fita deve ser igual à da superfície do objeto. O visor da câmera foi direcionado sobre a fita (na função ponto), onde se registrou o valor da temperatura da fita utilizando-se emissividade conhecida igual a 0,95. Em seguida, a fita foi retirada da placa cerâmica e, no mesmo local onde se encontrava, o valor da emissividade foi sendo variado nas configurações da câmera até conseguir igualar a temperatura da placa cerâmica à temperatura lida na fita preta.

b. Determinação da temperatura ambiente refletida

Caso a emissividade do material seja baixa ou a distância seja demasiado grande ou a temperatura do objeto seja relativamente próxima da ambiente, é importante regular e compensar corretamente a temperatura ambiente refletida, pois ela é um parâmetro utilizado para compensar a radiação refletida no objeto e a radiação emitida pela atmosfera entre a câmera e o objeto (FLIR, 2015). Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2016), para obter a temperatura refletida do local de medição é possível realizar uma verificação simplificada. Essa verificação pode ser executada com o auxílio de uma chapa de alumínio polido. Após ajustar a câmera com o valor da temperatura refletida igual a zero e com o valor de emissividade de 0,95, posiciona-se uma placa de alumínio no mesmo plano de medição e, por fim, captura-se a imagem em infravermelho. Devido à elevada reflexão e à baixa emissividade da placa de alumínio (0,04-0,06), o valor de temperatura observado nesse elemento será equivalente à temperatura refletida pelo entorno do plano de medição.

c. Determinação da temperatura ambiente

A determinação da temperatura ambiente também é um parâmetro importante, porque quando a temperatura ambiente é muito alta ou muito baixa, os sistemas de detecção de radiação infravermelha tornam-se menos estáveis. Barreira (2004) adverte que pequenas diferenças de temperatura não são percebidas pela termografia, recomendando que a temperatura da amostra em relação à temperatura ambiente esteja pelo menos com 1°C de diferença para que possa ser bem visualizada. Esse parâmetro serviu para que a termocâmera conseguisse fazer os ajustes relativos à emissão da radiação do objeto em estudo em relação ao ambiente. Para registrar a temperatura ambiente, dois instrumentos de medição foram usados: um termo-higrômetro e um termoanemômetro.

d. Determinação da umidade relativa do ar

Da mesma forma que a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar pode provocar distorções na temperatura superficial do elemento construtivo em estudo e influenciar nos resultados por termografia. Segundo a Organização Mundial da Saúde

(OMS, 2020), o nível ideal de umidade é entre 40 e 70%, e acima desses valores o ar fica saturado de vapor d'água, o que interfere no mecanismo de controle da temperatura. Para medir esse parâmetro, utilizou-se o termo-higrômetro.

e. Determinação da distância e ângulo da câmera

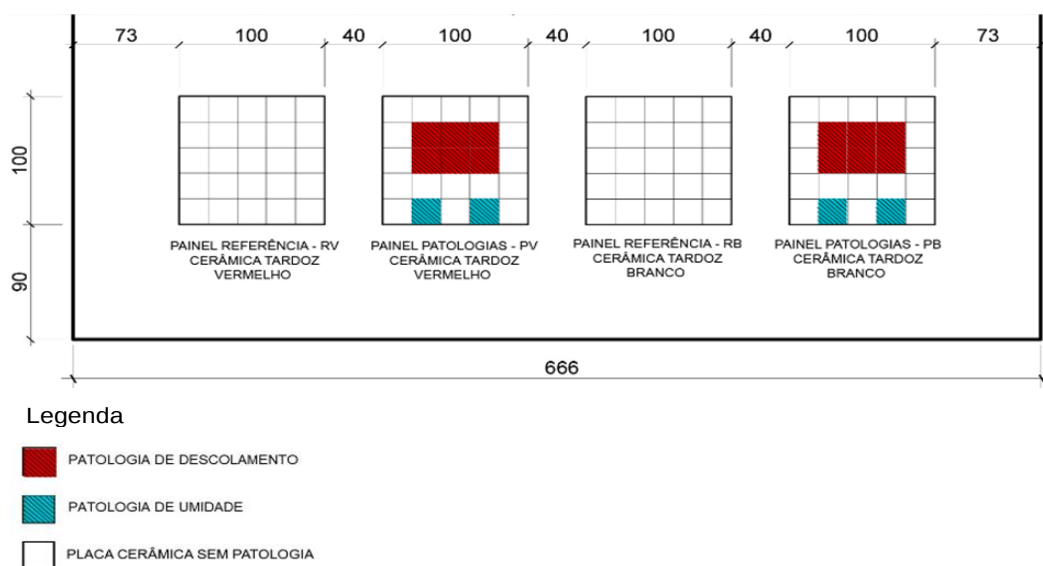
A distância e o ângulo da câmera em relação aos painéis são parâmetros que podem afetar a obtenção da imagem térmica, não só porque influenciam na atenuação atmosférica, mas também porque a resolução dos termogramas diminui com o afastamento e o ângulo entre o equipamento e o objeto. Cada ponto do termograma corresponde a uma área específica da superfície do objeto. Com o aumento da distância, uma área maior dessa superfície é captada pelo equipamento e o resultado é a média da radiação real emitida, perdendo-se os detalhes. Barreira (2004) aconselha que nas medições realizadas em distâncias maiores que 10 m os parâmetros de ajuste devem ser corrigidos.

Para facilitar o posicionamento da câmera no local, foi feita uma marcação no piso com um prumo e uma trena, e a partir desse ponto definiu-se uma angulação para ajustar o foco da câmera. Lourenço, Matias e Faria (2017) alertam que, em grandes distâncias, o alcance térmico da câmera é prejudicado e torna-se mais difícil visualizar pequenas diferenças térmicas. Os autores consideram ideal que um termograma seja tomado o mais próximo possível do alvo e com angulação o mais perpendicular possível em relação ao objeto para captar apenas as informações de sua superfície, não do ambiente, e com a melhor precisão possível.

3.2.3 Montagem dos painéis

Após o estudo das variáveis climáticas e dos parâmetros de ajuste da termocâmera, procedeu-se à definição de como seria a montagem dos painéis, conforme desenho esquemático da FIG. 30. Os desenhos tiveram a finalidade de informar a posição exata das patologias em cada painel. Para que houvesse o correto assentamento das placas cerâmicas e para garantir confiabilidade nas etapas de execução dos painéis, os procedimentos construtivos seguiram a determinação da NBR 7200 (ABNT, 1998) e da NBR 13755 (ABNT, 1996b).

Figura 30 – Identificações das patologias nos painéis



Fonte: da autora.

Com base nos desenhos, foi demarcado o local para montagem dos painéis na fachada da edificação escolhida. Foi necessário para a montagem dos painéis que a superfície existente fosse descascada e apicoada para remover-se completamente a camada de tinta que a cobria, permanecendo apenas o reboco firme da alvenaria (FIG. 31). Foram preparados os espaços para os quatro painéis de cerâmica (tardoz vermelho e branco), dois de referência e dois com as patologias de descolamento e umidade.

Figura 31 – Preparação da alvenaria para montagem dos painéis



Fonte: da autora.

a. Montagem do painel de tardoz vermelho (referência)

A montagem de cada painel foi realizada em duas etapas. Na primeira etapa, procedeu-se à limpeza da superfície da parede com uma trincha umedecida em água,

para retirar a poeira e qualquer sujeira que pudesse interferir no correto assentamento das placas cerâmicas (FIG. 32). Após a secagem da superfície, procedeu-se à mistura da argamassa colante, seguindo-se as instruções do fabricante. A argamassa foi colocada dentro da caixa plástica, em quantidade suficiente para assentamento das placas. Acrescentou-se água para homogeneizar com a colher de pedreiro e finalmente foi feita a limpeza do tardo das placas com pano seco.

Figura 32 – Preparação da alvenaria para montagem dos painéis



Limpeza da superfície da parede



Mistura da argamassa



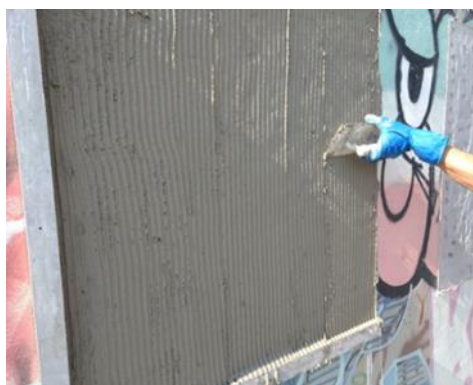
Limpeza do tardo das cerâmicas



Fonte: da autora.

Na segunda etapa, após a aplicação da argamassa sobre a superfície da fachada limpa e seca, foi efetuado o assentamento das placas cerâmicas. Com o auxílio da desempenadeira dentada a argamassa foi espalhada sobre a parede. As duas réguas de nível foram usadas para limitar a área do painel, e a marreta de borracha serviu para pressionar as placas sobre os cordões de argamassa. Os espaçadores foram colocados entre as placas para garantir a regularidade de espaçamento entre elas e posterior rejuntamento. Depois de 24 horas da fixação das placas cerâmicas no painel os espaçadores foram removidos e as cerâmicas foram limpas com pano úmido para remoção do excesso de argamassa de sua superfície (FIG. 33).

Figura 33 – Assentamento das placas cerâmicas



Aplicação da argamassa sobre alvenaria



Fixação das placas cerâmicas



Painel concluído com os espaçadores



Painel após limpeza

Fonte: da autora.

b. Montagem do painel de tardoiz branco (referência)

Seguiram-se as mesmas etapas do painel anterior para a montagem do painel de placas cerâmicas de tardoiz branco, finalizando-se, assim, os dois painéis de referência (FIG, 34).

Figura 34 – Finalização dos painéis de referência



Fonte: da autora.

c. Montagem do painel de tardo de vermelho (patologia)

Primeira etapa: após a aplicação da argamassa sobre a superfície da fachada com a desempenadeira dentada, as patologias foram introduzidas. As réguas de nível limitaram a área, e com a marreta de borracha as cerâmicas foram pressionadas sobre a argamassa. Os espaçadores foram utilizados para garantir a regularidade entre as peças antes do rejuntamento. Após 24 horas removeram-se os espaçadores e as placas foram limpas. Os procedimentos construtivos para a montagem dos painéis com patologia também seguiram os mesmos critérios de assentamento utilizados nos painéis de referência, conforme a NBR 7200 (ABNT, 1998) e NBR 13755 (ABNT, 1996b).

Segunda etapa: para simular a patologia de umidade foram utilizadas placas de feltro medindo 10 por 10 cm, conforme cálculo da área da placa cerâmica indicado por Lourenço, Matias e Faria (2017). O feltro foi usado na parte posterior das placas de cerâmica. Antes do assentamento o feltro foi submerso em água que estava à sombra para aclimatar e fixado no centro do tardo (FIG. 35). O objetivo do feltro é reter a água que será injetada com a seringa no momento do experimento para simular a umidade na cerâmica.

Figura 35 – Simulação da patologia de umidade



Feltros submersos em água



Feltro antes do assentamento

Fonte: da autora.

Para simular as patologias de descolamento, a parte central da argamassa de assentamento foi removida, deixando um espaço vazio de aproximadamente 2,5 mm

abaixo da cerâmica. Esse procedimento teve como objetivo simular o espaço vazio entre a placa e a alvenaria, para gerar uma camada de ar e simular a patologia (FIG. 36). Em seguida, houve a fixação das placas nos locais indicados no desenho esquemático de montagem.

Figura 36 – Inserção da patologia de descolamento



Fonte: da autora.

d. Montagem do painel de tardoiz branco (patologia)

Para montagem das patologias do painel de tardoiz branco seguiram-se as mesmas etapas anteriores dos procedimentos feitos para o painel de tardoiz vermelho, finalizando, assim, os quatro modelos.

e. Rejuntamento e acabamento dos painéis

Decorridas 72 horas da montagem dos painéis, aplicou-se o rejuntamento. Inicialmente foi feita a limpeza dos espaços e das juntas entre as placas cerâmicas para remoção do excesso de argamassa colante, poeira e partículas que pudessem prejudicar a aplicação do rejuntamento. Posteriormente à limpeza seguiu-se o preparo da argamassa de rejunte conforme instruções do fabricante, utilizando a caixa plástica para mistura do material com a água. O rejunte foi aplicado sobre os painéis com o auxílio da espátula emborrachada e decorridos 20 minutos os painéis foram limpos com pano umedecido para remoção do excesso de rejunte (FIG. 37).

Figura 37 – Rejuntamento e finalização dos painéis



Limpeza das juntas entre as placas cerâmicas



Aplicação da argamassa de rejuntamento



Finalização dos quatro painéis cerâmicos

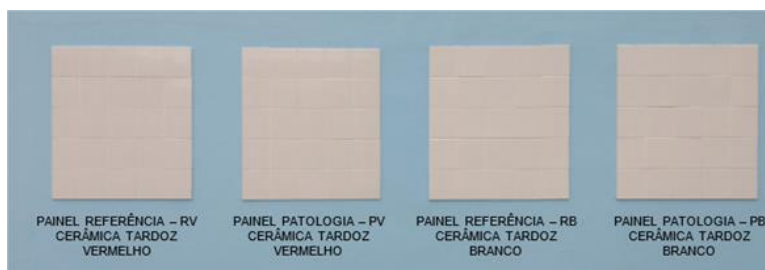
Fonte: da autora.

Depois de 28 dias de cura dos quatro painéis cerâmicos, a parede ao redor foi pintada na cor azul claro, para igualar a superfície e evitar interferências nas leituras termográficas (FIG. 38). Para facilitar a identificação e a diferenciação dos painéis de referência em relação aos painéis com patologia durante as análises dos resultados, eles foram nomeados por simbologia.

Figura 38 – Pintura da superfície da parede



Processo de pintura



Conclusão da pintura

Fonte: da autora.

Para os painéis foram adotadas as seguintes simbologias: (RV) painel de referência com tardez vermelho, (RB) painel de referência de tardez branco, (PV) painel de patologia com tardez vermelho, (PB) painel de patologia com tardez branco (QUADRO 6).

Quadro 6 – Identificação dos painéis (simbologia)

Simbologia	Tardez	Tipo do Pannel
RV	vermelho	Referência
RB	branco	
PV	vermelho	Patologia
PB	branco	

3.2.4 Procedimento experimental

O primeiro procedimento experimental foi preliminar e teve o intuito de avaliar as melhores condições de ensaio.

a. Ensaio preliminar

O ensaio preliminar teve como finalidade ambientar o pesquisador com o equipamento e ajustar as dificuldades que porventura surgissem durante os testes termográficos. Para a correta utilização da câmera termográfica foi preciso observar algumas recomendações importantes, como: ter cuidado ao manusear a câmera; conhecer as variáveis para o ajuste paramétrico da câmera; ajustar a posição da câmera o mais perpendicular possível em relação ao objeto em análise; ajustar o foco para melhorar a nitidez da imagem; atentar para a distância da câmera ao objeto (não ultrapassar a 10 metros), já que em uma distância muito grande a câmera não consegue ler corretamente a irradiação do objeto, entre outras necessidades que normalmente surgem durante os ensaios e devem ser atendidas.

O dia escolhido para o ensaio experimental foi 25/04/2019 e tomaram-se como referência os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com céu claro a parcialmente nublado, temperatura ambiente (mínima de 19°C e máxima de 31°C), umidade relativa do ar (mínima de 56% e máxima de 95%), ventos moderados com direção NE. Contudo, no dia do ensaio o céu amanheceu com bastante nebulosidade nas primeiras horas (FIG. 39).

Figura 39 – Céu com nebulosidade no dia do ensaio preliminar



Fonte: da autora.

A câmera termográfica foi posicionada a 6,10 m de distância dos painéis, com angulação de 15°, considerada adequada para a captura das duas imagens - painel de referência e painel com patologia. A água foi injetada com a seringa através do orifício deixado na junta de dilatação das placas cerâmicas para simular a patologia de umidade (60 ml). O volume de água seguiu o procedimento de Lourenço, Matias e Faria (2017) e teve como base o espaço vazio deixado sob as cerâmicas. A água permaneceu à sombra para aclimatar antes de ser injetada na placa (FIG. 40).

Figura 40 – Aclimação da água



Água aclimatando



Água a ser injetada

Fonte: da autora.

As medições tiveram início às 7:30 da manhã, sem a ação direta do sol (nas primeiras medições) e prosseguiram com intervalos de uma hora até às 11:30, horário em que terminou o ensaio preliminar.

Ao mesmo tempo em que se capturavam as imagens térmicas, foram registrados o valor da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar com o termo-higrômetro, e os valores de temperatura ambiente e velocidade dos ventos com o termoanemômetro. O termopar mediu os valores da temperatura superficial das placas cerâmicas (FIG. 41).

Figura 41 – Medição da temperatura superficial dos painéis



Fonte: da autora.

As medições foram realizadas empregando-se o método de termografia passiva, cuja radiação solar foi a principal fonte de aquecimento na superfície dos painéis (método de reflexão). Esse método foi o escolhido por ser considerado pela literatura o mais simples e indicado para a detecção de anomalias em revestimentos de fachadas (CASTANEDO, 2005; KIRIMTAT; KREJCAR, 2018; MALDAGUE, 2002; MENEZES, GOMES; FLORES-COLEN, 2015).

b. Ensaio termográfico

Após os ajustes detectados pelo ensaio preliminar, os ensaios termográficos foram realizados no dia 06/05/2019 (segunda-feira). Nesse dia o céu amanheceu claro

e com poucas nuvens (FIG. 42), temperatura ambiente (mínima 17°C e máxima de 30°C), umidade relativa do ar (mínima 40% e máxima de 85%), ventos fracos a moderados, com direção E-NE (Leste-Nordeste), dados fornecidos pelo INMET¹⁴.

Figura 42 – Céu claro no dia do experimento



Fonte: da autora.

Para simular a patologia de umidade, foram injetados 60 mL de água com seringa. As medições iniciaram-se às 7:30 horas, sem a ação direta do sol sobre os painéis e prosseguiram com intervalos de uma hora até o seu término, às 21:30h. A cada medição utilizou-se o termo-higrômetro para obter valores da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar. O termoanemômetro obteve os valores de temperatura ambiente e velocidade dos ventos e o termopar mediu os valores da temperatura superficial das placas cerâmicas. Após as medições, as imagens capturadas pela termocâmera foram analisadas pelo *software Quick Report 1.2*, e os dados relativos aos equipamentos auxiliares são apresentados nos resultados em forma de tabelas e gráficos gerados pelo sistema *Microsoft Word e Excel*.

¹⁴ Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo2/previsaoPorTipo2&type=capitais>>. Acesso em: 06 maio 2019.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados na mesma ordem em que foram descritos os métodos da pesquisa: levantamento das variáveis climáticas, parâmetros de ajuste da câmera, ensaios preliminares, ensaios termográficos e a análise dos resultados.

4.1 Variáveis climáticas

A estação do ano escolhida foi o outono, por ser ter pouca nebulosidade, ventos moderados e ampla incidência solar. O estudo do clima local apresentou as condições de insolação e ventos no local do ensaio. A carta solar de Belo Horizonte (FIG. 26) mostra que sobre a fachada “normal A” - situada a 20º noroeste, no período do outono, o local apresenta boas condições climáticas para captura das imagens térmicas, devido ao amplo horário de incidência solar: das 8:30 até as 18 horas (no pôr do sol).

Na TAB. 8 são apresentados os valores das variáveis climáticas medidas durante o ensaio com o termo-higrômetro e termoanemômetro, sendo elas: temperatura ambiente, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos. Nota-se que os valores referentes à temperatura ambiente registrados nos dois equipamentos são muito semelhantes. As máximas foram 33,2°C e 33,3°C, um pouco acima da prevista pelo INMET, sendo a média do dia 28,9°C e 27,9°C, ficando dentro dos parâmetros previstos, que foi de 30°C.

A umidade relativa do ar registrou valores médios de 62,5%, o que, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2020), é o ideal para a saúde humana. Esse valor é também considerado por Lamberts, Dutra e Pereira (2016) como favorável ao ensaio, pois maior quantidade de partículas de água em suspensão na atmosfera age como barreira térmica que impede que os painéis cerâmicos e a alvenaria percam o calor armazenado. O valor médio está dentro do previsto pelo INMET, que foi de 40 a 85%.

A velocidade dos ventos aferidas durante o experimento foi em média de 0,6 m/s, considerado por Frota e Schiffer (2007) como muito fraco a fraco e ficaram muito próximos do previsto pelo INMET - ventos moderados com direção NE. Tal condição é adequada ao ensaio, segundo estudo de Oliveira (2006), que indica que a alta velocidade dos ventos diminui as variações de comportamento térmico dos materiais e, com isso, pode mascarar o desempenho térmico dos painéis instalados.

Tabela 8 – Variáveis climáticas medidas

Hora	TERMO-HIGRÔMETRO		TERMOANEMÔMETRO	
	Temperatura Ambiente °C	Umidade Relativa do ar %	Temperatura Ambiente °C	Velocidade dos ventos m/s
07:30	22,1	67,0	22,4	1,2
08:30	24,3	72,0	24,3	1,4
09:30	26,2	64,0	25,8	0,3
10:30	30,8	57,0	30,7	0,5
11:30	31,2	57,0	31,4	1,7
12:30	33,1	63,0	33,0	0,2
13:30	33,2	65,0	33,3	0,5
14:30	32,2	51,0	32,3	1,5
15:30	31,8	49,0	31,6	0,0
16:30	27,3	60,0	27,4	1,7
17:30	27,0	62,0	26,8	0,0
18:30	26,3	62,0	26,0	0,7
19:30	26,1	71,0	25,5	0,0
20:30	25,4	66,0	24,9	0,1
21:30	24,4	72,0	23,9	0,0
Valores médios	28,9	62,5	27,9	0,6

Na TAB. 9 são apresentados os valores das temperaturas captadas pelos termopares nos diferentes painéis. Essas medições tiveram como objetivo validar os valores que seriam medidos pela termocâmera, uma vez que o termopar mede a temperatura superficial do material por contato direto entre equipamento e objeto, enquanto a termocâmera mede as temperaturas a certa distância, podendo sofrer interferência das variáveis climáticas atuantes. Interessante notar que a temperatura lida pelo termopar é sempre a mesma para todos os painéis, independentemente do tipo de tardo ou de haver ou não patologias. Isso pode estar relacionado à precisão do equipamento (de $\pm 2\%$ da leitura de medição). Esse valor pode ser comparado aos valores obtidos pela termocâmera, contribuindo para melhor análise dos resultados obtidos (LOURENÇO; MATIAS; FARIA, 2017).

Tabela 9 – Temperaturas superficiais aferidas pelo termopar

Hora	Temperatura lida pelo termopar - °C			
	Painel RV	Painel PV	Painel RB	Painel PB
07:30	23,0	23,0	23,0	23,0
08:30	25,0	25,0	25,0	25,0
09:30	27,0	27,0	27,0	27,0
10:30	30,0	30,0	30,0	30,0
11:30	32,0	32,0	32,0	32,0
12:30	36,0	36,0	36,0	36,0
13:30	34,0	34,0	34,0	34,0
14:30	33,0	33,0	33,0	33,0
15:30	31,0	31,0	31,0	31,0
16:30	29,0	29,0	29,0	29,0
17:30	28,0	28,0	28,0	28,0
18:30	27,0	27,0	27,0	27,0
19:30	26,0	26,0	26,0	26,0
20:30	25,0	25,0	25,0	25,0
21:30	24,0	24,0	24,0	24,0

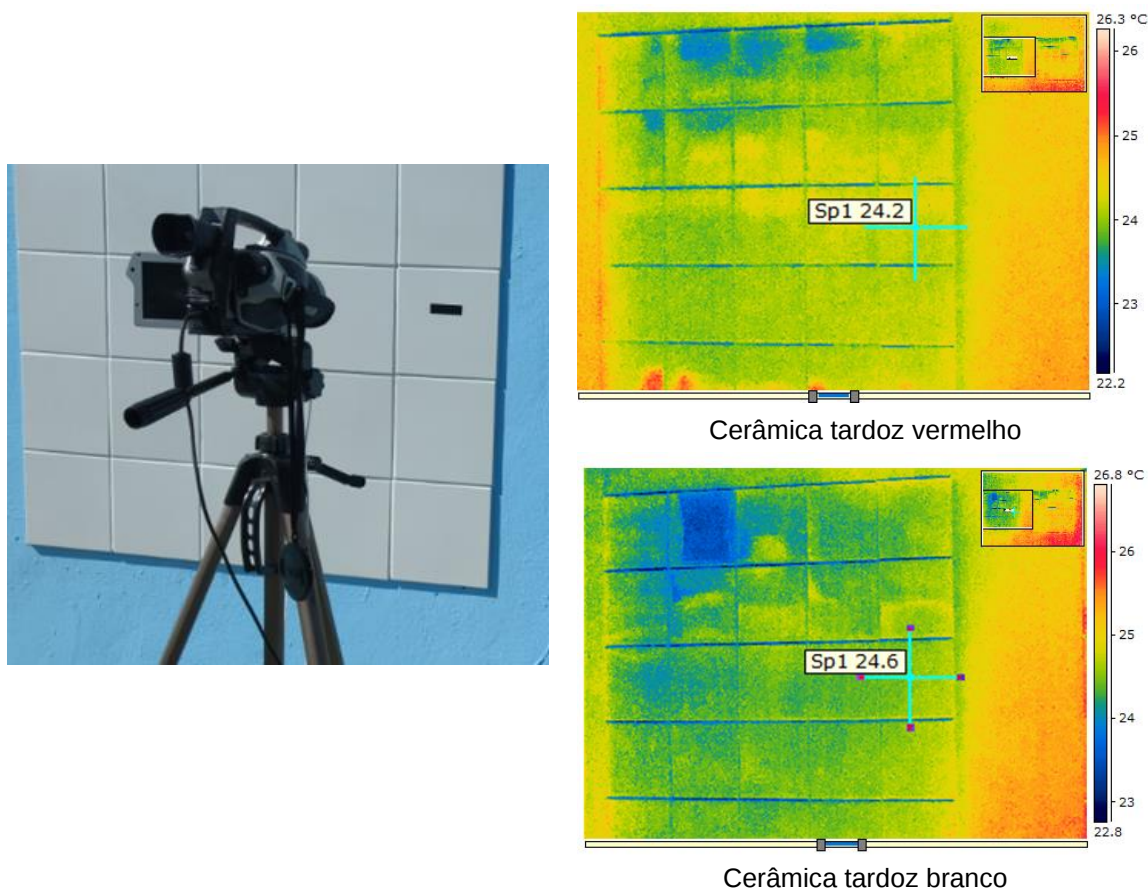
4.2 Parâmetros de ajuste da câmera termográfica

Os parâmetros foram levantados para serem introduzidos na câmera e também no *software* para análises das imagens. Os parâmetros de ensaio são importantes, pois influenciam no valor de temperatura indicado pela termocâmera.

4.2.1 Emissividade

A determinação da emissividade permitiu aprofundar o conhecimento sobre emitância e sobre os métodos para determiná-la. O método utilizado nesta pesquisa foi o da “fita preta”. Inicialmente, mediu-se a temperatura superficial na região da fita isolante sobre cada cerâmica, obtendo-se a temperatura 24,2°C na cerâmica de tardo branco e 24,6°C na de tardo vermelho. Em seguida, fez-se uma medição com a câmera apontada na região do revestimento sem a fita isolante (FIG. 43). Foi-se alterando o valor de emissividade na câmera até obter-se o mesmo valor de temperatura da zona com fita isolante. Ao utilizar o valor de 0,95, a câmera termográfica mediu as temperaturas de 24,2 e 24,6°C, mesma temperatura do revestimento com fita isolante. Assim, esse valor de emissividade é o dos dois tipos de revestimento, sendo este utilizado para os ensaios.

Figura 43 – Determinação da emissividade: método da fita preta



Fonte: da autora.

4.2.2 Temperatura ambiente refletida

Neste estudo utilizou-se a temperatura refletida de 20°C para ambas as cerâmicas, visto que a emissividade registrada foi alta (0,95) e a distância da câmera até o objeto (6,10 m) não exigiu correção da radiação solar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

4.2.3 Temperatura ambiente

Como os valores referentes à temperatura ambiente registrados nos dois equipamentos (TAB. 8) foram muito semelhantes, neste estudo adotou-se a temperatura de 25°C para ajuste dos parâmetros da câmera e do *software*.

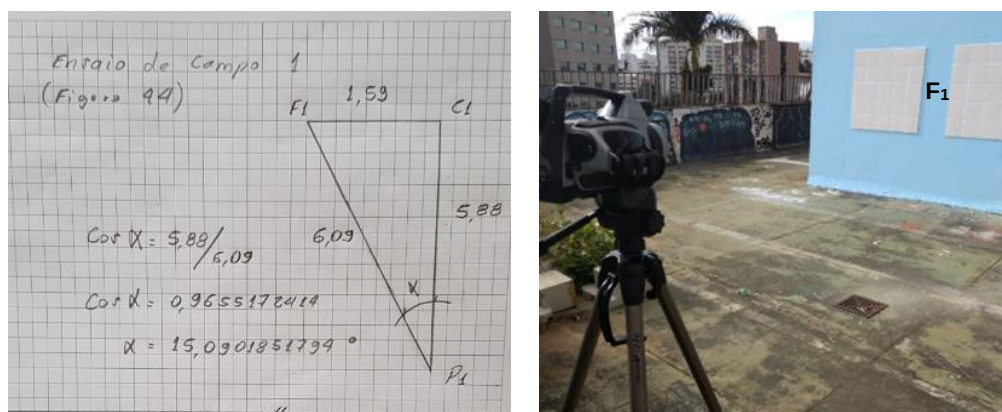
4.2.4 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar utilizada foi a média das medidas lidas pelo termohigrômetro 62,5% (TAB. 8), sendo essa medida considerada por Lamberts, Dutra e Pereira (2016) como ideal, visto que maior quantidade de água em suspensão na atmosfera impede que a alvenaria perca o calor armazenado.

4.2.5 Distância e ângulo da câmera

Inicialmente definiu-se uma distância de 5,88 m perpendicular ao eixo dos quatro painéis (P_1 e C_1) e um ângulo de 15° em relação ao centro do conjunto de painéis de cada tipo de cerâmica (F_1). Obteve-se, assim, a distância focal de 6,09 m em relação ao centro dos painéis, como ilustrado na FIG. 44. Para se obter a medição dos outros dois painéis o ângulo foi espelhado a partir de P_1 e C_1 , atingindo-se o centro dos outros dois painéis.

Figura 44 – Marcação e posicionamento da termocâmera



Posicionamento e angulação da câmera

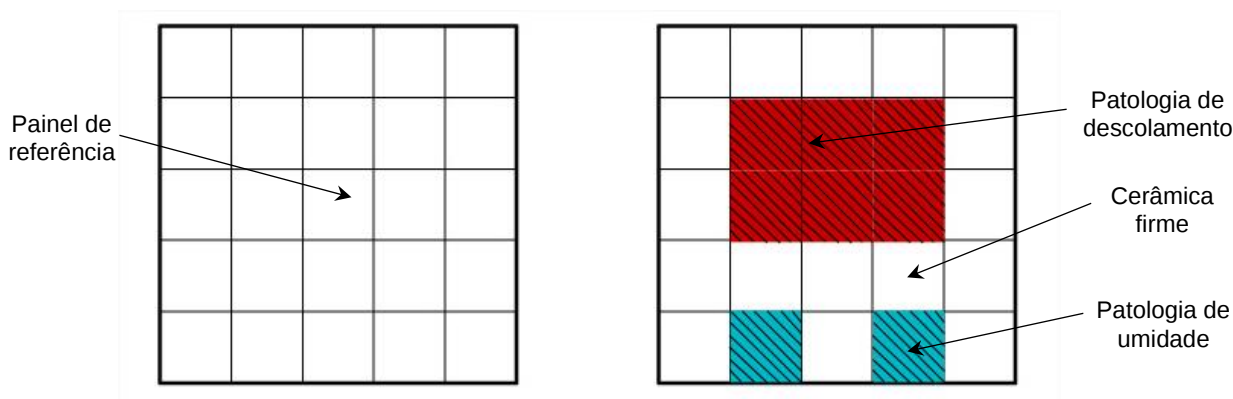
Fonte: cálculo realizado e cedido pelo professor Marcelo Amianti (doutorando do PPGD) e imagem da autora.

4.3 Ensaio preliminar

Os painéis em estudo foram locados sempre na mesma posição, sendo os de referência, tanto o de tardoaz vermelho (RV) como o tardoaz branco (RB), posicionados à esquerda dos termogramas e os painéis com patologia (tardoaz vermelho (PV) e tardoaz branco (PB) sempre à direita. Lourenço, Matias e Faria (2017), Bauer *et al.*

(2016) e Barreira, Almeida e Delgado (2016), citando alguns, salientam que a precisão da localização é importante para não confundir as patologias estudadas com outras interferências detectadas pela termografia. Portanto, para acompanhar as análises foi feito o reconhecimento da localização das patologias (FIG. 45), de forma a se ter com precisão sua real posição nos painéis e nos termogramas.

Figura 45 – Localização esquemática das patologias nos painéis

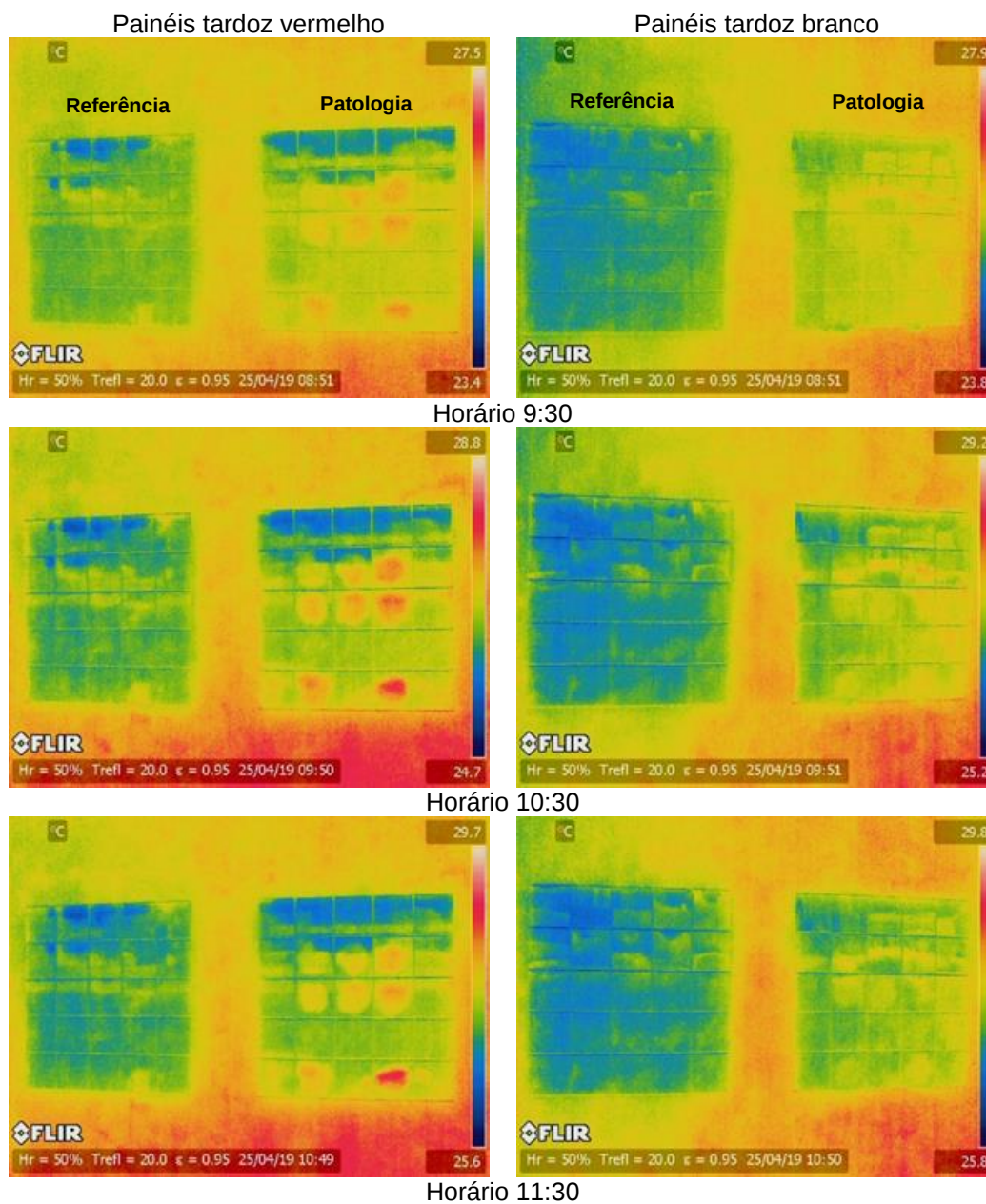


Fonte: da autora.

O dia do ensaio (25/04/2019) amanheceu com o céu nublado. Na FIG. 46 podem ser vistos os termogramas, obtidos por termografia passiva (ângulo de 15°, distância de 5,88 m da câmera) realizados às 09:30h, 10:30h e 11:30h.

No início dos ensaios percebeu-se que as imagens não estavam bem definidas nos painéis de tardoiz branco dispostos à direita da montagem, provavelmente devido ao ângulo de posicionamento da câmera e às condições de nebulosidade. Contudo, as patologias estão bem definidas nos painéis da esquerda de tardoiz vermelho. A menor incidência solar permite, em alguns casos, realizar os experimentos, mas apenas as radiações refletidas e difusas chegam ao objeto, o que não seria o ideal para a proposta desta pesquisa, que requer insolação intensa. Os ventos estavam relativamente fortes, o que poderia interferir nos resultados, associado à alta nebulosidade, prejudicando a visibilização das patologias nos painéis de tardoiz branco (OLIVEIRA, 2006).

Figura 46 – Teste preliminar termogramas



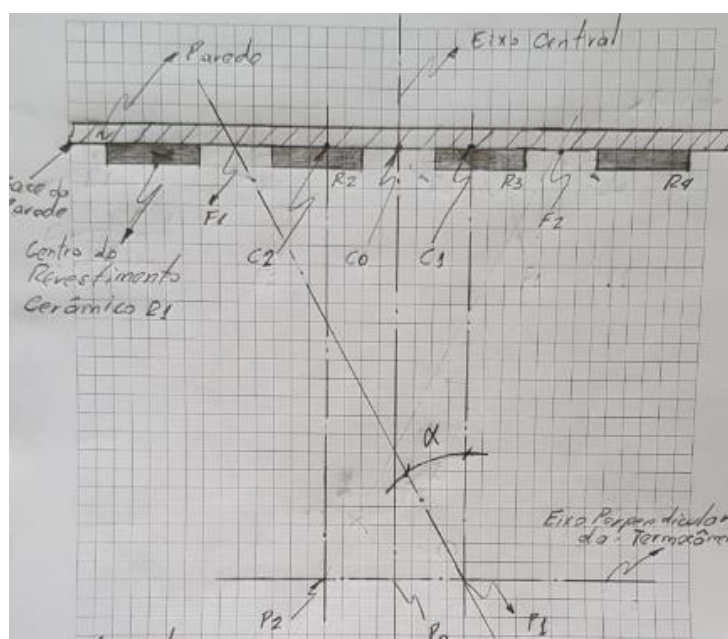
Fonte: da autora.

Após os resultados do ensaio preliminar, foram feitos novos cálculos para a angulação entre a câmera e o eixo dos painéis, buscando-se capturar as imagens com a menor distorção possível em relação à lente do equipamento (APÊNDICE A). Com o novo ângulo definido em relação ao eixo central dos painéis, foi escolhida a nova data para a realização do experimento termográfico definitivo.

4.4 Ensaio termográfico

Os testes termográficos foram realizados no dia 06/05/2019, com céu claro e poucas nuvens, o que indica um dia com bastante incidência solar. Conforme mostrado no croqui da FIG. 47, os testes termográficos seguiram o mesmo procedimento do teste preliminar. Definiu-se uma nova distância de 5,70 m perpendicular aos painéis, porém se deslocou a câmera do eixo dos painéis 58 cm para a esquerda e para a direita e definiram-se os pontos P_1 e P_2 para o posicionamento da câmera. A partir desses pontos definiram-se F_1 e F_2 como a distância focal de leitura de 6,10 m e ângulo de 21° em relação ao centro do conjunto de painéis de cada tipo de cerâmica (APÊNDICE A).

Figura 47 – Marcação e posicionamento da termocâmera



Posicionamento e angulação da câmera

Fonte: cálculo realizado e cedido pelo professor Marcelo Amianti (doutorando do PPGD).

Posteriormente aos ajustes e ao posicionamento da câmera no local de ensaio, iniciaram-se as medições às 7:30 da manhã antes da incidência solar, e novas imagens foram geradas a cada hora até sua última medição, às 21:30. Ao mesmo tempo, registraram-se os valores das variáveis climáticas com o termo-higrômetro e termoanemômetro e a temperatura superficial dos painéis com o termopar. O teste teve duração de 14 horas e foram registrados 30 termogramas.

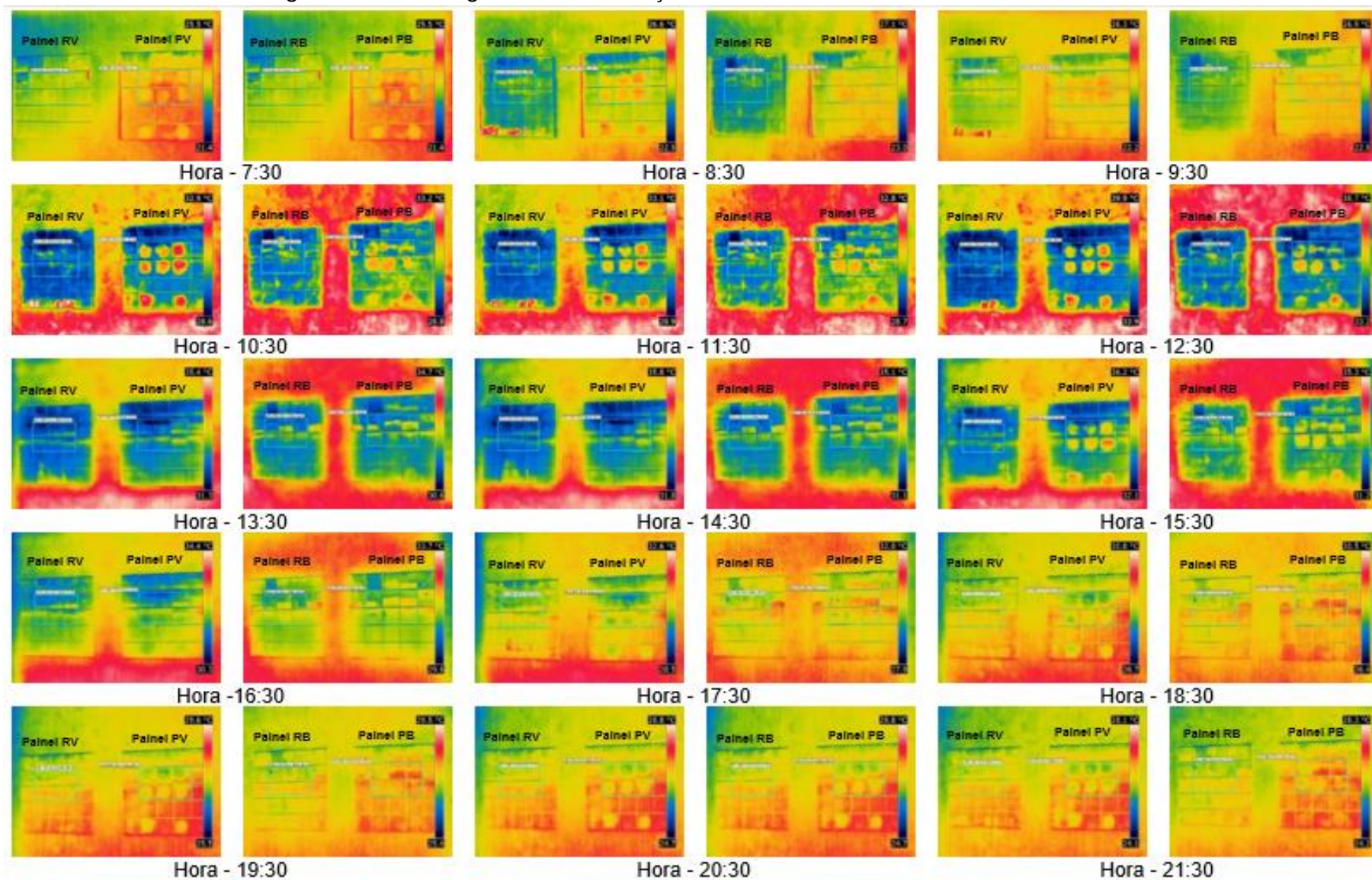
Na FIG. 48 exibe-se a sequência dos 30 termogramas registrados durante o mesmo dia, e as variações térmicas foram registradas e apresentadas de acordo com cada painel estudado. A escala de cores do lado direito dos termogramas permitiu diferenciar qualitativamente as temperaturas, sendo os tons azulados correspondentes às temperaturas mais baixas e os tons vermelho esbranquiçado às temperaturas mais altas.

Antes da incidência solar sobre os painéis (7:30h da manhã) foi feita a primeira imagem termográfica, sendo a temperatura ambiente de 22,1°C. A cada hora de insolação foram feitos novos termogramas (dois tipos de tardo cerâmicos, quatro painéis, duas situações apresentadas). A temperatura mais alta foi registrada às 13:30h da tarde, com temperatura ambiente de 33,2°C. E a última imagem foi realizada durante a noite, às 21:30h, com temperatura ambiente de 24,4°C, sendo esse período o de resfriamento da temperatura ambiente e dos materiais.

De forma qualitativa, é possível observar a evolução da temperatura ao longo do dia, mesmo no período da manhã, sem incidência solar. Nesta análise, tanto as patologias de descolamento (área central do painel) quanto as de umidade (parte inferior do painel) apareceram de forma clara na maioria dos termogramas. Às 13:30h e 14:30h não foi possível identificá-las, talvez em função de ventos mais fortes associados ou da nebulosidade dispersa que reduziu a incidência solar no momento da medição (OLIVEIRA, 2006).

Os locais onde estavam situadas as patologias apareceram em tons avermelhados, indicando que a temperatura era mais alta naqueles locais devido às patologias, que apresentaram, nesse caso, condutividade térmica diferente, sendo a água mais condutora que o ar (INCROPERA; DEWITT, 2014). Tanto a patologia de descolamento quanto a de umidade manifestaram comportamento bastante semelhante quando expostas à insolação intensa. Isso dificultaria a correta identificação se não houvesse o projeto de localização de cada tipo de patologia. Acredita-se que a baixa aderência não pode ser detectada com a termografia, somente se a falha de contato gerar uma temperatura mais alta naquele local (BRIQUE, 2016; NUNES, 2016).

Figura 48 – Termogramas das medições realizadas durante o ensaio

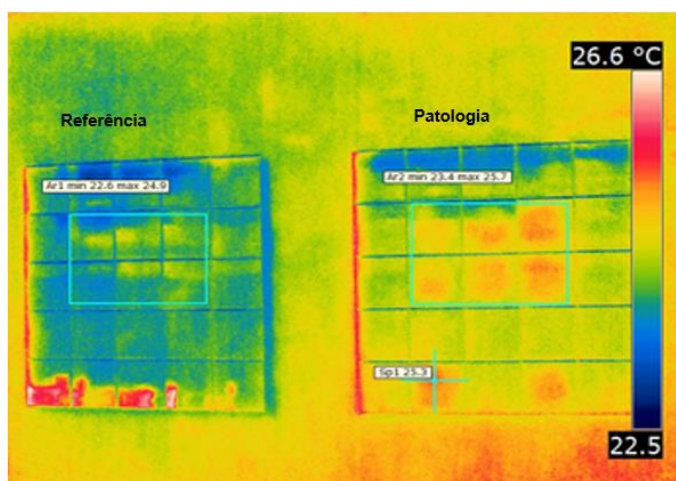


Fonte: da autora.

Quando as temperaturas são mais altas (de 10:30 às 15:30h), as superfícies dos painéis sem patologias apresentam tons azul-esverdeado, indicando que as temperaturas são mais baixas sem distinção do tipo de tardo utilizado (RV ou RB). Em relação à alvenaria sobre a qual os painéis foram construídos (já existente no local), era esperado que as temperaturas sobre ela fossem mais altas, porque tanto a cerâmica quanto a alvenaria (pintada) possuem superfícies específicas diferentes e se comportam de forma diferente: a condutividade da cerâmica é de 0,90 W/(m.K) e da argamassa de revestimento de 1,15 W/(m.K) (NBR 15220-2, 2005). No período de resfriamento (após as 15:30h), pode-se notar uma inversão do diferencial de temperatura nas áreas de descolamento. Nessa altura a temperatura ambiente fica mais baixa e os espaços vazios resfriam também mais rapidamente, influenciado pelo ar e pela água, que possuem condutividades distintas.

Para estudar quantitativamente as variações térmicas dos painéis cerâmicos, foi construído o gráfico de temperaturas médias obtidas pelo software ThermoCAM™ QuickReport. As temperaturas foram lidas nas áreas centrais demarcadas no termograma (FIG. 49) para ambos os painéis (painel íntegro e painel com patologia de descolamento). Para a patologia de umidade tomou-se apenas um ponto central sobre uma delas.

Figura 49 – Pontos de temperatura sobre as patologias

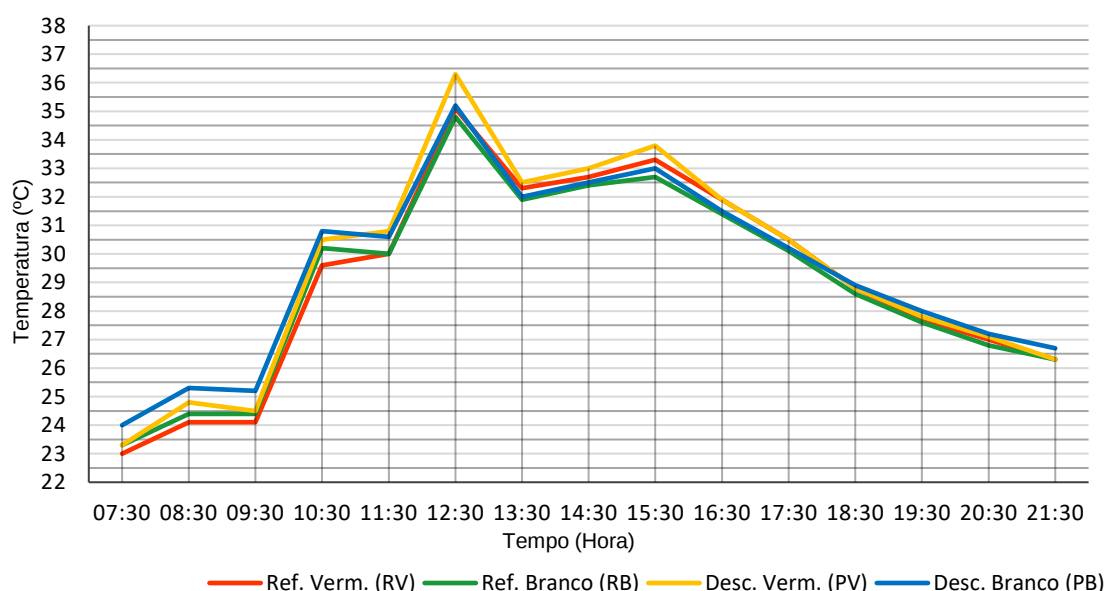


Fonte: da autora.

No GRÁF. 1 mostra-se comparativamente a evolução das temperaturas ao longo do dia em cada painel (íntegro e com a patologia de descolamento). As curvas obtidas comportaram-se de forma semelhante para os dois tipos de cerâmica e para

os quatro diferentes painéis (RV, RB e PV, PB). E de acordo com a normalidade, a temperatura aumentou de forma gradativa conforme a insolação incidente e abaixou na medida em que se aproximou o pôr do sol. Tais resultados confirmam a análise qualitativa da (FIG. 48). As temperaturas mais baixas (23°C) foram registradas no início da manhã, sem incidência de insolação (às 07:30h), e aumentaram conforme se elevaram a temperatura ambiente e a insolação. A diferença de temperatura entre o painel de referência e as patologias estão dentro do erro de medição da termocâmera, que é de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Às 9:30h, as temperaturas ainda se apresentavam próximas das iniciais (25°C). Às 10:30h, verificou-se aumento em torno de 6,4°C nas temperaturas, que passaram para cerca de 30,9°C.

Gráfico 1 – Temperaturas médias das patologias de descolamento



Os painéis atingiram as mais altas temperaturas às 12:30 horas, aumento de 13,3°C em relação à temperatura inicial, com destaque para o painel de tardo vermelho e com patologia de descolamento (PV), que tinha temperatura ligeiramente superior em relação ao de tardo branco (36,3°C PV e 35,0°C PB, respectivamente). As 13:30 horas percebeu-se queda da temperatura (32,5°C), que se manteve, com pequena variação às 15:30h, quando se iniciou a fase de resfriamento dos materiais, devido à pouca intensidade da radiação solar e à diminuição da temperatura ambiente. Os testes finalizaram-se às 21:30h, com as temperaturas muito próximas, tendendo a se igualar às iniciais para todos os quatro painéis, em torno de 26°C. O

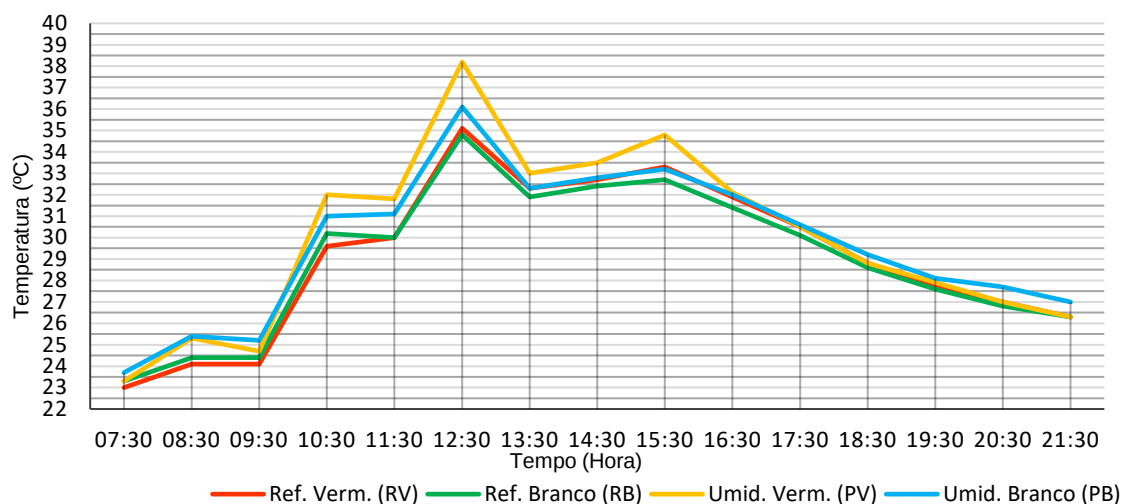
comportamento dos painéis de referência e as patologias de descolamento mostram que as diferenças entre eles foram sutis, independentemente da hora analisada.

No GRÁF. 2 mostra-se a evolução das temperaturas nos painéis de referência e nas patologias de umidade. As curvas obtidas também se comportam de forma semelhante para todos os painéis (RV, RB e PV, PB). As temperaturas mais baixas ($23,5^{\circ}\text{C}$) foram registradas no início da manhã, sem incidência de insolação (07:30h), e aumentaram à proporção que se elevaram a temperatura ambiente e a insolação, dentro do erro de medição. Às 9:30h, as temperaturas estavam próximas das iniciais ($24,5^{\circ}\text{C}$), mas às 10:30h, constatou-se comportamento distinto para as quatro situações estudadas. Os dois painéis de referência apresentaram temperaturas mais baixas (RV $29,5^{\circ}\text{C}$ e RB $30,7^{\circ}\text{C}$) em relação aos painéis com patologia de umidade (PV $32,0^{\circ}\text{C}$ e PB $31,0^{\circ}\text{C}$), estando as diferenças entre si dentro do erro de medição da termocâmara.

Os painéis atingiram as mais altas temperaturas às 12:30 horas, quando os painéis de referência (RV e RB) se igualaram, ambos em $35,0^{\circ}\text{C}$. Já as patologias de umidade sobressaíram com as temperaturas mais elevadas (PV $38,2^{\circ}\text{C}$ e PB $36,0^{\circ}\text{C}$), mostrando aumento de $3,2^{\circ}\text{C}$ e $1,0^{\circ}\text{C}$, respectivamente, sendo a diferença do PV representativa e fora do erro de medição. O aumento em relação à temperatura inicial nos painéis foi de $14,7^{\circ}\text{C}$, com destaque para o tardo vermelho, tanto no painel de referência, quanto na patologia de umidade, que se sobressaíram aos painéis de tardo branco, em $2,2^{\circ}\text{C}$. As 13:30 horas, percebe-se uma queda da temperatura de todos os painéis, mas as patologias de umidade permaneceram superiores ($33,0^{\circ}\text{C}$), enquanto os painéis de referência tenderam a se igualar ($32,0^{\circ}\text{C}$).

Às 15:30h, quando se iniciou a fase de resfriamento dos materiais, devido à reduzida intensidade da radiação solar e à diminuição da temperatura ambiente, houve pequena variação na temperatura dos painéis, mas a patologia de umidade ainda sobressaiu em $34,9^{\circ}\text{C}$. Os testes terminaram às 21:30h com as temperaturas próximas de $26,5^{\circ}\text{C}$, com tendência a se igualar com as iniciais para todos os painéis. O comportamento dos materiais avaliados segundo as temperaturas lidas nas patologias de umidade e nos painéis de referência mostrou que a diferença foi representativa, principalmente nas temperaturas mais altas.

Gráfico 2 – Temperatura das patologias de umidade



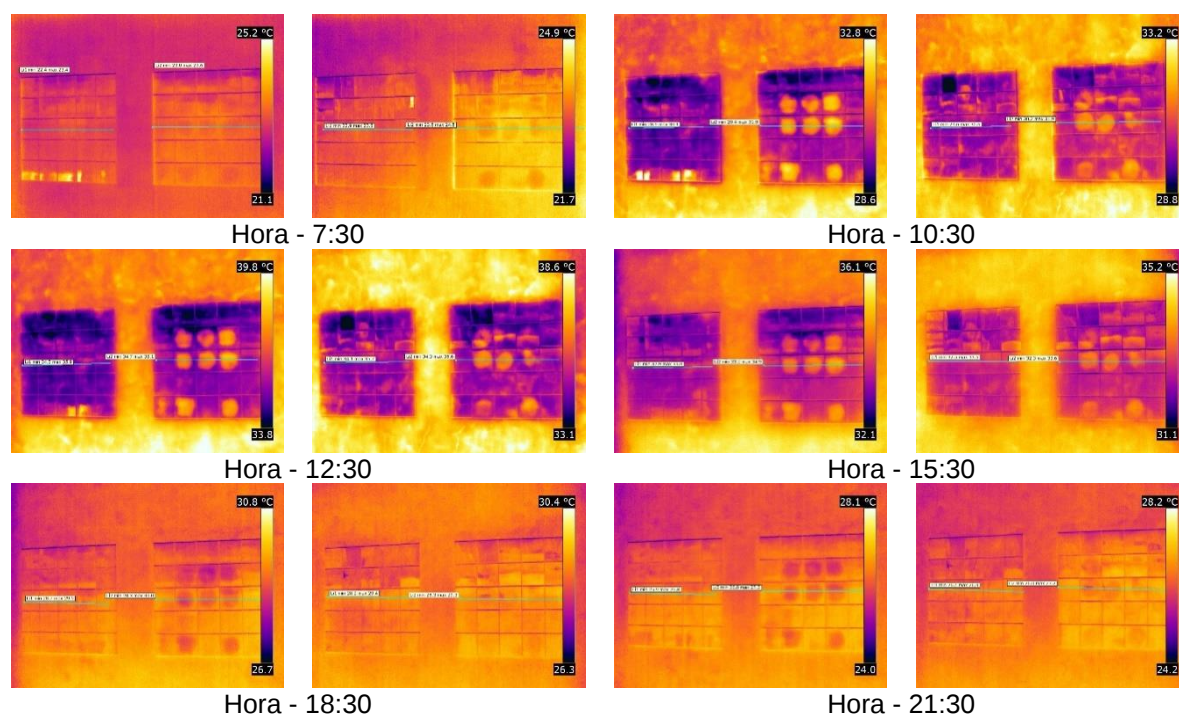
Na TAB. 10 descrevem-se, de forma comparativa, os valores superficiais lidos pelo termopar e pela câmera de infravermelho. As medidas aferidas pelo termopar foram utilizadas como referencial para identificar a precisão das medidas termográficas. Curiosamente, nas primeiras leituras com o termopar, a tendência foi ler temperaturas mais altas do que a termocâmera, nos horários de reduzida incidência solar, chegando a diferenças de 2°C. Em torno das 14:30h, as medidas praticamente se igualaram nos dois equipamentos. A partir desse horário a termografia passou a ler as temperaturas mais altas, com as diferenças chegando a ultrapassar 2°C. De modo geral, as medidas foram próximas, levando-se em consideração o erro de medição da termocâmera de $\pm 2^\circ\text{C}$, sendo, portanto, o equipamento interessante para o acompanhamento de testes termográficos.

Tabela 10 – Temperaturas aferidas pelo termopar e por termografia

Hora	Painel RV		Painel PV		Painel RB		Painel PB	
	Termopar	Termografia	Termopar	Termografia	Termopar	Termografia	Termopar	Termografia
	(°C)							
07:30	23,0	23,1	23,0	23,3	23,0	23,4	23,0	24,2
08:30	25,0	23,9	25,0	25,1	25,0	24,5	25,0	25,3
09:30	27,0	24,1	27,0	24,5	27,0	24,4	27,0	25,4
10:30	30,0	29,2	30,0	31,3	30,0	30,1	30,0	30,7
11:30	32,0	29,7	32,0	31,5	32,0	30,1	32,0	31,6
12:30	36,0	35,0	36,0	37,4	36,0	35,2	36,0	36,5
13:30	34,0	32,4	34,0	32,7	34,0	32,1	34,0	32,4
14:30	33,0	32,9	33,0	33,4	33,0	32,5	33,0	32,8
15:30	31,0	33,6	31,0	34,5	31,0	32,7	31,0	33,5
16:30	29,0	32,1	29,0	31,9	29,0	31,8	29,0	31,4
17:30	28,0	30,7	28,0	30,5	28,0	30,2	28,0	30,3
18:30	27,0	29,2	27,0	28,8	27,0	28,9	27,0	29,0
19:30	26,0	28,1	26,0	28,0	26,0	27,8	26,0	28,0
20:30	25,0	27,4	25,0	27,0	25,0	27,0	25,0	27,1
21:30	24,0	26,5	24,0	26,3	24,0	26,4	24,0	26,7

Considerando que o comportamento dos materiais é bastante complexo (KHOUKHI, 2018) e que o estudo térmico de fachadas não é algo simples, necessitando de muitos cuidados nas análises (LUCCHI, 2018), foi feito estudo comparativo do comportamento das patologias (PV e PB) e dos painéis de referência (RV e RB), buscando identificar se as patologias acompanhavam o mesmo desempenho dos painéis de referência. Dos 30 termogramas, selecionaram-se as principais imagens que representassem todas as fases da pesquisa, ou seja, às 7:30 horas, fase inicial dos testes; às 10:30h, primeiro pico representativo de aquecimento; às 12:30h, temperatura máxima alcançada; às 15:30h, primeira queda da temperatura; às 18:30h, fase do resfriamento; e às 21:30h, última imagem, totalizando 12 termogramas (FIG. 50). Utilizou-se o *software QuickReport* com a palheta de cores *Iron-Hi* e a ferramenta *line*, para traçar linhas de perfil ao longo de cada amostra nos locais com patologias de descolamento. A ferramenta *line* permite captar todos os pixels da imagem ao longo de uma linha de perfil. Depois de registrados, esses pontos podem ser transportados para o *Excel* e transformados em gráficos térmicos.

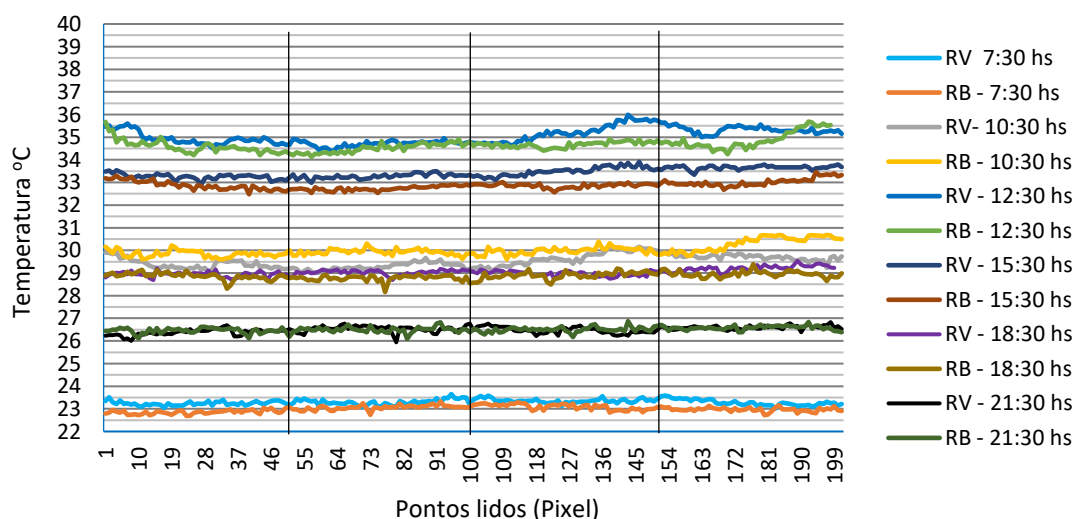
Figura 50 – Termogramas das patologias de descolamento



Fonte: da autora.

No GRÁF. 3 disponibilizam-se primeiramente os valores das linhas de perfil traçadas sobre os painéis de referência RV e RB (sem patologias). Os resultados indicam um comportamento térmico similar para os dois tipos de cerâmica (tardoz vermelho – RV e tardoz branco – BR), o que era esperado em função dos dados da FIG. 48 (Termogramas das medições realizadas ao longo de 14 horas de teste) e considerando que não existe algum tipo de anomalia nos painéis.

Gráfico 3 – Temperaturas nos painéis de referência

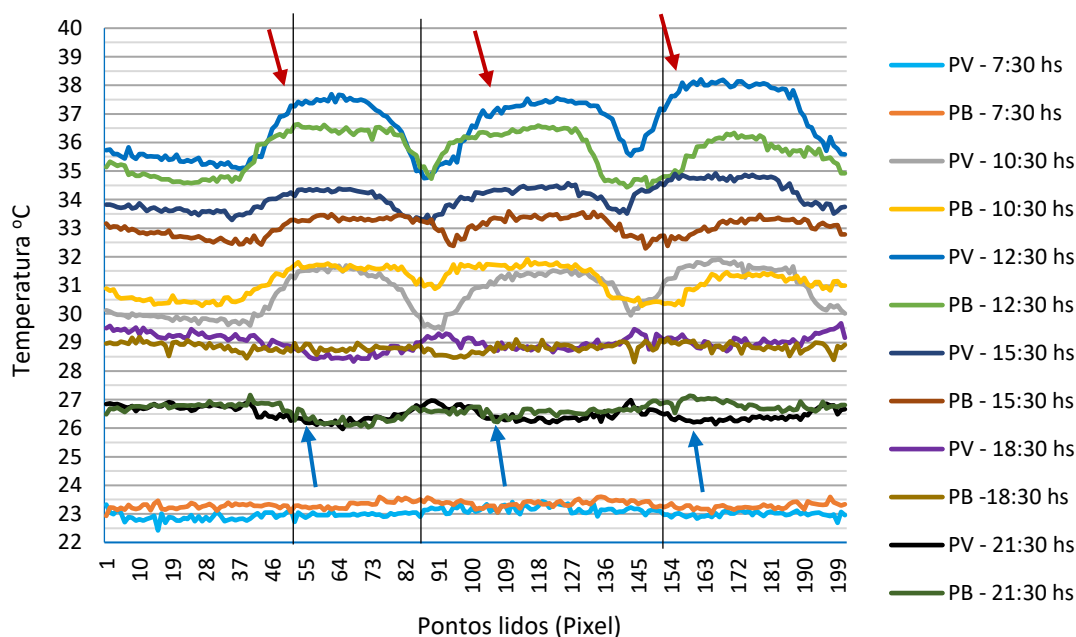


As diferenças entre os materiais cerâmicos são muito sutis, sendo as menores temperaturas registradas pela manhã, aumentando gradativamente ao longo do dia até atingir as maiores temperaturas às 12:30 horas, cerca de 35,0°C, e as menores na fase de resfriamento registradas às 21:30 horas, cerca de 26,5°C.

Vale ressaltar que, em análises quantitativas, diferenças entre 1 e 2°C podem ser consideradas erro de medição do equipamento (LUCCHI, 2018). No entanto, estes dados, quando associados a outros instrumentos de medição, podem contribuir para diagnósticos mais assertivos em estudos de patologias de fachada e de seus materiais constituintes (BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018).

No GRÁF. 4 apresentam-se os valores das linhas de perfil que foram traçadas nos painéis com patologia de descolamento (tardoz vermelho – PV e tardoz branco – PB). As patologias de descolamento são perfeitamente visíveis nesse gráfico (setas vermelhas) nos horários em que as temperaturas foram mais altas (10:30h, 12:30h e 15:30h).

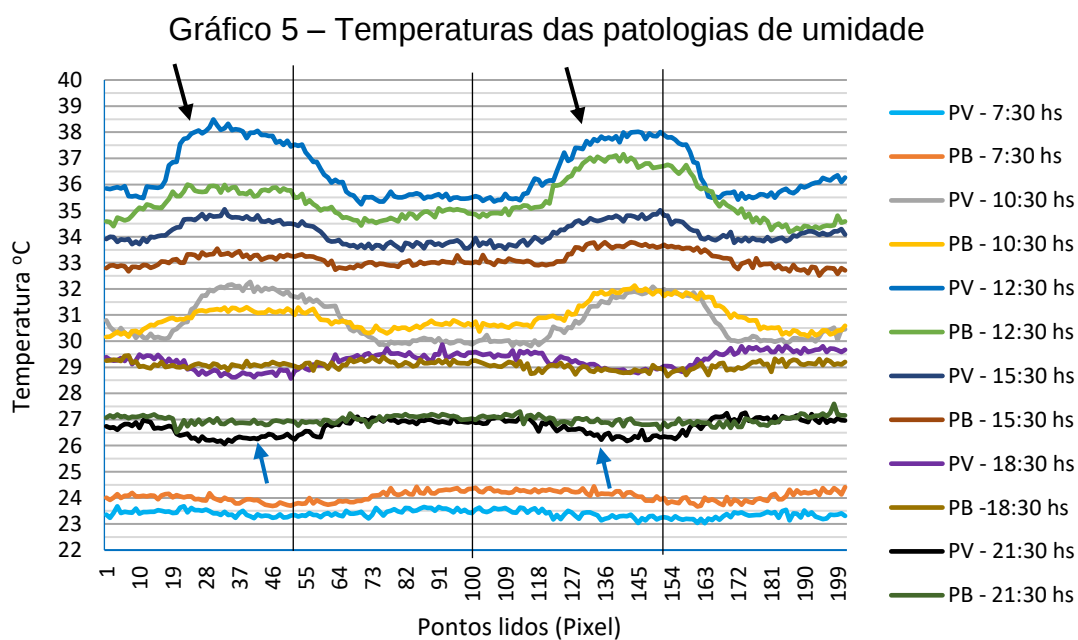
Gráfico 4 – Temperaturas das patologias de descolamento



A partir das 15:30h, as temperaturas foram diminuindo e apresentando comportamento muito semelhante ao dos painéis de referência. As temperaturas estavam ligeiramente mais altas do que nos painéis de referência e existiu tendência à inversão térmica nos locais das patologias na fase de resfriamento (setas azuis). Barreira, Almeida e Delgado (2016) consideram que durante a madrugada esse fato

possivelmente seria mais visível. As diferenças de temperatura entre os dois tipos de cerâmica foram percebidas de forma sutil, mas ainda estão dentro do erro de medição da termocâmara.

No GRÁF. 5 expõem-se os valores lidos a partir das linhas de perfil que foram traçadas nos painéis sobre as patologias de umidade (PV e PB). O comportamento em todos os horários foi muito semelhante às patologias de descolamento, em que as patologias de umidade estavam perfeitamente visíveis (setas pretas) nos horários em que as temperaturas estavam mais altas (10:30h, 12:30h e 15:30h). A partir das 15:30h, as temperaturas foram diminuindo e exibindo comportamento muito semelhante aos painéis de patologia de descolamento e aos de referência. As temperaturas também estavam ligeiramente mais altas do que nos painéis de referência, e a inversão térmica foi percebida na fase de resfriamento (setas azuis). As diferenças entre os dois tipos de cerâmica, apesar de notadas, também se encontram dentro do erro de medição da termocâmara.



Dessa forma, verifica-se que, qualitativa e quantitativamente, tanto as patologias de descolamento quanto as de umidade podem ser perfeitamente detectadas por termografia infravermelha. O horário de melhor visualização das patologias foi o período de maior incidência solar - entre 10:30h e 15:30h. O período de resfriamento indicou que as patologias também podem ser visibilizadas no período de inversão térmica. Considerando que o tipo de tardoz da cerâmica vermelho/branco

não influenciou significativamente nas temperaturas lidas por tomografia, pode-se dizer que seu comportamento em revestimentos de fachadas pode ser considerado nulo, em termo de maior ou menor fluxo de calor para dentro do ambiente, não interferindo, portanto, no conforto térmico no ambiente construído.

5 CONCLUSÕES

A principal conclusão que se pode tirar deste estudo é que patologias como descolamentos e umidade em revestimentos cerâmicos podem ser identificadas qualitativa e quantitativamente pelo método da termografia infravermelha passiva. Também foi possível atender aos objetivos específicos, com as seguintes conclusões:

- a) O levantamento das variáveis climáticas possibilitou aprofundar os conhecimentos sobre os parâmetros de ajuste da termocâmara, principalmente da emissividade e dos métodos para determiná-la. Verificou-se que os dias de ventos oscilantes e de nebulosidade não são indicados para ensaios termográficos, pois podem dificultar a detecção de anomalias.
- b) O ensaio preliminar contribuiu para conhecer e utilizar corretamente os equipamentos de medição, em especial a câmara termográfica. Os dados aferidos pelo termopar foram utilizados para validar os valores detectados pela termocâmara ao longo dos testes, reforçando a precisão das medidas termográficas.
- c) Os quatro modelos experimentais construídos sobre alvenaria existente possibilitaram o monitoramento da fachada em tempo real e em condições ambientais naturais, na situação proposta nesta pesquisa, que foi avaliar patologias de descolamento e umidade.
- d) As análises qualitativa e quantitativa foram eficientes para identificar as patologias de descolamento e umidade, mesmo em períodos sem incidência solar. As diferenças de 1 a 2°C devem ser consideradas como erro de medição, no entanto, quando associadas a outros métodos podem contribuir para diagnósticos mais precisos.
- e) Em ambos os revestimentos cerâmicos as patologias de descolamento e de umidade tiveram comportamento bastante semelhante sob insolação intensa, mas quando elas aconteceram ao mesmo tempo, o diferencial térmico pôde ser nulo, o que dificultou a distinção entre uma e outra patologia. Constatou-se que o dia nublado não inviabilizou a detecção das anomalias nos painéis de tardo vermelho, mas inviabilizou no de tardo branco. Foi comprovado pelo estudo que o período do resfriamento pode ser promissor para detectar patologias, mas o período em que melhor se visualizam os defeitos é o de maior incidência

solar (entre 10:30h e 15:30h), independentemente do tipo de material de revestimento.

Em síntese, acredita-se que a capacidade do método de inspeção por termografia, apesar das dificuldades associadas a esse tipo de sistema, foi eficiente para o estudo e para o *design* do conforto térmico. Acredita-se que a continuidade desta pesquisa pode ser direcionada a estudos que possam auxiliar a técnica de diagnóstico para promover melhor conforto nos ambientes.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

Sugerem-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- a) Uso da termografia para detectar a influência de outros tipos de patologias, além de umidade e descolamento, no conforto térmico nas edificações;
- b) resfriamento de diferentes materiais de fachada, para estudo do *design* do conforto;
- c) influência das coberturas e telhados no conforto e na proteção das edificações;
- d) influência da aplicação de acabamentos, como: argamassa, tintas, vidros, pedras ornamentais, granitos, entre outros, no comportamento térmico de fachadas;
- e) comparação entre a condutividade térmica e a difusividade térmica em análises do comportamento térmico de sistemas construtivos.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7200. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento para execução**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998, 10p.

_____. NBR 15220-1: **Desempenho térmico de edificações**. Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. NBR 15220-2: **Desempenho térmico de edificações**. Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. NBR 13754: **Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante**. Procedimento. Rio de Janeiro, 1996a.

_____. NBR 13755: **Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante**. Procedimento. Rio de Janeiro, 1996b.

_____. NBR 13749: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas**. Especificação. Rio de Janeiro, 1996c.

_____. NBR 13816: **Placas cerâmicas para revestimento**. Terminologia. Rio de Janeiro, 1997a.

_____. NBR 13817: **Placas cerâmicas para revestimento**. Classificação. Rio de Janeiro, 1997b.

_____. NBR 13818: **Placas cerâmicas para revestimento**. Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997c.

_____. NBR 14081-1: **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas**. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 14992: **Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas**. Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

_____. NBR 5461: **Terminologia de iluminação**. Rio de Janeiro, 1991.

ALBATI, R.; TONELLI, A. M.; CHIOGNA, M. A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. **Applied Energy**, v. 141, p. 218–228, 2015.

ALVARENGA, C.S.; PEDRA, S.A.; SALES, R.B.C. Influência da cor no revestimento cerâmico de fachadas em edificação de alvenaria estrutural, utilizando termografia infravermelha. In: 10º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 2012, São Luiz. P&D Design 2012, **Anais...**, 2012, v. 1.

ANFACER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/brasil>>. Acesso em: 10 maio de 2020.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA, 2013.

ANSTEY, T. The ambiguities of disegno. **The Journal of Architecture**, v. 10, n. 3, p. 295–306, 2005. Disponível em: <<http://bit.ly/1gAd2ua>>. Acesso em: ago. 2013.

ASPACER - ASSOCIAÇÃO PAULISTA DAS CERÂMICAS DE REVESTIMENTO. **Revestimentos cerâmicos**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/sao-carlos-regiao/especialpublicitario/aspacer/ceramicaderevestimento/noticia/2016/10/conheca-diferenca-entre-os-materiaisceramicos-e-processos.html>>. Acesso em: 10 Jun. 2018.

BAGAVATHIAPPAN, S. *et al.* Infrared thermography for condition monitoring: A review. **Infrared Physics & Technology**, v. 60, p. 35-55, 2013.

BALSAMO, A. Design. **International Journal of Learning and Media**, v. 1, n. 4, p. 1-10, 2010. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/cgi-bin/refs/Show?_id=b1b1&sort=DEFAULT&search=Anne&hits=94>. Acesso em: 11 jan. 2018.

BARBOSA, P.G. *et al.* Evaluation of thermal diffusivity in ceramic Blocks using infrared thermography. **International Journal of Engineering Technology Research & Management**, v. 01, p. 35-48-48, 2018.

BARBOSA, P.G. **Uma contribuição para o design do conforto**: avaliação da difusividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto utilizando termografia infravermelha. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Design, Belo Horizonte, MG, 137 f. 2014.

BARREIRA, E.; ALMEIDA, R.M.S.F.; DELGADO, J.M.P.Q. Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 251–269, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.026>.

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.

BARREIRA, E.S.B.M. **Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios**. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Cidade do Porto, Portugal, 196 f. 2004.

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, p. 517–528, 2018. [https://doi.org/10.1007/s13349-018-0289-0\(0123456789](https://doi.org/10.1007/s13349-018-0289-0(0123456789).

BAUER *et al.* Analysis of building facade defects using infrared thermography: Laboratory studies. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 93–104, 2016.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção**. 5. ed. [revisada] – Rio de Janeiro: LCT, 2014. ISBN 978-85-216-1003-8.

BONSIEPE, G. **Design, cultura e sociedade**. São Paulo: Blucher, 2011. 270 p.

BORGSTEIN, E.H.; LAMBERTS, R.; HENSEN, J.L.M. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: a review. **Energy and Buildings**, 2018. Doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.018

BRIQUE, S.K. **Emprego da termografia infravermelha no diagnóstico de falhas de aderência de peças cerâmicas utilizadas em fachadas de edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, SC, 2016. 176 p.

CALLISTER JR, W.D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 9. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARA, M. **Do desenho industrial ao design no Brasil**: uma bibliografia crítica para a disciplina. São Paulo: Blücher, 2010.

CARASEK, H. Argamassas. *In*: ISAIA, G.C. (org./ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007, p. 863-804.

CARDOSO, R. **Design para um mundo complexo**. São Paulo: Cosac Naify, 2012.

CARDOSO, R. **Uma introdução à história do design**. 3. ed., São Paulo: Blücher, 2008.

CASTANEDO, C.I. **Quantitative subsurface defect valuation by pulsed phase thermography**: Depth retrieval with the phase. Thèse (obtention grade de Philosophiae Doctor Ph.D.) - Faculté des Sciences et de Génie Université Laval – Québec. Oct. 2005.

CHAPPELLS, H.; SHOVE, E. **Comfort**: A review of philosophies and paradigms. Future Comforts Project, UK ESRC programme, 2004. Disponível em: <https://www.lancaster.ac.uk/fass/projects/futcom/fc_litfinal1.pdf>. Acesso em: 14 Mai. 2020.

DE MORAES, D. **Metaprojeto**: o design do design. São Paulo: Blucher, 2010. 228 p.

EDIS, E.; FLORES-COLEN, I.; DE BRITO, J. Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 187–97, 2014. ISSN 0950-0618.

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, p. 97,108, 2015.

FERREIRA, B.B.D. **Tipificação de patologias em revestimentos argamassados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belo Horizonte, MG, 2010. 192 f.

FLIR SYSTEMS. **Catálogo do utilizador FLIR 2015**. Disponível em: <http://www.akindustrial.com.br/pdf/flir/P640_Datasheet.pdf>. Acesso em: 17 out. 2016.

FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. BRANCO, F. In situ adherence evaluation of coating materials, **Experimental Techniques**, v. 33, p. 51–60, 2009. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.2008.00372.x>.

FREITAS, S.S.; DE FREITAS, V.P.; BARREIRA E. Detection of façade plaster detachments using infrared thermography: A nondestructive technique. **Construction and Building Materials**, v. 70, p. 80–87, 2014.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico**: arquitetura, urbanismo. 5. ed., São Paulo: Studio Nobel, 2007. ISBN 85-85445-39-4.

GASTALDINI, A.L.G.; SICHIERI, E.P. Materiais cerâmicos para acabamentos e aparelhos. In: ISAIA, G.C. (org.-ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007, p. 587-616.

GONÇALVES, J.C.S. **Edifício ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 1. ed., 2015.

HART, J.M. A practical guide to infra-red thermography for building surveys. **Manager at the Building Research Establishment Report**. Reprinted 1992. ISBN: 0851254489.

HOUAISS, A. Instituto Antônio. **Grande Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. 2013. Disponível em: <<http://houaiss.uol.com.br/busca?palavra=design>>. Acesso em: 05 maio 2018.

HUH, J. *et al.* Experimental study on detection of deterioration in concrete using infrared thermography technique. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/1053856>.

ICSID – INTERNATIONAL COUNCIL OF SOCIETIES OF INDUSTRIAL DESIGN. 2013. Disponível em: <<http://www.icsid.org/about/about.htm>>. Acesso em: 05 maio 2015.

INCROPERA, F.P; DEWITT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 7 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730. **Hot environments**: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Genebra, 2005.

_____. **ISO 13006**: Ceramic tiles - Definitions, classification, characteristics and marking. Genebra, 2012.

KHOUKHI, M. The combined effect of heat and moisture transfer dependent thermal conductivity of polystyrene insulation material: Impact on building energy performance. **Energy & Buildings**, v. 169, p. 228–235, 2018.

KIRIMTAT, A.; KREJCAR, O. A review of infrared thermography for the investigation of building envelopes: Advances and prospects. **Energy & Buildings**, v. 176, p. 390–406, 2018.

KOLCABA, K.; WILSON, L. Comfort care: A framework for perianesthesia nursing. **Journal of Pern Anesthesia Nursing**, v. 17, n. 2, p. 102-114, April 2002.

KREITH, F. **Princípios de transmissão de calor**. São Paulo: Blücher, 2003.

KRUCKEN, L. Competências para o design na sociedade contemporânea. *In*: MORAES, D.; KRUCKEN, L. (org.). **Cadernos de estudos avançados em design**: transversalidade. Belo Horizonte: UEMG, 2008, p. 23-32.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F.O.R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. [S.l.]: Eletrobrás/Procel, 2016.

LANA, S.L.B.; LAGE, A.C.A. Creative people: the key of the innovation process. *In*: XXIV WORLD CONFERENCE, Barcelona, **Anais...**, 2007.

LANHAM, A.; GAMA P.; BRAZ, R. **Arquitetura bioclimática**: perspectivas de inovação e futuro. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2004.

LIRA, WS.; CÂNDIDO, GA. **Gestão sustentável dos recursos naturais**: uma abordagem participativa [online]. Campina Grande: UEPB, 2013. 325 p. ISBN 9788578792824. Available from SciELO Books.

LOPES, C.A.S. **Durabilidade na construção**: estimativa da vida útil de revestimentos cerâmicos de fachadas. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal, 2009.

LOURENÇO, T.; MATIAS, L.; FARIA, P. Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography. **Construction and Building Materials**, Portugal, 2017.

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.

MALDAGUE, X.P. Introduction to NDT by active infrared thermography. **Materials Evaluation**, v. 6, pp. 1060-1073, 2002.

MARÇAL, V.G. **Análise de índices de conforto térmico não convencionais: uma avaliação em ambiente escolar**. Tese (Doutorado) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto – MG, 2016.

MASLOW, A. H. **Motivation and personality**. New York, USA: Harper, 1954.

MÁXIMO, O. H.; SALES, R.B.C.; AGUILAR, M.T. P. Avaliação da difusividade térmica de compostos cimentícios confeccionados com micropartículas de resíduo de vidro por meio de termografia infravermelha. *In*: 60º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. ÁGUAS DE LINDOIA, SP. **Anais...**, maio 2016.

MENDONÇA, L.V. Termografia por infravermelho: inspeção de betão. **Revista Engenharia e Vida**, n. 16, p. 53-57, 2005.

MENEZES, A.; GOMES, M. G.; FLORES-COLEN, I. In-situ assessment of physical performance and degradation analysis of rendering walls. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 283–292, 2015.

MEOLA, C.; CARLOMAGNO, G.M. Recent advances in the use of infrared Thermography. **Publishing Measurement Science and Technology**, v. 15, p. 27-58, 2004.

MEOLA, C. *et al.* Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. **Engineering Failure Analysis**, v. 12, p. 875-892, 2005.

MORAES, D. Design e complexidade. *In*: MORAES, D.; KRUCKEN, L. (org.). **Cadernos de estudos avançados em design: transversalidade**. Belo Horizonte: UEMG, 2008, p. 07-22.

MOURA, L.F.; XAVIER, A.A.P. Sensação térmica e ações para o conforto térmico: um estudo de caso. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, p. 25, 2012.

NUNES, F.M.M.P. **Identificação de patologias em revestimentos cerâmicos de fachadas por meio da termografia**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

OMS - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Constituição da Organização Mundial da Saúde** (OMS/WHO). Disponível em: <<http://www.direitoshumanos.usp.br/index.php/OMSOrganiza%C3%A7%C3%A3o-Mundial-da-Sa%C3%BAde/constituicao-da-organizacao-mundial-da-saude-omswho.html>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

OLIVEIRA, A.G.D. **Proposta de método de avaliação do desempenho térmico de residências unifamiliares em clima quente-úmido**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

OLIVEIRA, A.P.N. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 6, dez. 2000.

OLIVEIRA, L.T. Revestimento cerâmico: procedimentos e patologias. **Revista Especialize**, On-line IPOG, Goiânia, ano 8, ed. 14, v. 01, dez. 2017.

PEDRA, S.A. *et al.* Termografia infravermelha aplicada à análise térmica de alvenaria em blocos de concreto e de cerâmica. *In*: 54 CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2012, Maceió. **Anais...**, 2012.

PEDRA, S.A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural**. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Design, Belo Horizonte, MG, 100 f. 2011.

POSSATTI, G.M.; VAN DER LINDEN, J.C.S.; SILVA, R.P. Reflexões sobre as relações entre design e complexidade, p. 386-397. *In*: 11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN [Blucher Design Proceedings, v. 1, n. 4]. São Paulo: Blucher, 2014. **Anais...**, 2014ISSN 2318-6968, DOI 10.5151/designpro-ped-00877.

PRADO, R.T.A.; FERREIRA, F.L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy and Building**, v. 37, p. 295-300, 2005.

RAZERA, E.A.B. **Estudo da suscetibilidade ao manchamento em placas cerâmicas e porcelanatos**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

RHEINGANTZ, P.A. **Projeto bioclimático**: quadro síntese de recomendações para a cidade do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.

RUAS, A.C. **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificadas e sua aplicação num software**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

RUPP, R.F.; VÁSQUEZ, N.G.; LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 178-205, 15 Oct. 2015. Doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047.

SALES, R.B.C. *et al.* Concrete study using infrared thermography and forced resonant frequency. **Advanced Materials Research**, v. 168–170, p. 778–786, 2017.

SALES, R.B.C. *et al.* The use of infrared thermography in the analysis of engineered cementitious composites. **Advanced Materials Research** (Online), v. 919-921, p. 1868-1875, 2014.

SANTOS, C.F.; ROCHA, J.H.A.; PÓVOAS, Y.V. Utilização da termografia infravermelha para detecção de focos de umidade em paredes internas de edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 105-127, jan./mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000100296>.

SANTOS L. **Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Itajubá, MG, 126 f. 2006.

SILVA, A.J.; VIÉGAS, D.J.A.; PÓVOAS, Y.V. O uso da termografia infravermelha para detecção de manifestações patológicas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, v. 16, 2016, São Paulo. **Anais...**, ANTAC, 2016.

SINDUSCON - SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Placas cerâmicas para revestimento**. Sinduscon – MG: Belo Horizonte, MG, 2009.

SOUZA, H.A. **Conforto Humano: CIV 715**. Material didático. Dissertação (Mestrado em Construção Metálica, Engenharia Civil). Ouro Preto: Escola de Minas, UFOP, 2006.

TAKEDA, O.T.; MAZER, W. Potential of thermographic analysis to evaluate pathological manifestations in façade cladding systems. **Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción**, v. 8, n. 1, 2018.

TEIXEIRA, W.; PEREIRA, L. A edificação saudável: aspectos complementares ao conforto ambiental. *In*: ENCONTRO NACIONAL SOBRE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Brasília, **Anais...**, 2001.

VALERO, L.R. *et al.* In situ assessment of superficial moisture condition in façades of historic building using non-destructive techniques. **Case Studies in Construction Materials**, (2019).

VAN DER LINDEN, J.C.S.; LACERDA, A.P. **Pelos caminhos do design: metodologia de projeto**. Londrina: UEL, 2012, p. 83-149.

VERATTI, A.B. **Manual do curso de formação de termografista nível I do ITC Infrared Training Center**. Rev. 1.1 publi. nº 1560063_E-pt/BR – Cap. 1/14. São Paulo, 2011.

VILLAS BÔAS, N. **Física 2**. São Paulo: Saraiva, 2010, 175 p.

APÊNDICE A – Cálculo para posicionamento da termocâmara.

