



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

FERNANDA RAFAELLA DE SOUZA LEITE

**APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA EM AUXÍLIO À
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NO ESTUDO DOS
DESCOLAMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS: ESTUDO DE
CASO**

Recife, PE

2023



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

FERNANDA RAFAELLA DE SOUZA LEITE

**APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA EM AUXÍLIO À
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NO ESTUDO DOS
DESCOLAMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS: ESTUDO DE
CASO**

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof^a Dra. Yêda Vieira Póvoas

Recife, PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

L533a Leite, Fernanda Rafaella de Souza
Aplicação da simulação higratérmica em auxílio à termografia infravermelha no estudo dos descolamentos cerâmicos em fachadas: Estudo de caso. / Fernanda Rafaella de Souza Leite. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2023.

85 f. il.

Orientadora: Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Termografia Infravermelha. 2. Descolamentos Cerâmicos. 3. Simulação Higratérmica. 4. Ensaio Não Destrutivo. I. Construção Civil – Dissertação. II. Póvoas, Yêda Vieira (orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título.


CDD: 690.028

FERNANDA RAFAELLA DE SOUZA LEITE

**APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA EM AUXÍLIO À
TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NO ESTUDO DOS
DESLOCAMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS: ESTUDO DE
CASO**


BANCA EXAMINADORA:

Orientadora


Documento assinado digitalmente
 YEDA VIEIRA POVOAS
Data: 09/02/2023 09:48:07-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas
Universidade de Pernambuco

Examinadores

Documento assinado digitalmente
 ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO
Data: 09/02/2023 14:04:53-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 PAULO ROBERTO FREIRE DE PAULA
Data: 14/02/2023 13:54:42-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Paulo Roberto Freire de Paula
Instituto Federal do Sertão Pernambucano

Recife-PE
2023

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Maria Etiene de Souza,
meu maior exemplo e a maior incentivadora de todos
os meus sonhos.

À minha vó, Célia Maria da Silva Leite,
a mulher mais cativante e generosa com quem tenho
a oportunidade de conviver.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças nessa caminhada, sem Ele nada disso seria possível.

À minha família, em especial a minha mãe, Maria Etiene, que sempre me apoiou e incentivou e minha vó, Célia Maria, que também me deu muita força para que a concretização desse sonho fosse possível.

As amigas, Ana Júlia e Milena Adna, que no ano mais difícil de pandemia, foram minhas colegas de apartamento, ouvintes para os ensaios das apresentações online e para os desabafos de cada etapa das disciplinas, ajudadoras, incentivadoras e com o companheirismo fizeram esse primeiro ano ser mais leve.

A amiga Inêz Prazeres que conheci na única semana de aula presencial que tivemos, fizemos todos os trabalhos juntas e seguimos nos ajudando até hoje. A amiga Sabrina Moraes, que mesmo à distância, sempre me ajudou com sua amizade e conselhos, e sempre levantou minha autoestima lembrando o quanto eu sou capaz.

A minha amiga mais antiga, Andréa Queiroz, que desde o começo me incentivou e que na reta final, quando a ansiedade já me dominava, foi essencial para me dar ânimo e forças para concluir. A amiga Williane Alves, que há muito tempo vem acompanhando e me motivando em todas as batalhas. A amiga Juliette que também faz mestrado e soube ouvir e compartilhar os desafios da vida de mestranda.

Ao meu namorado, Matheus Santos, que chegou na reta final, mas que muito me incentivou e apoiou de todas as formas possíveis para que eu concluísse.

À minha orientadora, Yêda Vieira Póvoas, pela paciência, contribuição e orientação.

A todos os professores do PEC pela contribuição.

*“Quando a ansiedade já me dominava no meu íntimo,
O teu alívio trouxe consolo à minha alma”*

Salmos 94:19

RESUMO

No Brasil, a maior parte dos edifícios utiliza revestimento cerâmico em suas fachadas devido às vantagens que estes oferecem com relação aos demais revestimentos. Apesar do avanço na tecnologia de produção, tem se tornado cada vez mais frequente os casos de descolamento cerâmico. Dentre os ensaios não destrutivos, a termografia infravermelha tem se mostrado como uma ferramenta de inspeção de fachadas com bons resultados. Dentro desse contexto, a presente dissertação tem como objetivo utilizar a termografia infravermelha na identificação dos descolamentos cerâmicos em fachadas com o uso da simulação higrotérmica como ferramenta de apoio. Para isto, foi escolhido como objeto de estudo, um edifício situado no município de Arcoverde/PE e foi utilizado o software WUFI PRO 6.5 para realizar simulações higrotérmicas nas fachadas do edifício, e a partir dos resultados, identificar o momento mais propício para as inspeções termográficas com posterior realização de ensaio termográfico. Os resultados mostraram que para a fachada sul, onde predomina a cor marrom, o momento mais propício seria entre 8:00 e 9:00 da manhã. Para as fachadas leste e oeste, onde a cor branca prevalece, o melhor momento seria entre 9:00 e 10:00 da manhã, pois devido a sua absorvância ser menor, levam mais tempo para aquecer. As inspeções termográficas detectaram os descolamentos cerâmicos nos horários previstos na simulação. Destaca-se como conclusão desse estudo que os resultados da simulação higrotérmica são satisfatórios e é uma boa ferramenta de auxílio à termografia infravermelha.

Palavras-chave: Termografia infravermelha. Descolamentos cerâmicos. Simulação higrotérmica. WUFI. Ensaios não destrutivos.

ABSTRACT

In Brazil, most buildings use ceramic coating on their facades due to the advantages they offer over other coatings. Despite advances in production technology, cases of ceramic detachment have become increasingly frequent. Among non-destructive tests, infrared thermography has been shown as a facade protection tool with good results. Within this context, the present dissertation aims to use infrared thermography in the identification of ceramic detachments on facades using hygrothermal simulation as a support tool. For this, a building located in the municipality of Arcoverde/PE was chosen as the object of study and the WUFI PRO 6.5 software was used to carry out hygrothermal simulations on the facades of the building, and from the results, identify the most favorable moment for the inspections thermographics with subsequent performance of thermographic test. The results showed that for the south façade, where the brown color predominates, the most favorable moment would be between 8:00 and 9:00 am. For the east and west facades, where the white color prevailed, the best time would be between 9:00 and 10:00 am, because due to their lower absorbance, they take longer to heat up. Thermographic inspections detect ceramic detachments at the times foreseen in the simulation. It stands out as a conclusion of this study that the results of the hygrothermal simulation are strong and it is a good tool to aid infrared thermography.

Keywords: Infrared thermography. Ceramic detachments. Hygrothermal simulation. WUFI. Non-destructive testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Trocas de calor por radiação num material opaco.	18
Figura 2 – Temperatura de superfícies expostas ao sol do meio-dia.....	19
Figura 3 – Piranômetro LP02 da Adcon Telemetry (Adcon Telemetry).....	20
Figura 4 – Reflectômetro.....	20
Figura 5 – Espectrofotômetro UV-VIS-NIR Lambda 750 da Perkin Elmer.	21
Figura 6 – Espectro Eletromagnético e Espectro Solar.....	22
Figura 7 – Curvas de refletância espectral para diferentes cores de tinta na região visível.	24
Figura 8 – Termograma.	25
Figura 9 – Fluxograma de Classificação da termografia.....	26
Figura 10 – Ilustração da técnica de termografia passiva com fluxo térmico de indução natural através do sol.	27
Figura 11 – Ilustração da técnica de termografia ativa com fluxo térmico de indução artificial através de painel radiante: (a) fonte posicionada a frente da superfície em análise; (b) fonte posicionada posterior à superfície.	27
Figura 12 – Representação esquemática de uma medição termográfica.....	29
Figura 13 – Definição do elemento construtivo e posições de monitoramento.....	35
Figura 14 – Definição da orientação, inclinação, altura e chuva dirigida.	36
Figura 15 – Definição dos coeficientes de transferência à superfície.	36
Figura 16 – Definição das condições iniciais para a simulação.	37
Figura 17 – Definição do período de simulação.....	37
Figura 18 – Definição das condições de cálculo.	38
Figura 19 – Definição do clima exterior.....	38
Figura 20 – Definição do clima interior	39
Figura 21 – Fachada sul (frente do edifício).	42
Figura 22 – Fachada oeste (lateral).....	42
Figura 23 – Fachada leste (lateral).	43

Figura 24 – Camadas do sistema de revestimento e pontos de monitoramento	45
Figura 25 – Síntese do arquivo climático para a cidade de Arcoverde.	47
Figura 26 – Representação esquemática da termocâmera FLIR E60.	48
Figura 27 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada sul – cerâmica na cor marrom	51
Figura 28 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada sul – cerâmica na cor branca	52
Figura 29 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada leste –	53
Figura 30 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada leste – cerâmica na cor branca	54
Figura 31– Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada oeste – cerâmica na cor marrom	55
Figura 32 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada oeste – cerâmica na cor branca	56
Figura 33– Imagem termográfica da fachada sul	58
Figura 34 – Verificação de som cavo por meio de percussão	58
Figura 35 – Imagem termográfica da fachada leste.....	59
Figura 36 – Imagem tirada com câmera convencional da fachada leste	60
Figura 37 – Imagem termográfica do descolamento da fachada leste.....	60
Figura 38 – Falhas de execução da fachada leste	61
Figura 39 – Imagem termográfica da fachada oeste.....	62
Figura 40 – Estufamento de placas cerâmicas na fachada oeste	62
Figura 41 – Imagem termográfica da fachada leste com fluxo inverso de calor.....	63
Figura 42 – Rompimento na camada da argamassa colante.....	64
Figura 43 – Comparação entre as temperaturas medidas <i>in loco</i> e simuladas.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cores percebidas e curva de sensibilidade do olho humano.....	23
Tabela 2 – Elemento construtivo (Sistema de revestimento cerâmico).....	44
Tabela 3 – Propriedades higrotérmicas dos materiais	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Normas relacionadas à Termografia Infravermelha.	11
Quadro 2 – Estudos sobre refletância.	19
Quadro 3 – Parâmetros de entrada para simulação higrotérmica.	44
Quadro 4 – Especificações técnicas da câmera termográfica FLIR E60.	48
Quadro 5 – Síntese das Simulações.	50
Quadro 6 – Inspeções termográficas.	57
Quadro 7 – Comparação das temperaturas.	65
Quadro 8 – Variações de temperatura dos revestimentos de diferentes cores.	66

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NBR	Norma Brasileira
SRI	Índice de refletância solar
TIR	Termografia por infravermelhos
TMY	<i>Typical Meteorological Year</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
WUFI	<i>Wärme Und Feuchte Instationär</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$D\phi$	Coeficiente de transferência de água líquida	kg/m.s
H	Entalpia	J/m ³
h_v	Calor latente com mudança de estado - evaporação	J/kg
p_{sat}	Pressão de vapor de saturação;	Pa
T	Temperatura	Kelvin
t	Tempo	s
w	Teor de água	kg/m ³
W_{atm}	Energia relativa à absorção da atmosfera	
W_{obj}	Energia radiada a partir do objeto	
W_{ref}	Energia refletida a partir dos corpos vizinhos	
W_{tot}	Potência total da radiação medida pela câmera	
α	Absortância solar	[-]
δp	Permeabilidade ao vapor	kg/m.s.Pa
ε	Emissividade	[-]
λ	Condutibilidade térmica	W/m.K
ρ	Refletância solar	[-]
τ	Coeficiente de transmissibilidade da atmosfera	[-]
ϕ	Umidade relativa	%

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa	10
1.2	Objetivos	12
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	12
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	12
1.3	Estrutura do texto	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Descolamento de revestimento cerâmico em fachadas	14
2.2	Métodos tradicionais de inspeção	15
2.3	A influência da cor na temperatura superficial de revestimentos cerâmicos	16
2.3.1	<i>Refletância solar e absorvância solar</i>	17
2.3.2	<i>Radiação Solar e Cores</i>	21
2.4	Termografia infravermelha	24
2.4.1	<i>Classificação da termografia infravermelha</i>	25
2.4.2	<i>Fatores que influenciam na medição termográfica</i>	28
2.5	Uso da simulação higrotérmica como ferramenta de apoio a termografia	31
3	METODOLOGIA	40
3.1	Descrição do edifício e do sistema de revestimento de fachada	41
3.2	Coleta de dados para realização da simulação higrotérmica	43
3.2.1	<i>Elemento construtivo</i>	44
3.2.2	<i>Propriedades higrotérmicas dos materiais</i>	45
3.2.3	<i>Orientação, altura e inclinação das fachadas</i>	46
3.2.4	<i>Clima</i>	46
3.3	Definição dos parâmetros de entrada da câmera termográfica	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	Análise dos dados da simulação higrotérmica	50
4.2	Inspeção termográfica	57
4.3	Análise da eficácia da simulação higrotérmica	64
4.4	Análise da influência das diferentes cores dos revestimentos	66
5	CONCLUSÕES	67
5.1	Considerações finais	67

5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	68
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A fachada serve como vitrine da edificação, porém, além da sua função estética, ela exerce a função de proteger o edifício das intempéries provenientes do meio externo. No Brasil, a maior parte dos edifícios utiliza revestimento cerâmico em suas fachadas devido às vantagens que estes oferecem em relação aos demais revestimentos tradicionais, tais como, maior durabilidade, facilidade de limpeza, maior resistência à penetração de água e valorização estética do empreendimento (BATISTA; SILVA; ARAÚJO, 2021). Porém, pesquisas ressaltam que essas potenciais vantagens do revestimento cerâmico só irão se materializar se o mesmo for executado de forma adequada e se forem realizadas as manutenções preventivas (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Quanto à manutenção periódica em edifícios de apartamentos e salas comerciais, a Lei 13.032/2006, em seus artigos 1º e 2º, deixa claro a importância e a obrigatoriedade das vistorias periciais e respectivas manutenções periódicas em unidades autônomas públicas ou privadas no Estado de Pernambuco e destaca os componentes de fachadas como um dos sistemas obrigatórios a ser vistoriado (PERNAMBUCO, 2006).

As manutenções preventivas nas fachadas ocorrem a partir de uma inspeção para mapeamento das manifestações patológicas e planejamento de quais ações devem ser tomadas. Essa inspeção tradicionalmente é realizada através de dois ensaios: percussão e resistência de aderência à tração. Apesar de eficazes, o mapeamento com esses ensaios é demorado, custoso, incômodo aos condôminos devido ao barulho do ensaio de percussão e destrutivo no caso do ensaio de resistência de aderência à tração.

Além disso, essa forma de inspeção apresenta risco à vida do operário que precisa trabalhar em altura utilizando balancim ou cadeirinha e exige também uma equipe treinada para identificar as regiões com som cavo. A depender do nível de qualificação e compromisso do profissional que está realizando o ensaio, o mapeamento pode ficar comprometido. Diante disso, faz-se necessário o estudo de novas técnicas de inspeção de fachadas que sejam não destrutivas, apresentem resultados confiáveis, diminuam o tempo de trabalho e os riscos associados à vida do trabalhador.

1.1 Justificativa

Apesar do avanço na tecnologia de produção dos revestimentos cerâmicos, tem se tornado cada vez mais frequentes os casos de descolamento e deslocamento desses revestimentos em fachadas com idades precoces trazendo prejuízos financeiros e, algumas vezes, causando acidentes. De acordo com Correa, Santos e Tatim Filho (2021), mesmo havendo um crescente cuidado com a qualidade dos edifícios por parte das construtoras, devido a Norma de Desempenho – NBR 15575-1 (ABNT, 2021), que está em vigência desde 2013 estabelecendo requisitos mínimos de habitabilidade, é notório que as edificações construídas nos últimos anos ainda não denotam a qualidade requerida.

As perdas humanas e materiais causadas pelo deslocamento cerâmico, na maioria dos casos, poderiam ser evitadas se as manutenções preventivas não fossem negligenciadas. Porém, estas manutenções vêm sendo deixadas de lado devido às técnicas tradicionais de inspeção que são demoradas, incômodas, destrutivas e custosas. Diante disso, faz-se necessário o estudo de novas técnicas de inspeção não destrutivas e com resultados mais rápidos.

Dentre os ensaios não destrutivos, a termografia infravermelha tem se mostrado como uma ferramenta de inspeção com bons resultados, pois não necessita de contato direto com a fachada e apresenta resultados em tempo real por meio da análise dos termogramas, mas por ser uma ferramenta relativamente nova, seu uso não possui parâmetros e critérios definidos (AIDAR, 2019).

Para Andrade (2020), a termografia é uma técnica promissora para inspeção de fachadas permitindo localizar regiões defeituosas a partir do seu diferencial térmico, e dessa forma faz-se necessário incentivar iniciativas brasileiras de uso da técnica para atividades de inspeções periódicas, bem como o estudo de métodos que possam viabilizar a utilização da técnica com confiabilidade.

Várias pesquisas buscam encontrar uma forma padrão dos termogramas para ajudar na interpretação das imagens e buscam também ferramentas auxiliares à termografia, como a simulação higratérmica, para identificar o período mais propício para realização das inspeções (AIDAR, 2019; BAUER; MILHOMEM; AIDAR, 2018; PAVÓN, 2017).

Conforme citado por Brique (2016), existem algumas normas para a termografia infravermelha: NBR 16292 (ABNT, 2014), NBR 15572 (ABNT, 2013), NBR 15866 (ABNT, 2010), NBR 15718 (ABNT, 2009), NBR 15763 (ABNT, 2009) e NBR 15424 (ABNT, 2016). Porém, a maior parte dessas normas é aplicada ao estudo de sistemas ou equipamentos elétricos, como pode ser visto no Quadro 1. Recentemente, entrou em vigor a NBR 16818 (ABNT, 2020) – Ensaios não destrutivos – Termografia infravermelha – Procedimento, para aplicações do método da termografia infravermelha, mas a norma é superficial e não traz informações sobre as definições dos parâmetros para a realização das inspeções em edifícios.

Quadro 1 – Normas relacionadas à Termografia Infravermelha.

NORMA	TÍTULO
NBR 16818 (ABNT, 2020)	Ensaios não destrutivos - Termografia infravermelha - Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha
NBR 16292 (ABNT, 2014)	Ensaios não destrutivos - Termografia - Medição e compensação da temperatura aparente refletida utilizando câmeras termográficas
NBR 15572 (ABNT, 2013)	Ensaios não destrutivos - Termografia - Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos
NBR 15866 (ABNT, 2010)	Ensaio não destrutivo – Termografia - Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos
NBR 15763 (ABNT, 2009)	Ensaios não destrutivos - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência
NBR 15718 (ABNT, 2009)	Ensaios não destrutivos - Termografia - Guia para verificação de termovisores
NBR 15424 (ABNT, 2016)	Ensaios não destrutivos - Termografia – Terminologia

Fonte: Elaborado pela autora.

Alguns autores utilizaram a termografia infravermelha para identificar descolamento cerâmico em fachadas e obtiveram sucesso na detecção (AIDAR, 2019; BRIQUE, 2016; EDIS; FLORES-COLEN; DE BRITO, 2014; PAVÓN, 2017; VIÉGAS, 2015), mas para isso precisaram analisar imagens em vários horários do dia, testar diferentes distâncias e ângulos para obter termogramas que mostrassem os defeitos da fachada, pois a depender do horário, da posição do sol, da velocidade do vento, dos elementos do entorno e outros parâmetros, a termografia pode não expor os defeitos existentes.

Diante do exposto, será utilizada a termografia infravermelha na detecção dos descolamentos cerâmicos em fachadas, com o uso da simulação higrotérmica como ferramenta auxiliar na definição dos momentos e condições apropriadas para a realização das inspeções. A partir deste estudo espera-se também contribuir na definição de parâmetros para inspeção de fachadas com uso da termografia na cidade de Arcoverde-PE.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Utilizar a termografia infravermelha na identificação dos descolamentos cerâmicos em fachadas com o uso da simulação higrotérmica como ferramenta de apoio.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral é necessário estipular alguns objetivos específicos.

- Analisar a simulação higrotérmica das fachadas estudadas por meio do software WUFI Pro 6.5;
- Realizar a inspeção termográfica para identificar os descolamentos cerâmicos;
- Analisar a eficácia da simulação higrotérmica como ferramenta de apoio à termografia;
- Comparar a influência que as diferentes cores dos revestimentos cerâmicos exercem na detecção dos descolamentos.

1.3 Estrutura do texto

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos. Este capítulo tem um caráter introdutório, onde é apresentada a justificativa da pesquisa, bem como os objetivos geral e específicos.

No capítulo 2 são abordados os principais aspectos sobre descolamento dos revestimentos cerâmicos em fachadas, métodos tradicionais de inspeção de fachadas, influência da cor na

temperatura superficial do revestimento, termografia infravermelha e simulação higrotérmica no software WUFI pro.

No capítulo 3 está descrita a metodologia utilizada, assim como, o edifício estudo de caso, o sistema de revestimento da fachada, a coleta de dados para a realização da simulação higrotérmica e os parâmetros de entrada da câmera termográfica para a realização da inspeção.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e discussões da análise dos dados da simulação higrotérmica, inspeção termográfica, análise da eficácia da simulação higrotérmica como ferramenta auxiliar à termografia e a influência das diferentes cores dos revestimentos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do estudo e as sugestões para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Descolamento de revestimento cerâmico em fachadas

Dentre as manifestações patológicas em fachadas com revestimento cerâmico, a mais incidente e a mais estudada é o descolamento, pois este reduz a vida útil da edificação e é um fator de risco para as pessoas e carros que circulam no entorno do edifício (PACHECO; VIEIRA, 2017).

Bauer, Castro e Silva (2015) mapearam as anomalias de 90 fachadas na cidade de Brasília com o objetivo de apresentar uma metodologia de inspeção, identificação e quantificação dos problemas patológicos mais incidentes e concluíram que o descolamento cerâmico é a principal manifestação patológica responsável pelo envelhecimento precoce e degradação das fachadas.

Segundo Uliana *et al.* (2014), o descolamento do revestimento cerâmico se dá quando as tensões no revestimento excedem a capacidade de aderência das ligações entre a placa cerâmica e a argamassa colante e/ou emboço.

O descolamento cerâmico pode ocorrer por diversas causas, dentre elas: retração da argamassa do emboço, ausência ou má execução das juntas de dilatação, ausência de detalhes construtivos, não observação ao tempo em aberto da argamassa colante, absorção de água pelo revestimento cerâmico, gradiente de temperatura, diferentes coeficientes de dilatação do revestimento e suas camadas de suporte e instabilidade do próprio suporte (MOREIRA; MARCONDES, 2016).

Flores-Colen (2009) afirma que as variações de temperatura causam dilatação ou contração nos materiais. Os fenômenos cíclicos de dilatação e contração aumentam as tensões e podem levar o material à fadiga causando a perda de aderência entre as camadas do revestimento ou entre o revestimento e a base.

Para Zanoni (2015), é o gradiente térmico, gerado pela diferença de temperatura entre a face interna e externa da fachada, que estabelece a intensidade das tensões térmicas.

Ainda sobre as causas dos descolamentos, Sena *et al.* (2020) destacam que o preparo incorreto da base também ocasiona esta manifestação patológica e cita como exemplo uma prática bastante comum no Brasil, que é substituir o revestimento em pintura por revestimento cerâmico através de uma operação de picagem para incremento de rugosidade da superfície do revestimento pintado para assentamento da cerâmica. Esta prática de preparo da base é totalmente equivocada e leva ao descolamento e conseqüente deslocamento em pouco tempo. Para este caso, a forma adequada seria a retirada de toda a pintura e regularização da base nos pontos em que isso se fizer necessário.

2.2 Métodos tradicionais de inspeção

Os métodos de inspeção mais tradicionais utilizados para determinar a existência ou não de descolamento cerâmico são o ensaio de percussão e o de resistência de aderência à tração. Estes ensaios são satisfatórios para o mapeamento das fachadas, porém apresentam algumas desvantagens como: custo, tempo, infraestrutura para acessibilidade da fachada e risco à segurança do operário que precisa trabalhar em altura. Além disso, a confiabilidade do resultado do mapeamento das áreas com som cavo dependerá da experiência e comprometimento do trabalhador.

Conforme Andrade (2020), o trabalho de mapeamento e avaliação dos defeitos das fachadas choca-se com uma realidade de dificuldades na acessibilidade, por motivos como: transtornos causados pelos procedimentos utilizados na inspeção, grandes alturas, detalhes arquitetônicos que dificultam e algumas vezes impossibilitam o acesso por meio de balancim ou cadeirinhas, entre outros. Dessa forma, o uso de técnicas que não necessitam do contato direto com o objeto a ser analisado, como a termografia infravermelha, possui grandes vantagens com relação aos métodos tradicionais.

- **Ensaio de percussão**

De acordo com a NBR 13755 (ABNT, 2017, p. 32), “todas as placas devem ser analisadas por meio de percussão com instrumento não contundente (cabo de madeira, martelo de plástico duro) à procura de som cavo”. Caso ocorra o som cavo significa que houve perda de aderência da placa cerâmica e a mesma deve ser substituída.

- **Ensaio de resistência de aderência à tração**

Em conformidade com a NBR 13755 (ABNT, 2017), a resistência de aderência à tração simples é a tensão máxima resistida por um corpo de prova quando sujeito a esforço normal de tração simples. Este ensaio tem por finalidade verificar a qualidade do processo de produção do revestimento conforme o requisito de resistência mecânica.

2.3 A influência da cor na temperatura superficial de revestimentos cerâmicos

O revestimento cerâmico é um sistema que possui grande variedade de texturas, formatos e cores, podendo proporcionar composições diversificadas, resultando em edifícios de alta qualidade, principalmente quando aplicado em fachadas, de modo a garantir o desempenho funcional e compositivo da edificação e a durabilidade, com um custo acessível quando comparado a outras opções (PEIXOTO, 1992; JUST; FRANCO, 2001).

A cerâmica apresenta significativas vantagens, como durabilidade do material, facilidade de limpeza, qualidade do acabamento, estética agradável, isolamento térmico e acústico, proteção a superfícies vedadas, estanqueidade à água, além da enorme quantidade de opções em tamanhos, cores, etc. O desempenho e a durabilidade dos revestimentos cerâmicos estão ligados a um bom e detalhado projeto, acompanhado da escolha correta da cerâmica, qualidade dos materiais no assentamento e do rejunte, além da qualificação do profissional assentador e rejuntador (AMARAL *et al.*, 2018). Por isso o revestimento com placas cerâmicas em fachadas ainda é responsável pelo aparecimento de inúmeros casos de manifestações patológicas, apesar da evolução tecnológica na fabricação desse material e das mudanças e atualizações nas normativas que orientam a execução do sistema (LUZ, 2004; DONATO *et al.*, 2018).

Uma das principais manifestações patológicas encontradas nesse sistema é o deslocamento cerâmico, que pode ocorrer por diversas causas, como, falta de limpeza da base, baixa absorção do substrato, traço inadequado, tensões provocadas pela movimentação do revestimento e ausência de juntas de movimentação, atuando em conjunto ou separadamente. Para as fachadas essas características são ainda mais importantes, uma vez que interferem diretamente nas condições de habitabilidade da edificação, podendo oferecer desde risco de

acidentes a degradação do imóvel, pois controla e protege o ambiente interno das mais diversas intempéries (SACHT *et al.*, 2012).

A incidência do sol e da chuva nos panos de fachada pode acarretar em variações bruscas de temperatura que se caracterizam pelo choque térmico (ESQUIVEL, 2009). Para Medeiros e Sabbatini (1998), movimentos devido à ação da temperatura afetam a placa cerâmica e o sistema de revestimento cerâmico, além de outros componentes do sistema, especialmente as estruturas de concreto, metal e alvenaria. O sistema falha mais rápido com placas de cor escura do que com as de cor clara. Isso ocorre porque o coeficiente de absorção térmica da escura é maior, o que ocasiona maior concentração de calor na estrutura (MUÑOZ MOSCOSO, 2013). Ainda segundo Barth (2001), a cor exerce grande influência na percepção do edifício e pode contribuir para o desempenho térmico do sistema, sendo um dos aspectos compositivos mais relevantes.

2.3.1 Refletância solar e absortância solar

As edificações estão sujeitas a incidência de diversos comprimentos de onda, entre elas as emitidas pelo sol, que produz uma das principais fontes de radiação sob a forma de onda curta. O fluxo de calor gerado nas superfícies depende não só dessas temperaturas superficiais geradas pelas trocas de calor que ocorrem por radiação, mas também, pelas propriedades termo físicas dos elementos construtivos que compõem a estrutura, demonstrando a relevância dessas propriedades para a avaliação do comportamento térmico e do consumo energético dos edifícios (DORNELLES; RORIZ, 2007; CARNEIRO, 2016).

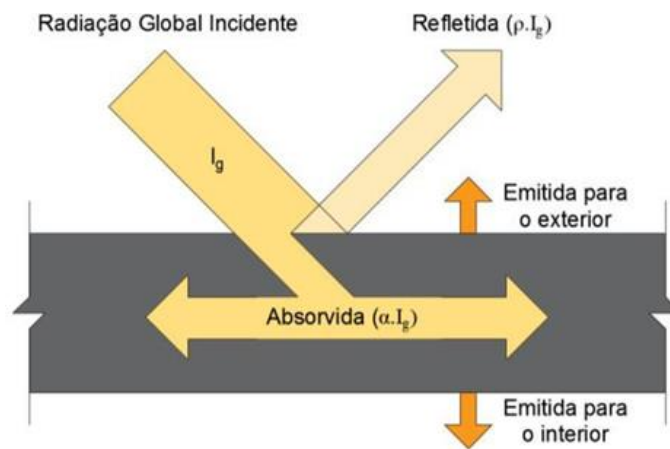
Para Dornelles e Roriz (2007) e Carneiro (2016), considerando as superfícies opacas, torna-se importante avaliar as seguintes propriedades térmicas: refletância solar (ρ) e absortância solar (α). A refletância solar é a razão entre a taxa de radiação solar refletida numa superfície e a taxa de radiação solar incidente na mesma (Equação 1), enquanto que a absortância solar, expressa na Equação 2, é a razão entre a taxa de radiação solar absorvida numa superfície e a taxa de radiação solar incidente na mesma. A refletância e a absortância apresentam valores compreendidos entre 0 e 1, sendo uma parcela da energia radiante que incide sobre um corpo opaco refletida e outra absorvida (Figura 1), e a soma dessas duas parcelas é igual a unidade

$(\alpha + \rho = 1)$, uma vez que são adimensionais, fato que permite determinar qualquer uma dessas propriedades a partir da outra.

$$\rho = \frac{\text{Radiação Solar Refletida}}{\text{Radiação Solar Incidente}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{\text{Radiação Solar Absorvida}}{\text{Radiação Solar Incidente}} \quad (2)$$

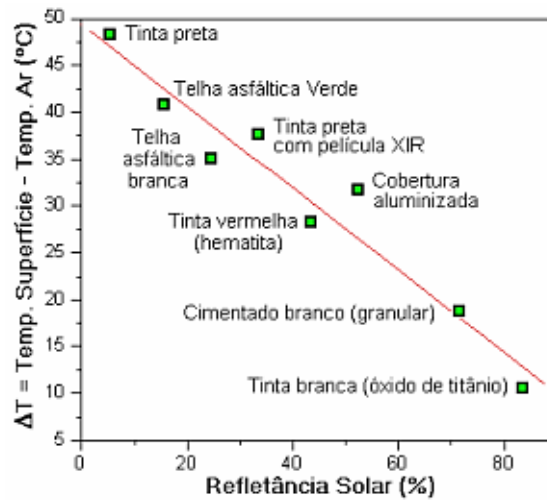
Figura 1 – Trocas de calor por radiação num material opaco.



Fonte: Carneiro (2016).

Na Figura 2, por exemplo, uma amostra com refletância solar próxima a 1,0 significaria que sua temperatura superficial não sofreria influência da radiação incidente, pois nenhuma radiação seria absorvida. Para a energia absorvida, sabe-se que uma parte será emitida como radiação de onda longa para fora e a outra parte será emitida internamente por condução ao longo do elemento constituinte. Assim como a absorvância depende do material, a emissividade também depende.

Figura 2 – Temperatura de superfícies expostas ao sol do meio-dia.



Fonte: Adaptado de Akbari, Levinson e Berdahl (1996) apud Dornelles e Roriz (2007).

Ao longo dos anos tem se pesquisado sobre as propriedades térmicas: refletância solar (ρ) e absorptância solar (α) de superfícies expostas à radiação solar, e sua importância nas temperaturas as quais podem atingir (REAGAN; ACKLAM, 1979; TAHA; SAILOR; AKBARI, 1992), sendo o foco maior dessas pesquisas (Quadro 2) apenas a refletância na faixa visível do espectro. Dados espectrais completos para materiais de construção são mais limitados.

Quadro 2 – Estudos sobre refletância.

Autores	Tema do Estudo
Touloukian, DeWitt e Hemicz (1972)	Dados espectrais de vários materiais.
Berdahl e Bretz (1997)	Materiais utilizados em coberturas de edifícios através de medidas espectrais de refletância, além de medir temperaturas superficiais externas de uma cobertura para demonstrar a correlação existente entre a refletância solar e a temperatura das superfícies expostas ao Sol.
Akbari, Levinson e Berdahl (1996)	Refletância e emitância infravermelha de materiais de construção, comparando seu estado estacionário e temperaturas na superfície.
Castro (2002)	Refletância solar para 19 diferentes cores de tintas de um mesmo fabricante do Brasil.
Ferreira e Prado (2003)	Refletância solar para materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil.
Dornelles e Roriz (2007)	Refletância espectral para 35 diferentes cores de tintas pintadas sobre pastilhas cerâmicas, para os intervalos do ultravioleta, visível, infravermelho e espectro solar total, além de propor um procedimento alternativo para identificar a absorptância solar de superfícies opacas.

Fonte: Elaborado pela autora.

A medição destas características pode ser efetuada, hoje em dia, por diferentes equipamentos e métodos. Em nível internacional, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) normaliza para a medição da refletância solar os seguintes métodos:

- ASTM E1918-06 (ASTM, 2015) “*Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-sloped Surfaces in the Field*” consiste em um método para a medição da refletância solar “*In Situ*” de superfícies horizontais ou de baixa inclinação (inferiores a 9,5° ou 16,7% em relação ao plano horizontal) usando um piranômetro (Figura 3).

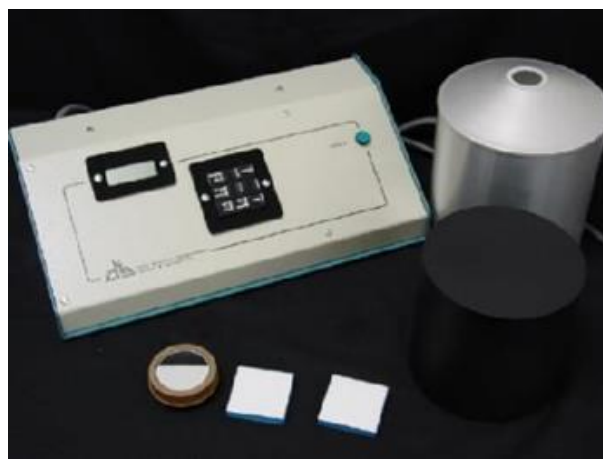
Figura 3 – Piranômetro LP02 da Adcon Telemetry (Adcon Telemetry)



Fonte: Carneiro (2016)

- ASTM C1549-09 (ASTM, 2014) “*Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer*”, consiste na medição da refletância solar de materiais planos e opacos através de um refletômetro solar portátil (Figura 4), também designado de SSR (Solar Spectrum Reflectometer).

Figura 4 – Reflectômetro.



Fonte: D&S (2009) apud Carneiro (2016)

- ASTM E903-12 (ASTM, 2020), “*Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres*”, consiste na utilização de um espectrofotômetro UV-VIS-NIR (Figura 5) equipado com esfera de integração para medir, em laboratório, a refletância ao espectro solar de uma superfície plana e homogênea de dimensões reduzidas.

Figura 5 – Espectrofotômetro UV-VIS-NIR Lambda 750 da Perkin Elmer.



Fonte: Perkin Elmer (2016) apud Carneiro (2016)

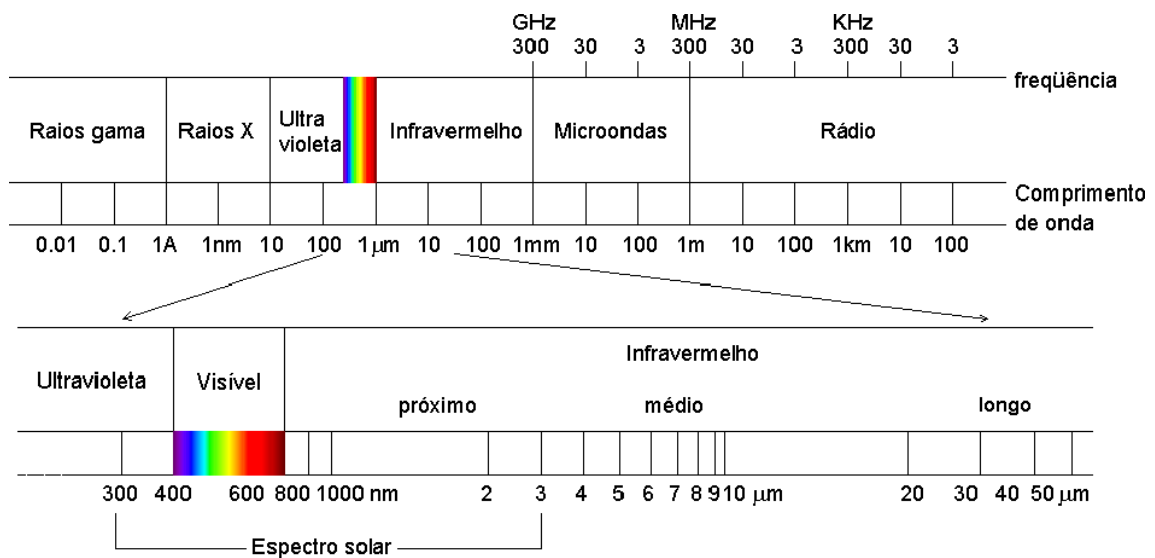
Existem ainda a ASTM E1980-11 (ASTM, 2019) “*Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-sloped Opaque Surfaces*”, para obtenção do índice de refletância solar (SRI), e o método alternativo E1918A que se trata de uma variação da norma internacional ASTM E1918-06 (ASTM, 2015). Uma vez que essa norma só pode ser aplicada a amostras de grandes dimensões, Akbari, Levinson e Stern (2008) propuseram um método que permite medir a refletância de superfícies circulares ou quadradas, com cerca de 1 m de diâmetro ou 1 m de lado (valores mínimos recomendados).

2.3.2 *Radiação Solar e Cores*

A radiação solar é a energia radiante em forma de conjunto de ondas eletromagnéticas curtas provenientes do sol. Ao atravessar a atmosfera terrestre, se propaga em todas as direções, podendo ser parte absorvida, espalhada ou refletida. Da radiação solar total, o que chega à superfície terrestre de fato é apenas uma parcela sob a forma de duas componentes: radiação direta (parcela que passou livremente pela atmosfera) e radiação difusa (parcela que foi dispersa pela atmosfera), sendo a sua soma designada de radiação global (CARNEIRO, 2016).

Estima-se que cerca de 99% da radiação solar corresponda a uma ampla faixa de comprimentos de onda de 300 nanômetros a cerca de 1 milímetro, conhecida como espectro solar, mas a energia emitida acima de 2.500 nanômetros é de pouca importância para a construção civil (Figura 6). Nesse caso, a faixa espectral de interesse inclui três regiões: ultravioleta, visível e infravermelho próximo. A região visível do espectro solar inclui uma faixa espectral bem definida, variando de 380 a 780 nanômetros, e é a região que sensibiliza o olho humano à visão de objetos. A intensidade da radiação solar varia ao longo do espectro, em função do clima e das condições atmosféricas, que se modificam frequentemente, como nebulosidade, vapor d'água, poluição, etc. (DORNELLES; RORIZ, 2007; CARNEIRO, 2016).

Figura 6 – Espectro Eletromagnético e Espectro Solar.



Fonte: Dornelles (2008)

Dependendo do comprimento de onda, a luz refletida por uma superfície pode ter diferentes percepções de cor, conforme mostrado na Tabela 1. Como a visão humana só pode perceber uma faixa estreita de radiação, ela não pode identificar a refletância ou absorção de objetos em todo o espectro solar. É importante medir a refletividade de uma superfície em todo o espectro, pois esta é uma função do comprimento de onda da radiação incidente; as cores, por outro lado, são percepção visual, portanto, podem variar entre diferentes observadores. Atualmente existem no mercado produtos que alteram as refletâncias, como pigmentos especiais que as aumentam. Ou seja, podem-se ter produtos com cores semelhantes e refletâncias muito diferentes. Portanto, embora seja possível estabelecer uma relação

aproximada entre cor e refletância, o mais correto é usar métodos para medir a refletância dessas superfícies (DORNELLES, 2008; FERREIRA; PRADO, 2003; PEREIRA *et al.*, 2015).

Tabela 1 – Cores percebidas e curva de sensibilidade do olho humano.

Cor	Comprimento de onda (nm)	Curva de Sensibilidade do Olho humano
Violeta	380-440	
Azul	440-490	
Verde	490-565	
Amarelo	565-590	
Laranja	590-630	
Vermelho	630-780	

Fonte: Dornelles e Roriz (2007)

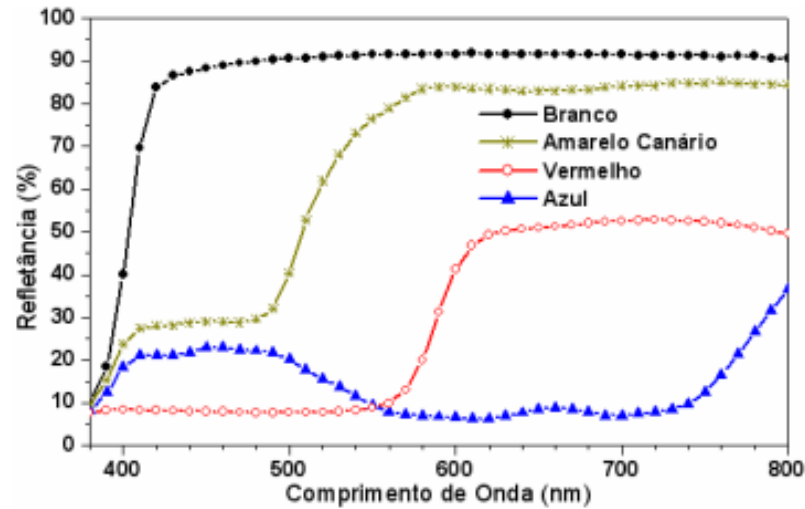
A refletância solar de uma superfície vai depender de vários fatores, tais como: comprimento de onda da radiação, ângulo de radiação incidente, cor, rugosidade da superfície, etc.

Segundo Pereira (2000) e Dornelles (2008), quando as células do olho humano captam a energia visível que é refletida pelos objetos e a converte em impulsos nervosos que são conduzidos para o cérebro, causam no observador uma reação psíquica e fisiológica, designada de “resposta cromática”. Esta resposta possui três características que são designadas de atributos das cores: matiz, saturação e claridade, seguidamente apresentadas de forma sucinta:

- matiz – frequentemente designada de cor e está relacionada com o tipo de “luz” que chega aos nossos olhos;
- saturação – corresponde ao grau de pureza das cores; e
- claridade – trata-se da variação entre claro e escuro das cores, e corresponde à quantidade de luz que chega aos nossos olhos.

Como exemplo, Dornelles e Roriz (2007) apresentam na Figura 7 a análise das curvas de refletância espectral de algumas amostras, cujas refletâncias na região visível (380 a 780 nm) são mais altas nos comprimentos de onda correspondentes a cada cor.

Figura 7 – Curvas de refletância espectral para diferentes cores de tinta na região visível.



Fonte: Dornelles e Roriz (2007)

As amostras pintadas de branco foram observadas refletindo uniformemente no espectro visível, mostrando que o branco reflete todas as cores que compõem essa região espectral. A tinta vermelha reflete comprimentos de onda acima de 600 nm, porque causam a percepção visual de vermelho. Por outro lado, amostras azuis refletem comprimentos de onda entre 400 e 500 nm, intervalo correspondente à sensação de azul. A tinta amarela canário reflete o comprimento de onda associada ao amarelo, acima de 550 nm. Para Dornelles e Roriz (2007), “apesar das amostras apresentarem o comportamento esperado para a região visível, suas refletâncias na região do infravermelho-próximo não obedecem ao mesmo padrão de comportamento”.

2.4 Termografia infravermelha

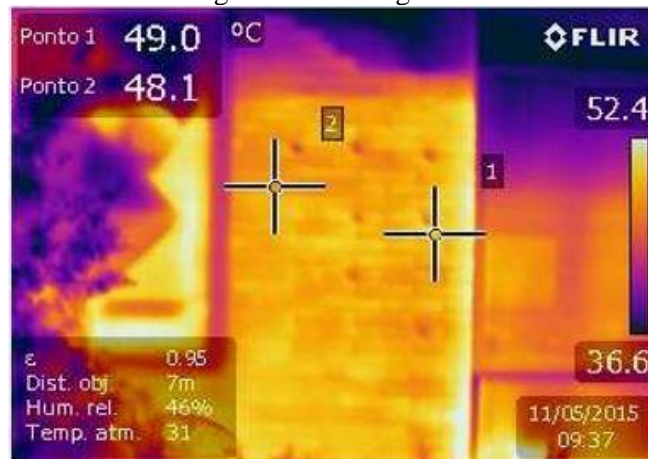
Segundo Brique (2016, p. 33):

A termografia por infravermelhos (TIR) é uma técnica utilizada para converter a radiação térmica emitida pela superfície de um objeto, que é invisível ao olho humano devido ao seu comprimento de onda, em imagens visuais detalhadas do perfil de temperaturas. Trata-se de uma técnica versátil, que permite identificar regiões ou pontos onde a temperatura se encontra alterada em relação a um padrão pré-estabelecido, baseando-se na medição da radiação que está sendo emitida.

As imagens visuais detalhadas do perfil de temperaturas são chamadas de termograma. O termograma é uma representação das temperaturas na superfície do alvo através da atribuição

de uma cor para cada temperatura. Cada pixel da imagem será referente a uma cor que não representa a cor do objeto real e sim a temperatura daquele ponto do objeto (AIDAR, 2019). O termograma pode ser apresentado em uma escala monocromática (cinza) ou policromática (cores), como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Termograma.



Fonte: Viégas (2015)

A termografia infravermelha possibilita a visualização de defeitos externos e internos próximos à superfície, pois estes ocasionam perturbações no fluxo de calor (IBARRA-CASTANEDO *et al.*, 2017). Isso acontece devido às diferenças de temperatura na superfície, geradas pelas diferentes propriedades térmicas de materiais ocultos ou entre as camadas dos revestimentos que podem facilitar ou dificultar o transporte de calor; dessa forma, os descolamentos cerâmicos conseguem ser visualizados nos termogramas devido à pequena espessura da maior parte dos materiais utilizados no sistema e devido à presença de ar entre as camadas que é resultado da perda de aderência (AIDAR, 2019).

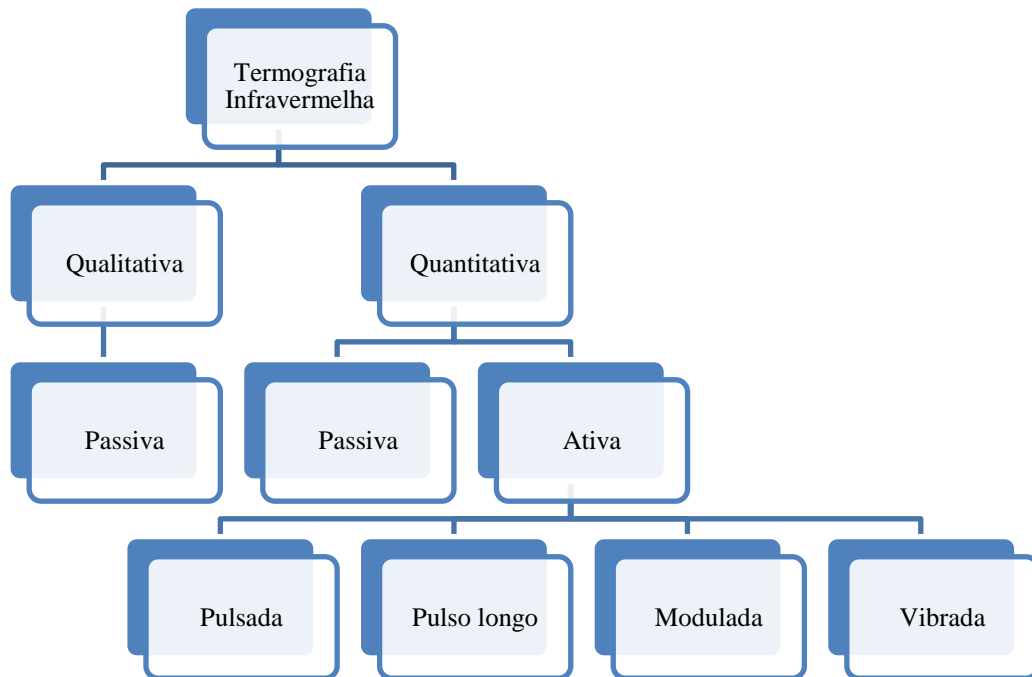
Para a realização do ensaio de termografia é utilizada uma câmera termográfica que permite a captação da radiação térmica emitida pelo objeto, não sendo necessário um período de estabilização das temperaturas nem de contato com a superfície analisada (SILVA, 2012).

2.4.1 Classificação da termografia infravermelha

A termografia infravermelha pode ser classificada quanto à forma de análise dos termogramas em: qualitativa e quantitativa. E quanto ao estímulo térmico em: ativa e passiva. Na Figura 9

pode ser observado um esquema resumido em forma de fluxograma da abordagem das inspeções termográficas de acordo com sua classificação.

Figura 9 – Fluxograma de Classificação da termografia



Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com Pavón (2017), a seleção do tipo de análise a ser utilizada vai depender do problema patológico que será estudado e do objetivo da inspeção termográfica.

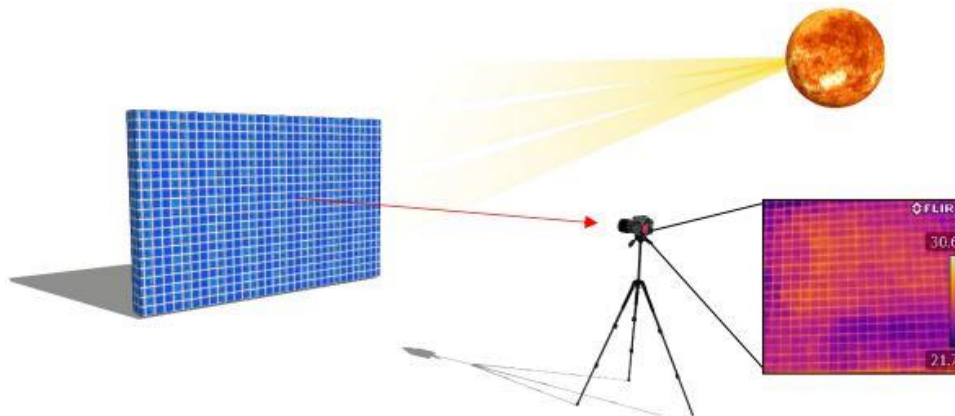
A termografia qualitativa é baseada na diferença de cor entre as áreas, o que indica diferença de temperatura, porém as temperaturas não são mensuradas; é uma análise visual do termograma (BAGAVATHIAPPAN *et al.*, 2013). É utilizada para identificar se existe algum defeito e onde está localizado. Caso precise determinar a gravidade de uma anomalia, é necessário o uso da termografia quantitativa.

A termografia quantitativa trabalha com o valor da temperatura ou a diferença numérica de temperatura em regiões diferentes do objeto alvo, fazendo-se necessário obter com muita precisão as temperaturas no termograma e realizar os devidos ajustes e medições dos parâmetros termográficos de medição, como: emissividade, distância, temperatura refletida, umidade relativa, entre outros (BAUER *et al.*, 2014).

Quanto ao estímulo térmico, a termografia se divide em passiva e ativa. A termografia passiva é aquela que não necessita de estímulo artificial; deve existir uma diferença natural de temperatura entre o objeto estudado e o meio no qual ele está inserido, ou seja, o método passivo conta com condições naturais do alvo e do seu entorno, tendo como fator determinante o calor do sol (CORTIZO, 2007).

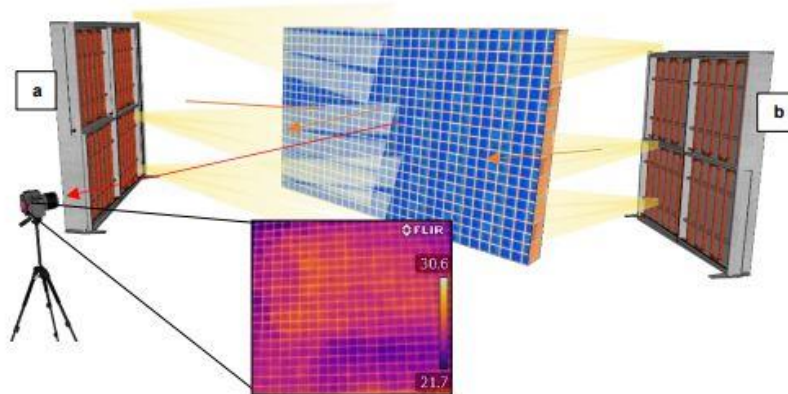
No caso da termografia ativa, necessita de um estímulo externo para gerar diferenças significativas de temperatura. É utilizado em casos que se desejem resultados quantitativos. Técnicas diferentes de estimulação térmica podem ser utilizadas para causar um fluxo de calor no objeto estudado, cada uma com suas limitações e características próprias (PEDRA, 2011). Nas Figura 10 e Figura 11 encontram-se esquematizados os processos de termografia passiva e ativa, respectivamente.

Figura 10 – Ilustração da técnica de termografia passiva com fluxo térmico de indução natural através do sol.



Fonte: Andrade (2020).

Figura 11 – Ilustração da técnica de termografia ativa com fluxo térmico de indução artificial através de painel radiante: (a) fonte posicionada a frente da superfície em análise; (b) fonte posicionada posterior à superfície.



Fonte: Andrade (2020).

Os estímulos externos mais utilizados são: pulsado, pulso longo, modulado e vibrado (PAVÓN, 2017). A termografia pulsada é a mais tradicional e consiste na modificação rápida da temperatura do material pelo pulso térmico instantâneo, avaliando-se os padrões de resfriamento da superfície. Na termografia de pulso longo, objetivando observar em um período de tempo maior as modificações na superfície do material, o regime de aquecimento é contínuo e prolongado, analisando-se as etapas de aquecimento e de resfriamento (BAUER *et al.*, 2014).

Na termografia modulada, um perfil de aquecimento modulado sinusoidal é aplicado; esta técnica baseia-se em ondas térmicas geradas no interior da amostra. Na termografia vibrada são induzidas vibrações mecânicas externas para avaliar as mudanças de temperatura, resultantes do calor liberado nas regiões com defeitos (MALDAGUE, 2001).

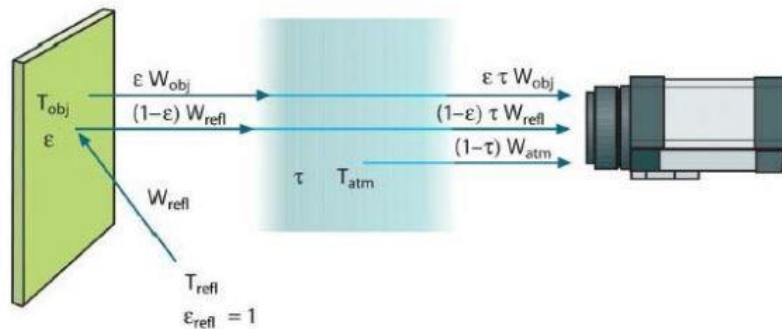
2.4.2 Fatores que influenciam na medição termográfica

A termografia infravermelha é uma ótima técnica para medição da temperatura superficial dos objetos, porém apresenta dificuldades que podem levar a medidas e conclusões equivocadas, fazendo-se necessário tomar as devidas precauções (SERRA *et al.*, 2014).

A câmera termográfica capta as radiações infravermelhas que são emitidas pela superfície do objeto alvo, assim como, capta as radiações emitidas pelo meio adjacente que reflete na

superfície e pela atmosfera (SANTOS, 2014). A Figura 12 ilustra as radiações que são captadas pela câmera.

Figura 12 – Representação esquemática de uma medição termográfica



Fonte: Asdrubali, Baldinelli e Bianchi (2012)

A potência total da radiação medida pela câmera (W_{tot}), apresentada na Figura 12, é formada pelos fatores influentes entre a câmera, a superfície do objeto e a atmosfera conforme a Equação 3:

$$W_{tot} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{ref} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (3)$$

Onde:

ε = emissividade

τ = coeficiente de transmissibilidade da atmosfera

W_{obj} = energia radiada a partir do objeto

W_{ref} = energia refletida a partir dos corpos vizinhos

W_{atm} = energia relativa à absorção da atmosfera

Para que a temperatura seja medida com precisão é necessário compensar os efeitos de diferentes fontes de radiação. O processo é feito automaticamente pela câmera, mas para isso os seguintes parâmetros devem ser inseridos: emissividade, temperatura aparente refletida, temperatura atmosférica, umidade relativa e distância entre o objeto e a câmera (FLIR SYSTEMS, 2014).

- **Emissividade**

Emissividade é um parâmetro adimensional que pode variar de 0 (refletor perfeito – espelho) à 1 (emissor perfeito – corpo negro) e estabelece a relação entre a quantidade de energia irradiada por um corpo em análise e a que seria emitida por um corpo negro, à mesma temperatura e comprimento de onda (AIDAR, 2019; AVDELIDIS; MOROPOULOU, 2003).

A emissividade se relaciona diretamente com o comprimento de onda, ou seja, cada material emite energia em um dado comprimento de onda e absorve uma quantidade diferente em outro. Comprimentos de onda pequenos são mais sensíveis a temperaturas maiores que a ambiente, e grandes comprimentos de onda são mais sensíveis a temperaturas menores que a ambiente. Os materiais comumente usados na construção civil, como o concreto e a argamassa, possuem altos valores de emissividade (AVDELIDIS; MOROPOULOU, 2003; SILVA *et al.*, 2006).

Segundo Andrade (2020), dentre os materiais mais utilizados na construção civil, os revestimentos possuem emissividade acima de 0,8, porém pode sofrer mudanças significativas com relação à temperatura de análise devido à cor (clara ou escura) e o tipo de superfície (lisa, rugosa, esmaltada, limpa ou suja).

- **Temperatura aparente refletida**

A temperatura aparente refletida é aquela que provém dos elementos emissores no meio adjacente ao objeto alvo (SILVA *et al.*, 2006). Segundo Meola *et al.* (2005), esse parâmetro é necessário para compensar outros a fim de diminuir efeitos prejudiciais durante a análise, como baixa emissividade do material ou distância muito grande entre o objeto e a câmera termográfica.

- **Temperatura atmosférica**

A temperatura atmosférica é aquela que provém da própria atmosfera entre a câmera e o objeto. Segundo FLIR SYSTEMS (2014), a atmosfera existente entre a câmera e o objeto em estudo tende a amortecer a radiação devido à absorção de gases e ao espalhamento das

partículas. De maneira análoga, apesar da atmosfera normalmente transmitir muito bem a luz visível, nuvens, chuva e neve, pode impedir a visualização de objetos distantes; o mesmo princípio aplica-se a radiação infravermelha. Portanto, se nenhuma correção para a atenuação for feita, o erro associado à temperatura medida por termografia é proporcional à distância entre o termovisor e o objeto.

- **Umidade relativa**

A câmera termográfica pode compensar o fato de a transmitância atmosférica depender, em parte, da umidade relativa do ar. Dessa forma, sabendo-se o valor da umidade, é possível inseri-la nas opções de comando do equipamento (MALDAGUE, 2001; MEOLA *et al.*, 2005).

- **Distância entre o objeto e a câmera**

A distância entre o objeto e a câmera é um fator muito importante a ser considerado. Este parâmetro é inserido na câmera termográfica para compensar o fato da transmitância atmosférica cair quando a distância aumenta e também parte da radiação emitida pelo objeto ser absorvida pela atmosfera (MALDAGUE, 2001; MEOLA *et al.*, 2005).

2.5 Uso da simulação higrotérmica como ferramenta de apoio a termografia

Um dos principais desafios para a utilização da termografia passiva como técnica de inspeção é a escolha do momento e das condições apropriadas para a detecção das anomalias (BAUER *et al.*, 2016; PAVÓN, 2017). Isso ocorre devido aos fenômenos de ganho e perda de calor que ocorrem de forma dinâmica nos edifícios, tendo como principal fator a variação da incidência solar (AIDAR, 2019).

Diante da dificuldade de encontrar o momento mais propício para detecção dos defeitos, pesquisadores como Aidar (2019), Nascimento (2016) e Pavón (2017) estudaram o uso da simulação higrotérmica, através do software WUFI Pro, como ferramenta de auxílio à termografia, analisando o comportamento dos gradientes de temperatura entre as camadas das fachadas, para identificação dos períodos mais apropriados para as inspeções termográficas.

Segundo Pavón (2017), existe o fluxo de calor direto e inverso. No fluxo direto, o calor vai de fora para dentro das camadas da fachada, e nesse caso é necessário um gradiente térmico, entre a superfície da fachada e a superfície mais externa do bloco cerâmico, igual ou superior a $0,6^{\circ}\text{C}$, para que as anomalias possam ser detectadas. Já no fluxo inverso, que ocorre quando o calor vem de dentro para fora das camadas, é preciso um gradiente térmico igual ou inferior a $-2,5^{\circ}\text{C}$ entre a superfície da fachada e a superfície mais externa do bloco cerâmico para visualizar os defeitos existentes.

Em conformidade com Pavón (2017), numa inspeção o intervalo de tempo para avaliação das anomalias depende das seguintes variáveis: orientação da fachada, características das camadas componentes da fachada, condições climáticas e momento do ano. “Todas essas variáveis podem ser analisadas através da simulação higrotérmica, o que justifica o uso dessa ferramenta previamente à inspeção de fachadas” (AIDAR, 2019, p. 15).

O WUFI (*Wärme Und Feuchte Instationär*), que significa transporte transiente de calor e umidade, é um conjunto de softwares de simulação higrotérmica desenvolvidos pelo Instituto Fraunhofer de Física das Construções, na Alemanha (*Fraunhofer Institute for Building Physics-IBP*) (NASCIMENTO, 2016).

O WUFI Pro é um dos programas da família de softwares da WUFI; ele realiza cálculos higrotérmicos unidimensionais nas seções transversais dos componentes dos edifícios levando em consideração fatores como: umidade embutida, chuva forte, radiação solar, radiação de onda longa, transporte capilar e condensação de verão. Estes efeitos não são considerados em outros programas e métodos tradicionais de simulação higrotérmica que se limitam a avaliar apenas os efeitos da condensação de inverno. O WUFI Pro determina o desempenho higrotérmico de componentes de construção sob condições climáticas reais. Este tipo de análise higrotérmica dinâmica abrangente é exigida, por exemplo, pela norma DIN EN 15026 (DIN, 2007) (FRAUNHOFER, 2019).

A DIN EN 15026 – Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation - estabelece requisitos e

critérios para análise higrotérmica das edificações; o software WUFI Pro 5.3 atende a todos esses requisitos e critérios (DIN, 2007).

O WUFI realiza as simulações higrotérmicas através da discretização de equações diferenciais por meio do método dos volumes finitos implícito de forma iterativa. Nas Equações 4 e 5 utilizadas, os termos do lado esquerdo são referentes ao armazenamento e os termos do lado direito são referentes ao transporte (WUFI PRO 5.3, 2013; ZANONI, 2015).

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D\varphi \nabla \varphi + \delta p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (4)$$

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + hv \nabla (\delta p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad \frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T) + hv \nabla (\delta p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D\varphi \nabla \varphi + \delta p \nabla (\varphi p_{sat}))$$

Onde:

w - Teor de água (kg/m³);

φ - Umidade relativa (%);

t – Tempo (s);

Dφ - Coeficiente de transferência de água líquida (kg/m.s);

δp - Permeabilidade ao vapor (kg/m.s.Pa);

p_{sat} - Pressão de vapor de saturação (Pa);

H – Entalpia (J/m³);

T – Temperatura (Kelvin);

λ - Condutibilidade térmica (W/m.K);

hv - Calor latente com mudança de estado - evaporação (J/kg).

O lado esquerdo da Equação 4 traz o armazenamento de umidade proporcional à derivada da curva de armazenamento de umidade. O lado direito traduz as condições de transporte caracterizadas pela diferença de fluxo líquido e vapor d'água. Já na equação 5 é mostrado o equilíbrio de calor através da derivada da entalpia em função da temperatura no tempo, e no lado direito, abrange a capacidade calorífica do material seco e a entalpia da água absorvida (JORNE, 2010; WUFI ONLINE HELP, 2021).

Delgado *et al.* (2010) fizeram uma revisão dos quatorze softwares de simulação higrotérmica disponíveis para o público em geral. Estes programas utilizam diferentes modelos e propriedades para simulação do transporte de calor e umidade em uma ou mais dimensões. Dentro desse levantamento observaram que o WUFI se destaca por ser um dos softwares que apresenta mais propriedades analisadas e consideradas em seu modelo, sendo dez propriedades para os materiais e para condições de contorno.

Ainda de acordo com levantamento feito por Delgado *et al.* (2010), o modelo considera como propriedades analisadas do material: densidade de massa, porosidade, calor específico, condutividade térmica, curva higroscópica, permeabilidade ao vapor d'água, difusividade líquida, fator de resistência à difusão, condutividade de água e capacidade higroscópica específica. O modelo considera também propriedades para as condições de contorno, sendo para condições externas: temperatura, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento, direção do vento, precipitação, trocas por onda longa e índice de nebulosidade. E para condições internas: temperatura e umidade relativa.

A norma DIN EN 15026 (DIN, 2007) estabelece alguns critérios para calcular a transferência de calor e umidade e chama atenção para a importância da definição correta dos dados de entrada das simulações higrotérmicas que se referem aos materiais e as condições de contorno para que os resultados mostrem as verdadeiras condições de campo (NASCIMENTO, 2016).

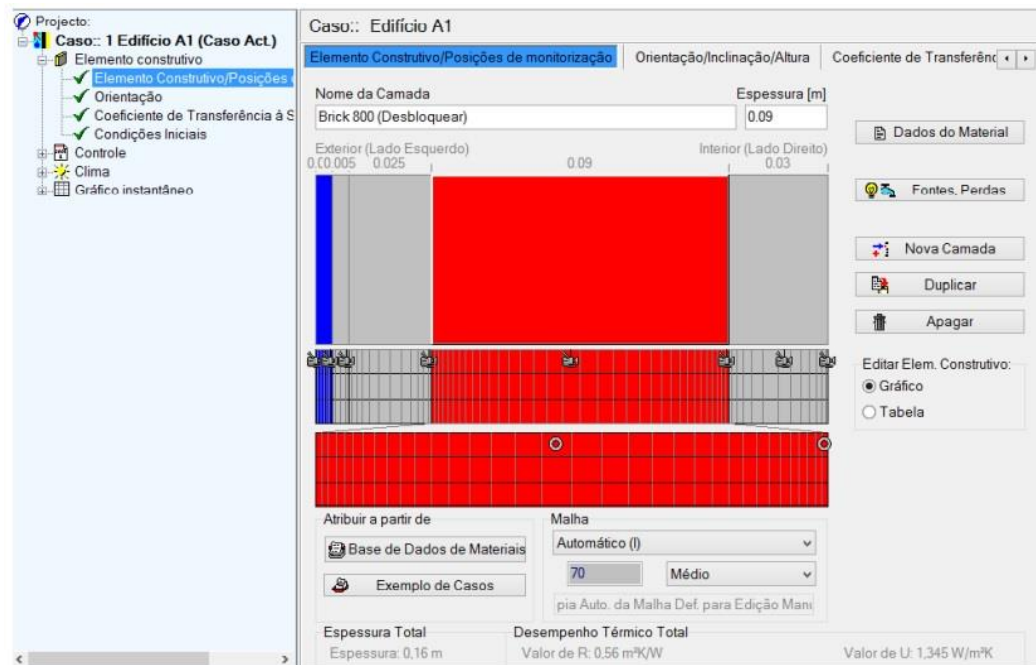
Em conformidade com Freitas *et al.* (2008), há uma dificuldade em se determinar as propriedades de alguns materiais. Devido a essa dificuldade, a introdução da interface dos elementos é simplificada. Esse fato mostra que apesar dos bons resultados que geralmente apresentam, as simulações devem ser utilizadas de maneira cautelosa, com definição das condições iniciais de forma adequada para que não haja equívoco com relação aos resultados.

De acordo com Nascimento (2016), com relação às propriedades dos materiais e componentes de construção, o próprio WUFI disponibiliza uma extensa lista, porém, ainda assim há uma dificuldade, pois o software retrata condições climáticas típicas de outros países sendo necessária a determinação de algumas propriedades dos materiais em laboratório o que dificulta a utilização da simulação.

Nas Figura 13 a Figura 20 são apresentadas telas do software WUFI Pro na definição dos parâmetros.

A tela da Figura 13 refere-se aos primeiros dados de entrada que devem ser definidos no programa que são as camadas do elemento construtivo utilizado, bem como a espessura e os dados de densidade aparente, calor específico, porosidade, condutibilidade térmica, resistência à difusão do vapor de água e curva higroscópica dos materiais componentes do sistema. Nesta etapa definem-se também as posições de monitoramento, ou seja, as posições em que se quer obter os resultados.

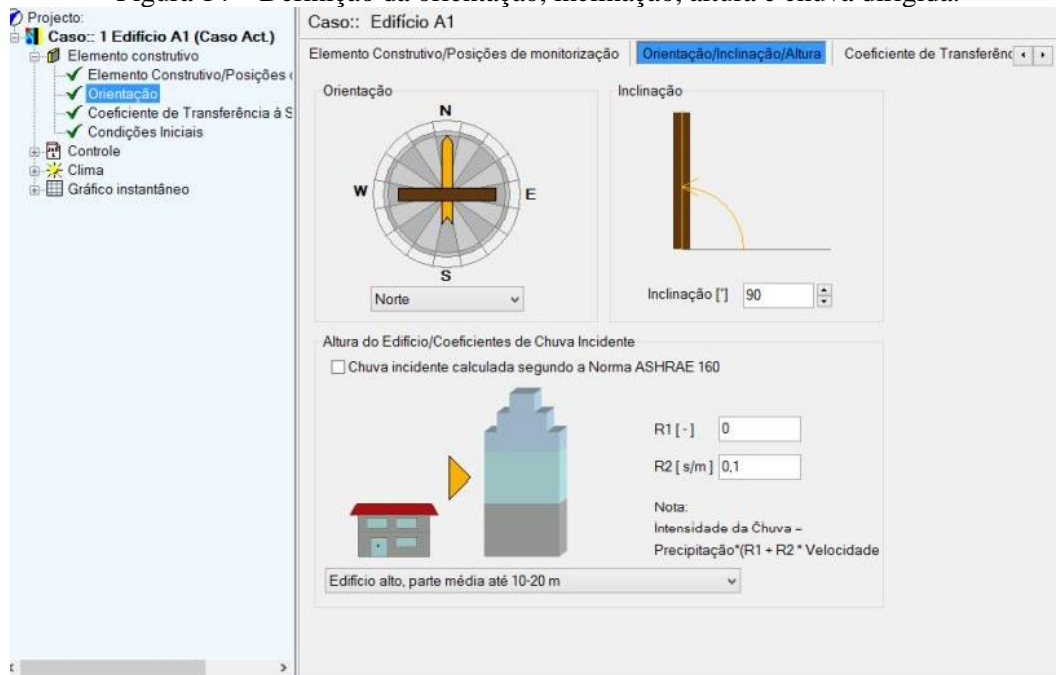
Figura 13 – Definição do elemento construtivo e posições de monitoramento



Fonte: Nascimento (2016)

Na Figura 14, são definidas a orientação, a inclinação e a altura da fachada onde se deseja realizar a simulação higtotérmica. A chuva dirigida é calcula pelo software a partir dos dados inseridos.

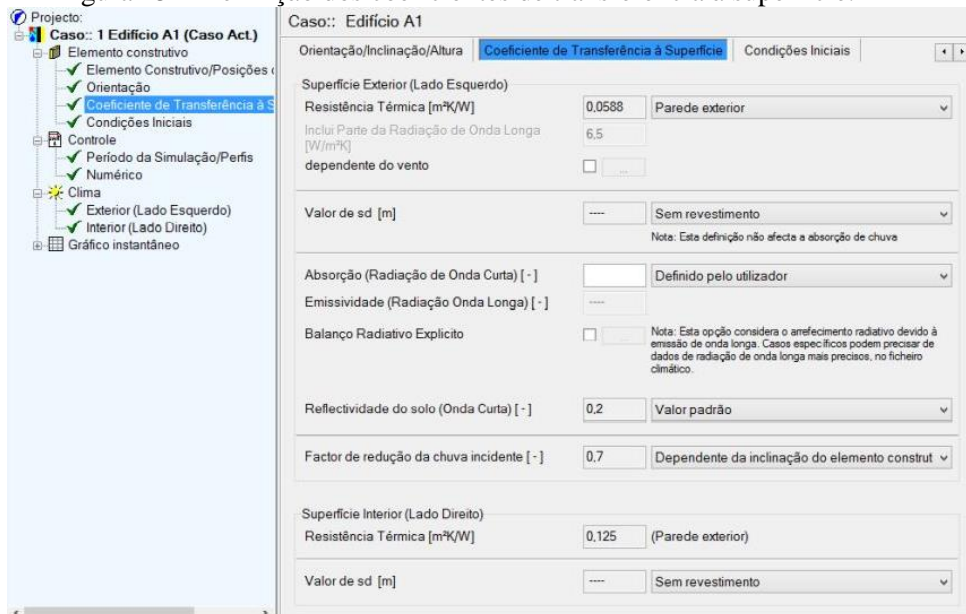
Figura 14 – Definição da orientação, inclinação, altura e chuva dirigida.



Fonte: Nascimento (2016)

Na Figura 15, para cada parâmetro existem valores já definidos pelo WUFI de acordo com a opção seleccionada, como, por exemplo, o parâmetro resistência térmica onde, para a opção “Parede exterior”, o valor é 0,0588 m²K/W. Mas, existe também a opção “Definida pelo utilizador”, onde o próprio usuário insere o valor.

Figura 15 – Definição dos coeficientes de transferência à superfície.



Fonte: Nascimento (2016)

Na tela apresentada na Figura 16, define-se a umidade e a temperatura inicial e a forma como elas irão se comportar nas camadas do sistema, ou seja, se serão constantes através do elemento, se vão mudar em cada camada ou se será inserido algum ficheiro.

Figura 16 – Definição das condições iniciais para a simulação.

Teor de Humidade Inicial nas diferentes Camadas			
N.º	Material Camada	Espessura [m]	Humidade Teor [kg/m³]
1	Placa cerâmica	0.005	1,44
2	Argamassa colante	0.005	30,7
3	Argamassa	0.025	26,0
4	Bloco cerâmico	0.09	13,0
5	Argamassa	0.03	26,0

Fonte: Nascimento (2016)

Na tela da Figura 17 é definido o período em que se deseja realizar a simulação, no caso de Nascimento (2016), utilizou-se o período de três anos.

Figura 17 – Definição do período de simulação.

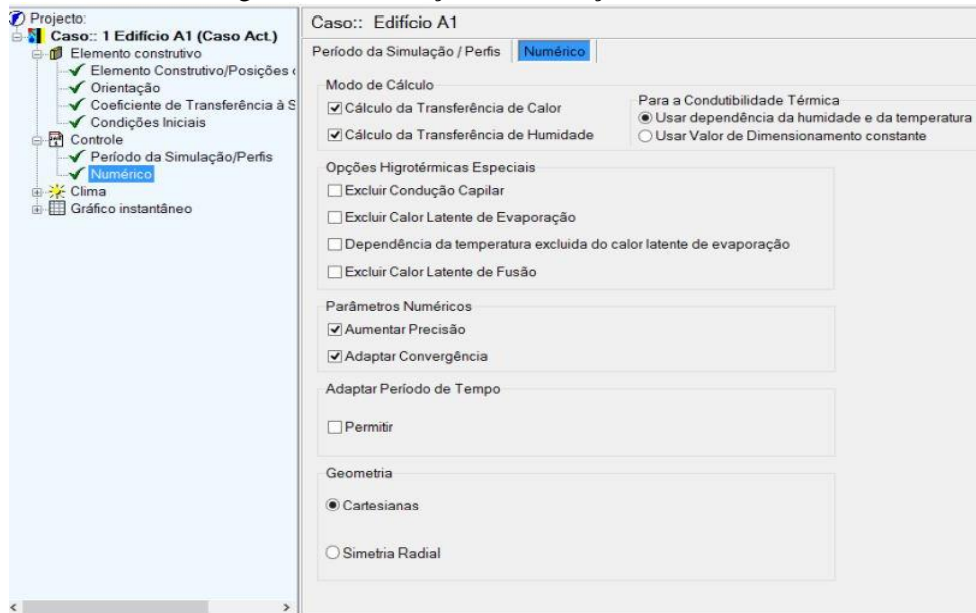
Início & Fim / Perfis			
Cálculo	Perfis	Data	Hora
Início	Perfil 1	01/01/2015	00:00:00
Fim	Perfil 2	01/01/2018	00:00:00
			04/08/2016 00:00:00

Intervalos Tempo[h] 1

Fonte: Nascimento (2016)

Na tela apresentada na Figura 18 marcam-se as opções desejadas das condições de cálculo para a simulação.

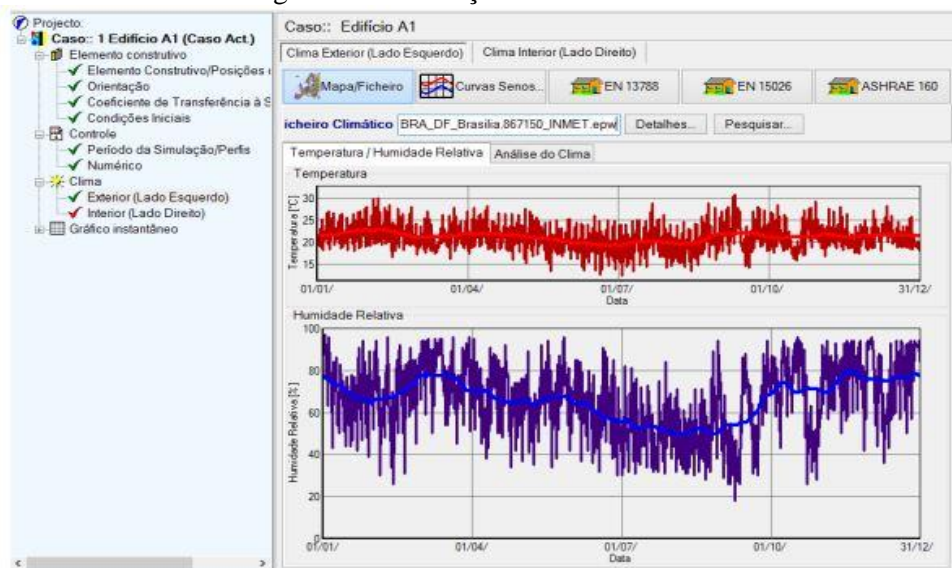
Figura 18 – Definição das condições de cálculo.



Fonte: Nascimento (2016)

Na tela da Figura 19, o clima exterior é definido, ou através dos próprios dados disponibilizados pelo programa para alguns locais ou através da inserção de um ficheiro climático do local desejado.

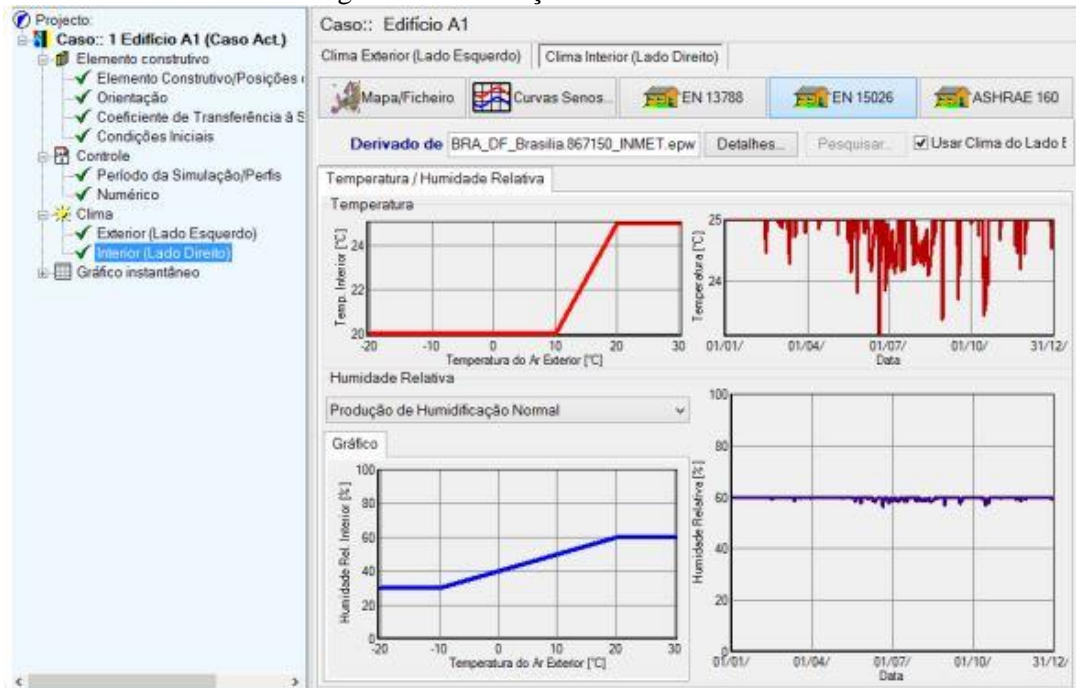
Figura 19 – Definição do clima exterior



Fonte: Nascimento (2016)

Na tela da Figura 20, define-se o clima interior utilizando o mesmo ficheiro climático do clima exterior e o usuário escolhe a norma para a qual o clima interior será calculado, que pode ser a DIN EN 13788 (DIN, 2012), DIN EN 15026 (DIN, 2007) ou ASHRAE 160 (ASHRAE, 2009).

Figura 20 – Definição do clima interior



Fonte: Nascimento (2016)

3 METODOLOGIA

Visando alcançar os objetivos propostos, a pesquisa foi realizada nas seguintes etapas:

- Seleção de edificação de fachada com revestimento cerâmico de cores diferentes;
- Identificação das características do edifício e das camadas componentes da fachada;
- Coleta dos dados de entrada necessários para realização da simulação higrotérmica no WUFI Pro 6.5;
- Simulação higrotérmica no WUFI Pro 6.5;
- Determinação dos parâmetros de entrada da câmera termográfica;
- Inspeção termográfica;
- Análise dos resultados.

A escolha da edificação levou em consideração alguns requisitos como altura do edifício, devido às limitações da câmera termográfica a ser utilizada, e apresentação de fachada com revestimento cerâmico de mais de uma cor, visando analisar a influência que as diferentes cores exerciam na detecção dos descolamentos.

Após a análise desses requisitos, escolheu-se um edifício de seis pavimentos, com revestimentos cerâmicos de três tipos, apresentando cores e dimensões diferentes, no qual foi realizada a simulação higrotérmica e posteriormente a inspeção termográfica. Os períodos apropriados para realização da inspeção termográfica foram definidos com base nos dados obtidos pela simulação higrotérmica.

O edifício selecionado está localizado no Centro da cidade de Arcoverde, no Sertão de Pernambuco, situada a Oeste da capital Recife e distante desta 256 km. O município possui as seguintes coordenadas geográficas: Latitude: 8° 25' 10" Sul, Longitude: 37° 3' 55" Oeste e está situado a uma altitude de 639 m (DADOS DO MUNICÍPIO, 2022).

A cidade possui precipitação média anual de 332 mm, sendo abril o mês de maior precipitação, com média de 50 mm, e setembro, o de menor precipitação, com média de

8 mm; possui temperatura média anual em torno de 23,5°C e clima Bsh ou semiárido quente, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (CLIMA ARCOVERDE, 2022).

Vale destacar que esta dissertação não teve como objetivo a análise extensiva das propriedades higrotérmicas da edificação. A simulação foi utilizada como ferramenta de apoio à termografia infravermelha para identificar os períodos mais propícios para realização das inspeções e, conseqüentemente, identificação dos descolamentos cerâmicos.

3.1 Descrição do edifício e do sistema de revestimento de fachada

O edifício, objeto deste estudo, começou a ser construído em 2010, porém ainda não foi concluído por questões de inadimplência, pois o projeto inicial foi feito através de um consórcio. O edifício possui térreo vazado, onde serão as garagens, e seis pavimentos tipo com quatro apartamentos por andar, com uma área de 110 m² cada, e área total de 420 m² por pavimento. A área construída total tem aproximadamente 2.600 m².

As fachadas possuem composição variando entre a forma parabólica e a forma plana. A primeira é predominantemente encontrada na fachada Sul, e a última prevalece nas demais, havendo detalhes arquitetônicos em reentrâncias e saliências e cheios e vazios, como podem ser vistos da Figura 21 a Figura 23. O sistema de revestimento de fachada é caracterizado como revestimento aderente, constituído de chapisco, emboço, argamassa colante, placas cerâmicas e rejunte cimentício entre estas. A fachada Norte não foi estudada devido à falta de acesso.

Figura 21 – Fachada sul (frente do edifício).



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 22 – Fachada oeste (lateral).



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 23 – Fachada leste (lateral).



Fonte: Elaborado pela autora

O revestimento final da fachada é composto por placas cerâmicas de três tipos, sendo, cerâmica na cor marrom com dimensões (50 x 50) cm na fachada frontal, cerâmica marrom com (25 x 60) cm nas fachadas laterais e cerâmica branca de (45 x 45) cm em todas as fachadas. A área com revestimento amadeirado é de aproximadamente 350 m², e o revestimento branco é de aproximadamente 1.000 m². O revestimento começou a deslocar três meses após sua finalização.

3.2 Coleta de dados para realização da simulação higrotérmica

Após a escolha da edificação foram coletados dados das condições climáticas da cidade, características do edifício e dos componentes das fachadas. Estes dados foram os parâmetros de entrada do software WUFI para realização da simulação higrotérmica. O Quadro 3 apresenta uma síntese desses parâmetros.

Quadro 3 – Parâmetros de entrada para simulação higrotérmica.

Dados de entrada	Parâmetro
Definição do edifício	Localização
	Orientação
	Inclinação
	Altura
	Tipo do revestimento
	Idade
Definição do elemento construtivo	Camadas de revestimento
	Posições de monitoramento
Propriedades higrotérmicas dos materiais	Densidade aparente
	Porosidade
	Permeabilidade ao vapor de água
	Coefficiente de absorção
	Curva higroscópica
	Absortância
Clima	Ano meteorológico típico (TMY)

Fonte: Adaptado de Aidar (2019)

Coletados os dados e inseridos no programa, as simulações higrotérmicas foram realizadas.

3.2.1 Elemento construtivo

Os dados de entrada referentes ao sistema de revestimento cerâmico inseridos no programa estão descritos na Tabela 2

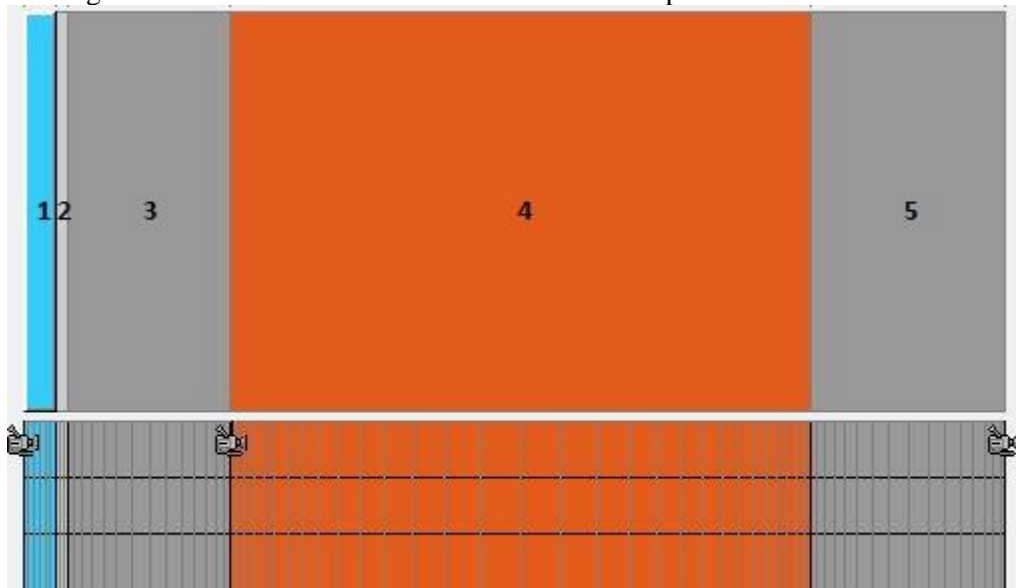
Tabela 2 – Elemento construtivo (Sistema de revestimento cerâmico).

MATERIAL	CAMADA	ESPESSURA (m)
PLACA CERÂMICA	1	0,005
ARGAMASSA COLANTE	2	0,002
ARGAMASSA DE REGULARIZAÇÃO EXTERNA	3	0,025
BLOCO CERÂMICO	4	0,09
ARGAMASSA DE REVESTIMENTO INTERNO	5	0,03

Fonte: Elaborado pela autora

Para obtenção dos dados de temperatura, foram colocados três pontos de monitoramento nas camadas. Estes pontos de monitoramento bem como o corte esquemático das camadas podem ser vistos na Figura 24.

Figura 24 – Camadas do sistema de revestimento e pontos de monitoramento



Fonte: Elaborado pela autora

Os números de 1 a 5 na imagem representam, respectivamente, as camadas componentes do sistema e as câmeras contidas em uma malha na parte inferior da imagem representam as posições de monitoramento.

3.2.2 *Propriedades higrotérmicas dos materiais*

O WUFI PRO 6.5 apresenta um extenso banco de dados com propriedades higrotérmicas dos materiais de construção, porém, as características contidas são de materiais de outros países. Devido a esse fato, sabendo que o processo de fabricação e conseqüentemente as propriedades dos materiais são diferentes, faz-se necessário obter algumas propriedades dos componentes do sistema de revestimento cerâmico.

As propriedades básicas necessárias para a simulação higrotérmica são: massa específica aparente, porosidade, permeabilidade ao vapor de água para o cálculo do fator de resistência à difusão de vapor de água, coeficiente de absorção de água e curva higroscópica. Os dados utilizados foram os mesmos de Nascimento (2016) e Aidar (2019) que foram obtidos do relatório interno de Bauer, Nascimento e Castro (2015), do Laboratório de Materiais da Universidade de Brasília (Tabela 3).

Tabela 3 – Propriedades higrótérmicas dos materiais

	Placa cerâmica	Argamassa colante	Argamassa externa e interna	Bloco cerâmico
Massa específica aparente (kg/m³)	1730	1450	1755	578
Porosidade (m³/m³)	0,290	0,260	0,210	0,486
Calor específico (J/kg.K)	868	850	850	850
Condutividade térmica (W/m.K)	0,490	0,800	0,800	0,158
Fator de resistência à difusão de vapor de água (-)	116	18	28	23
Teor de umidade de referência (kg/m³)	1,4	30,7	26,0	13,0
Umidade de saturação livre (kg/m³)	192	163,2	210,0	193,0
Coefficiente de absorção de água (kg/m².√s)	0,001	0,130	0,039	0,090

Fonte: Elaborado pela autora

Os valores de absorvância utilizados nesta pesquisa foram obtidos do trabalho de Aidar (2019); para a cerâmica branca o valor foi 0,282 e para a cerâmica marrom, 0,706.

3.2.3 Orientação, altura e inclinação das fachadas

A orientação das fachadas foi obtida através de imagem do Google Maps. A inclinação adotada foi de 90°. De acordo com Nascimento (2016), esses dados são determinantes para o cálculo da radiação e chuva dirigida. A chuva dirigida foi calculada pelo método WUFI no próprio software.

Para o cálculo da altura considerou-se uma altura de 3 metros por pavimento; sabendo que o edifício possui um pavimento garagem e seis pavimentos tipo, a altura total é de 21 metros. No software existem quatro opções com relação à altura do edifício. Adotou-se como uma altura representativa a opção três que descreve um edifício de 10-20 metros, pois a opção seguinte considerava um edifício de porte muito maior.

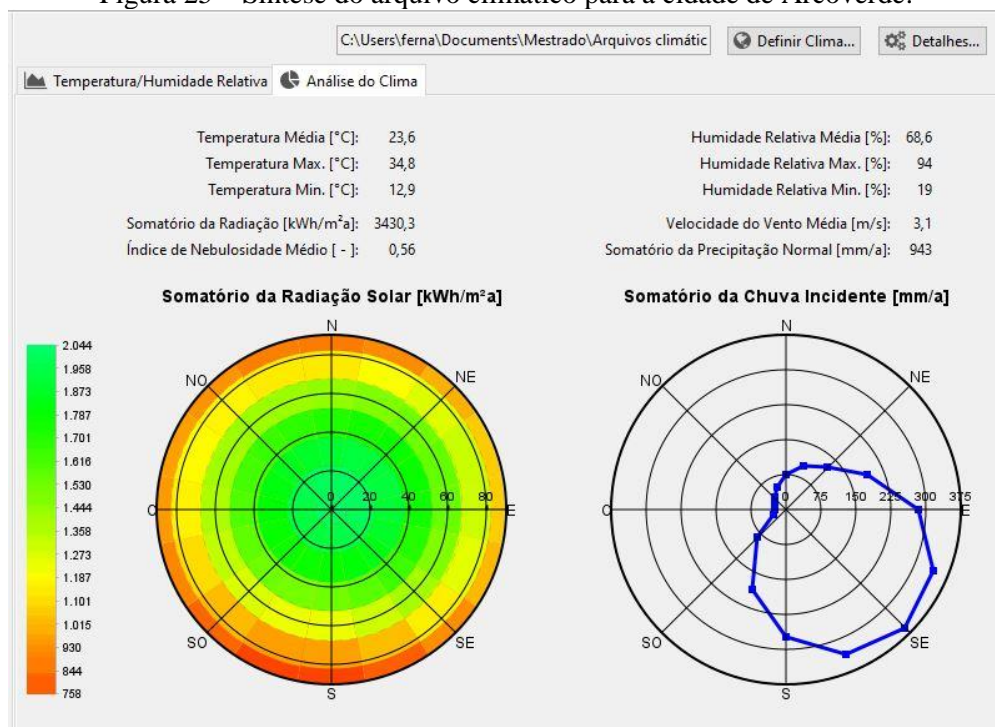
3.2.4 Clima

No software existem as opções de definir o clima através de um mapa ou adicionar um ficheiro. O mapa com dados climáticos disponíveis no WUFI PRO 6.5 não possui dados

climáticos do Brasil, portanto foi necessário buscar esses dados da cidade de Arcoverde em outra fonte e utilizar a opção “adicionar um ficheiro” para sua inserção.

Os dados climáticos utilizados foram obtidos nos arquivos climáticos do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que utiliza a metodologia do *Typical Meteorological Year* (TMY), ou ano típico meteorológico, tendo como base as medições do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Uma síntese da análise climática do arquivo TMY, inserido no software, para a cidade de Arcoverde, pode ser visto na Figura 25.

Figura 25 – Síntese do arquivo climático para a cidade de Arcoverde.



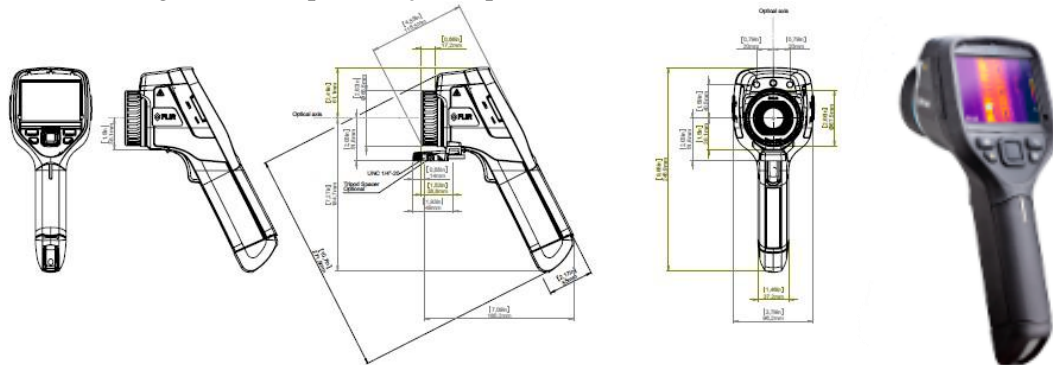
Fonte: Elaborado pela autora

A metodologia TMY consiste em compor um arquivo com dados que representam um ano, porém com meses de diferentes anos sem extremos de temperatura (ZANONI, 2015). Em conformidade com Aidar (2019), o TMY tem como base a variável temperatura e tem como metodologia excluir, dentro de um período mínimo de 10 anos, os meses de maior temperatura e os de menor temperatura até que sobre apenas um mês, sendo esse o mês representativo para compor o ano típico do local.

3.3 Definição dos parâmetros de entrada da câmera termográfica

A termocâmera utilizada nas inspeções termográficas é do modelo E60 fabricado pela FLIR (Figura 26), cujas especificações técnicas encontram-se dispostas no Quadro 4.

Figura 26 – Representação esquemática da termocâmera FLIR E60.



Fonte: FLIR SYSTEMS BRASIL (2013); FLIR SYSTEMS INC. (2016)

Quadro 4 – Especificações técnicas da câmera termográfica FLIR E60.

Resolução Infravermelha	320 x 240 pixels
Sensibilidade térmica	< 0,05 °C
Campo de visão (FOV)	25° x 19°
Distância mínima de foco	0,40 m
Frequência de imagem	60 Hz
Foco	Manual
Faixa espectral	7,5–13 μm
Tipo de detector	FPA e micro bolômetro não refrigerado
Display colorido	3,5" (320 x 240)
Faixa de temperatura	-20 °C a 650 °C
Precisão	± 2 °C ou ± 2% de leitura (para temperaturas ambientes de 10 °C a 35 °C).
Pontos móveis de medição	3
Formato do arquivo de imagem	JPG padrão

Fonte: FLIR SYSTEMS INC. (2016)

Os dados de entrada da câmera termográfica são: emissividade, temperatura atmosférica, temperatura aparente refletida, umidade relativa e distância entre o objeto e a câmera. Antes de iniciar o ensaio de termografia infravermelha também deve ser feito o ajuste do foco e determinada a velocidade do vento. Segundo Viégas (2015), não é indicada a realização do ensaio se a velocidade do vento for superior a 7 m/s.

- **Determinação da emissividade**

A emissividade pode ser determinada por dois métodos distintos. O método que será utilizado neste trabalho consiste em colocar uma fita de emissividade conhecida sobre a superfície do objeto que será estudado. A temperatura da fita será medida pela câmera termográfica de acordo com o valor da emissividade padrão. Altera-se, então, a emissividade inserida na termocâmera até que a temperatura da superfície do objeto sem fita registre a mesma temperatura observada.

- **Determinação da umidade relativa, temperatura ambiente e velocidade do vento**

A temperatura do ambiente (°C), a umidade relativa do ar (%) e a velocidade do vento (m/s) serão registradas utilizando-se um termo higrôanemometro digital.

- **Determinação da temperatura aparente refletida**

A ASTM E1862 (ASTM, 1997) – *Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers*, sugere dois métodos para a verificação da temperatura refletida: direto e refletor. Para este trabalho será utilizado o método refletor que consiste em colocar papel alumínio amassado na frente da superfície a ser analisada e fazer a medição.

- **Determinação da distância entre a câmera e o objeto**

Serão testadas diferentes distâncias durante o ensaio que serão medidas com trena.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item os resultados são apresentados e discutidos considerando-se quatro aspectos principais:

- Análise dos dados da simulação higrotérmica;
- Inspeção termográfica;
- Análise da eficácia da simulação higrotérmica como ferramenta auxiliar à termografia; e
- Análise da influência das diferentes cores de revestimento.

4.1 Análise dos dados da simulação higrotérmica

Foram feitas seis simulações, sendo duas para cada fachada, onde cada fachada foi simulada com a absorvância correspondente a cor branca e a cor marrom. O Quadro 5 mostra um resumo das simulações realizadas. Cada simulação foi realizada para o período de um ano, com as datas de 01/01/2022 a 01/01/2023, com temperaturas medidas a cada hora.

Quadro 5 – Síntese das Simulações

Simulação	Fachada	Cor
1	Sul	Branca
2		Marrom
3	Leste	Branca
4		Marrom
5	Oeste	Branca
6		Marrom

Fonte: Elaborado pela autora

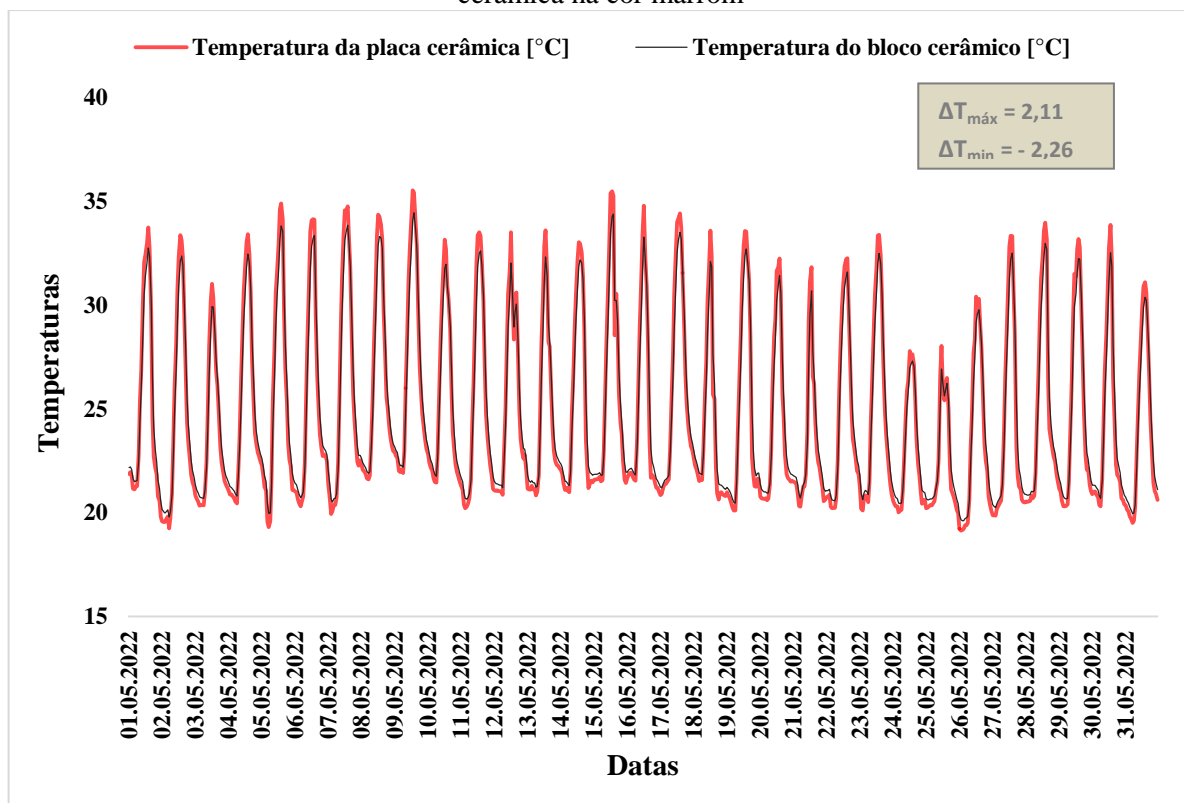
A partir da análise dos resultados obtidos nas simulações higrotérmicas e com base na análise do clima optou-se por realizar as inspeções termográficas no mês de maio que possui temperatura média de 23,1°C e previsão de 40 mm de chuva distribuídos em 7 dias. Em conformidade com Aidar (2019), recomenda-se realizar o ensaio termográfico em um dia com pelo menos dois dias antecedentes sem precipitação.

As temperaturas foram simuladas para o revestimento cerâmico e o bloco cerâmico, pois o diferencial térmico entre essas camadas é que define os momentos propícios para a realização da inspeção termográfica. De acordo com Pavón (2017), no fluxo direto de calor é necessário existir uma amplitude térmica entre a superfície da placa cerâmica e a superfície do bloco igual ou superior a $0,6^{\circ}\text{C}$ para que os descolamentos sejam detectados; já no fluxo inverso, essa amplitude térmica precisa ser igual ou inferior a $-2,5^{\circ}\text{C}$ para identificação das anomalias.

Os gráficos de temperatura para o mês de maio na superfície do revestimento cerâmico e na superfície do bloco cerâmico, em cada simulação, estão apresentados da Figura 27 a Figura 32.

A Figura 27 mostra as temperaturas do revestimento cerâmico em vermelho e a temperatura do bloco em preto sobrepostas, através da qual é possível notar o padrão da variação diária para a fachada Sul, com o revestimento marrom. As temperaturas variam de 20° a 35°C e o diferencial térmico, máximo e mínimo, respectivamente é de $2,11^{\circ}$ e $-2,26^{\circ}\text{C}$. Dessa forma seria possível detectar os descolamentos cerâmicos apenas no fluxo direto de calor.

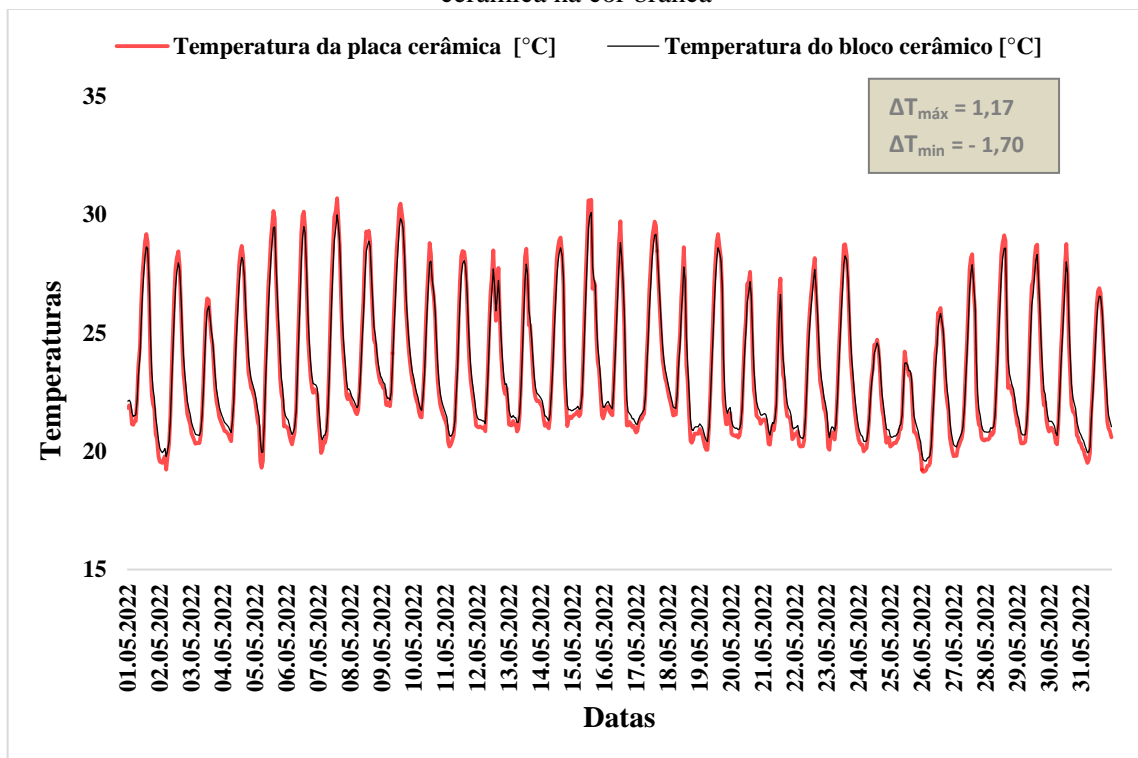
Figura 27 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada sul – cerâmica na cor marrom



Fonte: Elaborado pela autora.

No gráfico apresentado na Figura 28, é mostrada a variação de temperatura da fachada Sul para o revestimento cerâmico branco. As temperaturas do revestimento cerâmico e do bloco tem uma variação de 20° a 30° C, ficando com a faixa de variação 5° C a menos que o revestimento marrom. Para este revestimento, os diferenciais térmicos, máximo e mínimo, são de 1,17° e - 1,70° C.

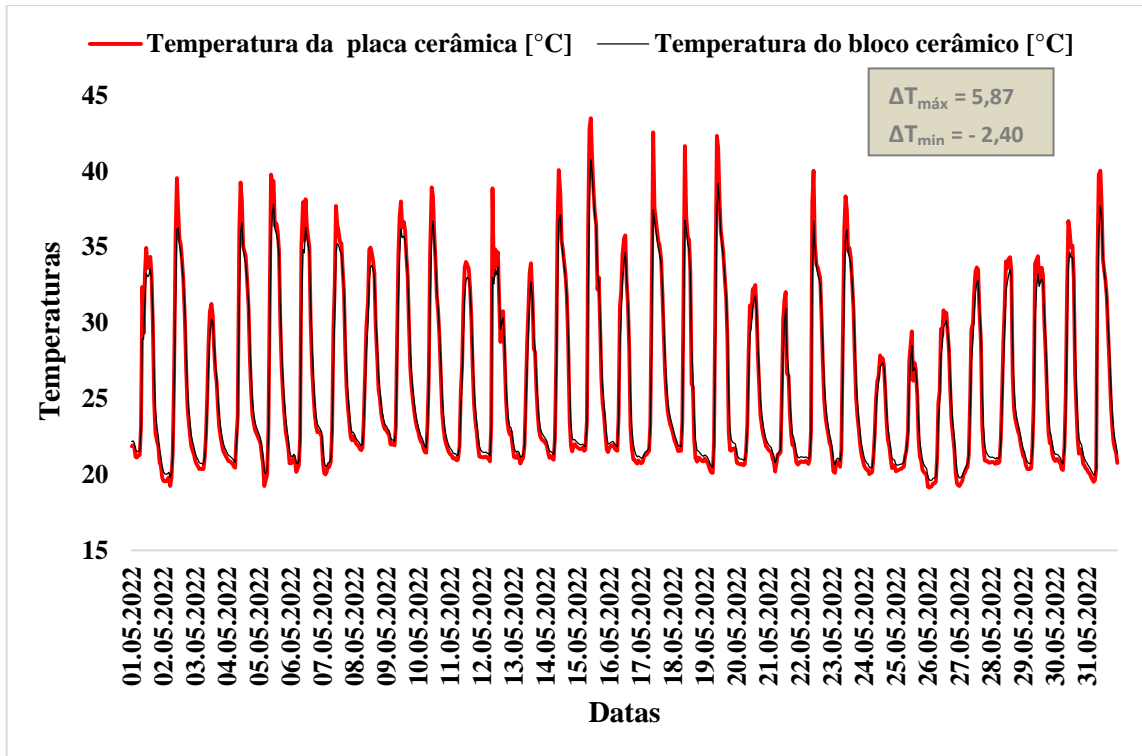
Figura 28 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada sul – cerâmica na cor branca



Fonte: Elaborado pela autora.

As temperaturas da área da fachada Leste revestida com cerâmica marrom, é apresentada na Figura 29, através da qual é possível identificar um aquecimento variando de 20° a 45°C aproximadamente, mostrando uma variação superior a fachada Sul, bem como, um gradiente térmico máximo de 5,87°C e gradiente mínimo de -2,40°C, o que ainda seria inferior ao necessário para detecção dos problemas patológicos no fluxo inverso de calor.

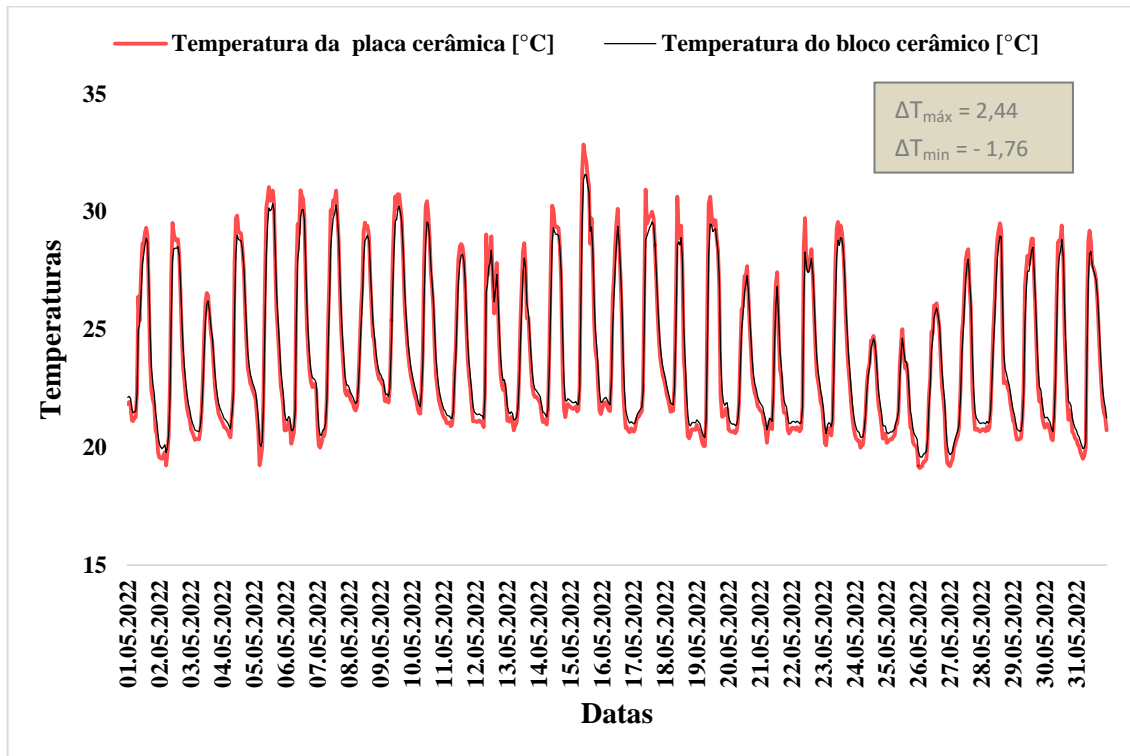
Figura 29 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada leste – cerâmica na cor marrom



Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda na fachada Leste, para o revestimento cerâmico de cor branca, Figura 30, as temperaturas da placa e do bloco tem uma variação menor, ficando entre 20° e 33°C aproximadamente e gradientes térmicos, máximo e mínimo, 2,44° e – 1,76°C.

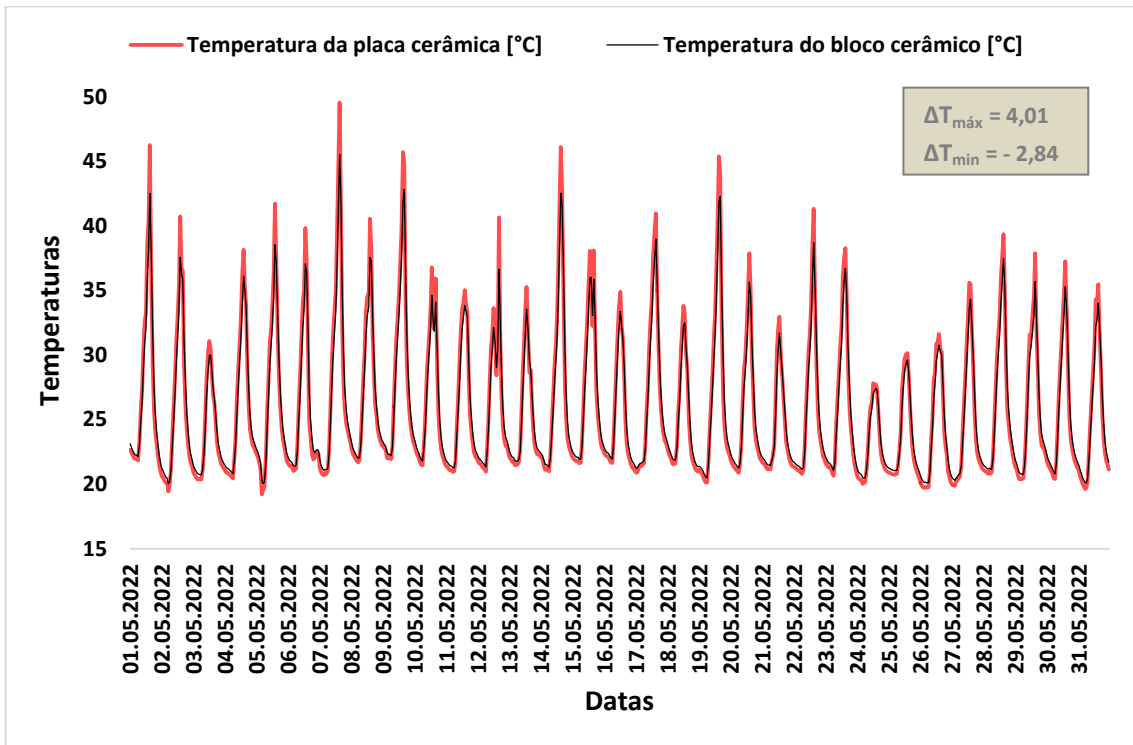
Figura 30 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada leste – cerâmica na cor branca



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 31 são apresentadas as temperaturas da placa cerâmica de cor marrom e bloco cerâmico da fachada Oeste, com uma variação aproximada de 20° a 50°C, bem como, diferencial térmico máximo entre a placa e o bloco de 4,01°C e diferencial térmico mínimo de -2,84°C. Para esta fachada, na área de cerâmica marrom, seria possível identificar os descolamentos cerâmicos tanto no aquecimento da fachada (fluxo direto) quanto no resfriamento (fluxo inverso).

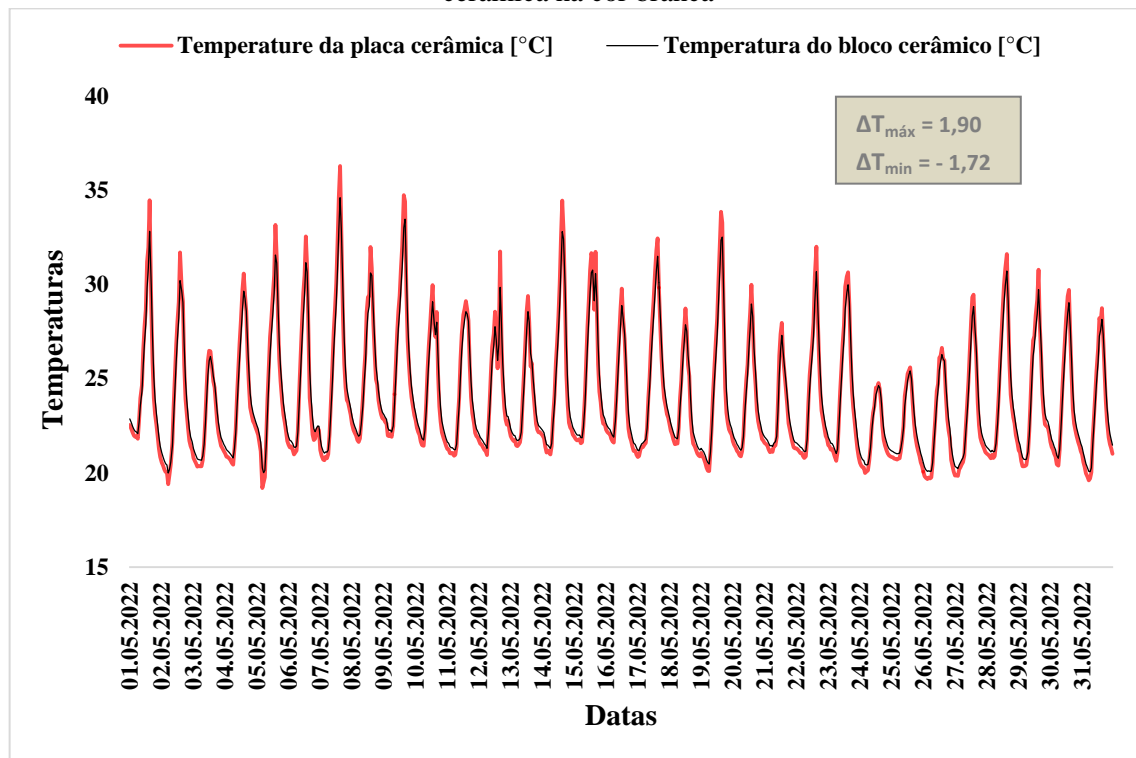
Figura 31– Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada oeste – cerâmica na cor marrom



Fonte: Elaborado pela autora.

Por fim, na Figura 32 é mostrado o comportamento das temperaturas para a área da fachada Oeste revestida com cerâmica branca. As temperaturas apresentam uma variação térmica entre 20° e 35°C aproximadamente e gradientes térmicos, máximo e mínimo, 1,90° e -1,72° C. O resultado da simulação mostra que para a mesma fachada, só seria possível atingir o diferencial térmico mínimo descrito por Pavón (2017) para detectar os descolamentos cerâmicos com o uso a termografia infravermelha, na área da cerâmica marrom.

Figura 32 – Temperatura na superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico da fachada oeste – cerâmica na cor branca



Fonte: Elaborado pela autora.

Os gráficos mostram que as fachadas onde há o maior aquecimento, ou seja, as maiores temperaturas são, respectivamente, oeste, leste e sul. Observando as Figuras 27 a 32 é possível perceber a influência que a orientação das fachadas exerce com relação aos descolamentos, pois a fachada oeste, onde se recebe mais calor, é a mais danificada. É possível perceber também a influência das cores na absorção de calor; na mesma fachada há um diferencial notório de temperaturas quando comparadas as cores branca e marrom. Porém, a diferença das cores será discutida posteriormente.

Foram calculados os gradientes térmicos entre a superfície da placa cerâmica e do bloco cerâmico para todas as fachadas. Todas as áreas das fachadas revestidas com a cerâmica marrom apresentaram amplitude térmica com valores iguais ou maiores a $0,6^{\circ}\text{C}$ a partir das 8:00 da manhã até, aproximadamente, 13:00 da tarde para as fachadas sul e oeste e até 12:00 para a fachada leste.

As áreas das fachadas com placa cerâmica branca levam mais tempo para atingir a amplitude térmica necessária, fato que está relacionado à absorvância, sendo o horário ideal para alguns

dias a partir das 9:00 e em outros dias a partir das 10:00. Para a fachada sul e leste essa amplitude, no geral, vai até às 11:00 da manhã. Para a fachada oeste a amplitude térmica só começa a ser inferior a $0,6^{\circ}\text{C}$ a partir das 14:00 da tarde.

Com base na análise dos resultados das amplitudes térmicas notou-se que para este caso só é possível detectar as manifestações patológicas nas fachadas com precisão no fluxo inverso, ou seja, quando o calor vem de dentro para fora da superfície, na área de cerâmica marrom da fachada oeste, pois é a única que atinge valores iguais ou inferiores a $-2,5^{\circ}\text{C}$.

Levando-se em consideração que existem outros fatores que podem influenciar e alterar os termogramas, como, por exemplo, a reflexão e as sombras de objetos no entorno do objeto alvo, o ideal é que as inspeções termográficas sejam feitas no primeiro horário onde a amplitude térmica atinge o valor igual ou superior a $0,6^{\circ}\text{C}$ para que o aumento da temperatura no entorno não exerça influência negativa nos resultados; logo, para a fachada sul onde a cor marrom é predominante, o momento mais propício seria entre 8:00 e 9:00 e para as fachadas onde a cor branca prevalece (leste e oeste), entre 9:00 e 10:00.

4.2 Inspeção termográfica

As inspeções termográficas foram realizadas em três dias, com condições climáticas diferentes, para que fosse analisado o comportamento dos termogramas e os resultados da simulação higrotérmica. O Quadro 6 mostra o resumo dos dias, horários e condições climáticas, nos quais foram realizadas as inspeções.

Quadro 6 – Inspeções termográficas

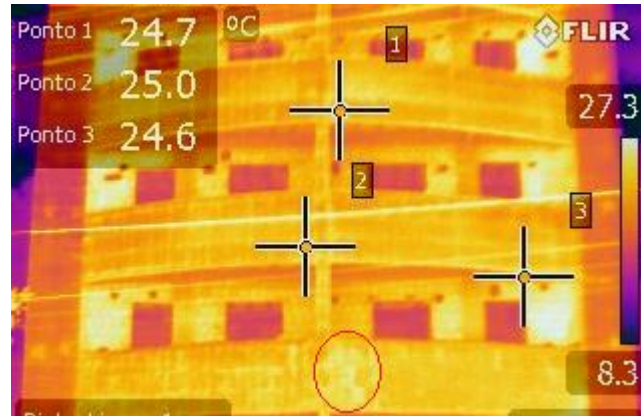
Data	Horário	Clima
14/05/2022	8:30 - 10:00	Parcialmente nublado
17/05/2022	8:30 - 10:00	Sol
31/05/2022	17:00 -17:30	Pós chuva

Fonte: Elaborado pela autora

O primeiro dia no qual a inspeção foi realizada o clima estava parcialmente nublado e tinha tido dois dias antecedentes sem precipitação. Analisando as imagens térmicas e a situação em campo foi possível detectar pontos de descolamento cerâmico. Na Figura 33 está indicado um

ponto em que a temperatura estava mais elevada na fachada sul, indicando provável descolamento cerâmico.

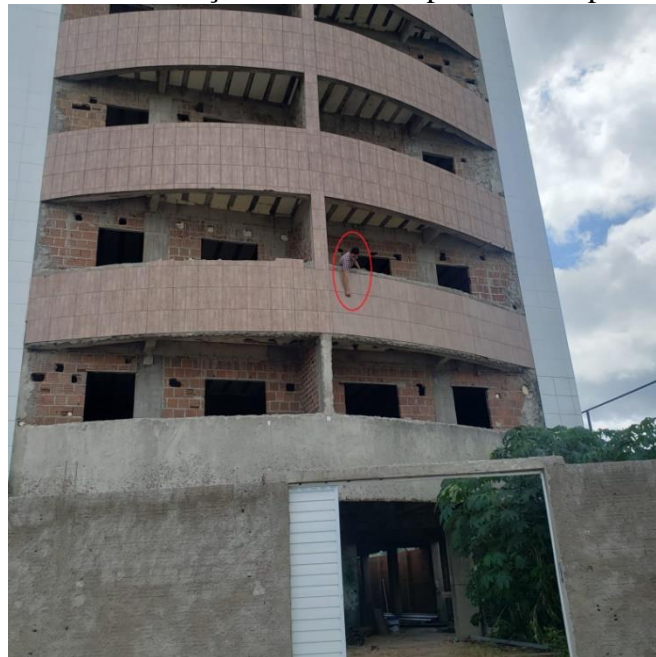
Figura 33– Imagem termográfica da fachada sul



Fonte: Elaborado pela autora

A área da cerâmica destacada apresentou uma tonalidade mais clara que o seu entorno indicando a existência de um vazio causado por descolamento cerâmico. Para confirmar, o descolamento foi conferido através de batidas na cerâmica e detecção de som cavo, a conferência do som cavo é mostrada na Figura 34.

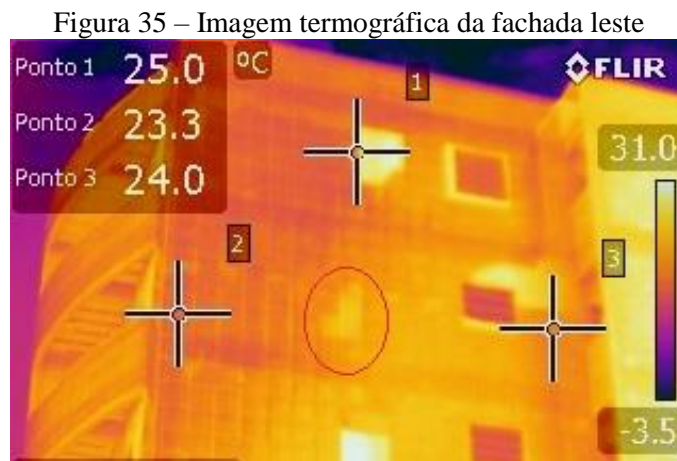
Figura 34 – Verificação de som cavo por meio de percussão



Fonte: Elaborado pela autora

As demais áreas da fachada sul, onde foi possível acesso sem necessidade de andaimes, foi conferida através de ensaio de percussão e verificou-se que as cerâmicas estavam aderidas conforme indicado no termograma. A fachada mostrada é a mais conservada do edifício, a única em que não foram registrados deslocamentos. Em conversa com um dos proprietários foi dito que a fachada em questão foi executada por último com equipe e argamassa colante diferentes das demais. O fato de a fachada estar na orientação sul também contribui para sua conservação, pois esta orientação não é muito afetada pelas variações térmicas.

No mesmo dia foi possível inspecionar também a fachada leste na qual existem muitas áreas deslocadas, como visto na Figura 23. Detectou-se uma área de descolamento através do termograma da Figura 35.



Fonte: Elaborado pela autora

A área em destaque mostra temperatura maior que seu entorno através da diferença de cores. Na imagem tirada com câmera convencional (Figura 36) é possível perceber que a área em destaque tem aparência de cerâmica “estufada” confirmando o descolamento e as demais áreas com amarelo mais claro, apresentam deslocamento.

Figura 36 – Imagem tirada com câmera convencional da fachada leste



Fonte: Elaborado pela autora

As fachadas oeste e norte não foram inspecionadas no dia 14/05/2022, por questões de acesso à fachada norte e também por início de chuva.

A inspeção foi realizada novamente no dia 17/05/2022 das 8:30 às 10:00, dia de sol. Na fachada leste foi possível detectar o mesmo descolamento visto na Figura 35, porém de forma mais nítida como mostra a Figura 37.

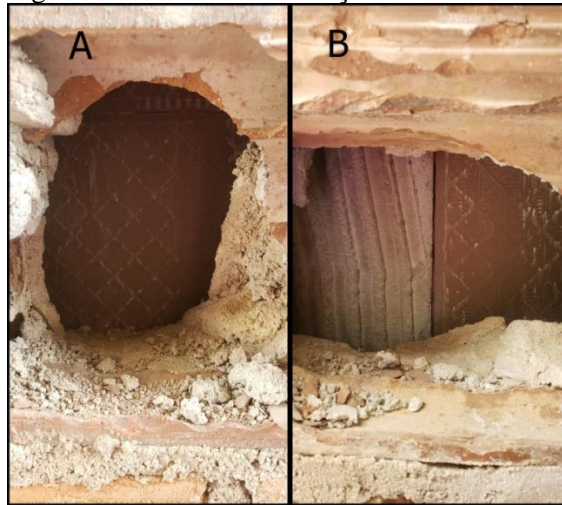
Figura 37 – Imagem termográfica do descolamento da fachada leste



Fonte: Elaborado pela autora

Essa imagem mostra com nitidez, além do descolamento em destaque, vários pontos que indicam vazios no revestimento. Essa parede foi inspecionada por dentro e identificou-se que esses são pontos onde não foi aplicada argamassa colante, ou foi aplicada e não espalhada conforme indica a NBR 13755 (ABNT, 2017) e a boa prática da engenharia. Algumas dessas falhas podem ser vistas na Figura 38a e 38b.

Figura 38 – Falhas de execução da fachada leste



Fonte: Elaborado pela autora

Na Figura 38a é possível identificar a completa ausência de argamassa colante. Na Figura 38b é possível ver a aplicação da argamassa colante na placa da esquerda, mas não na parte visível da placa da direita. Estas falhas de execução podem ser apontadas como uma das causas do deslocamento precoce das placas cerâmicas do edifício em questão.

As fachadas sul e oeste também foram inspecionadas neste dia. Para a fachada sul as imagens obtidas foram semelhantes ao do dia da vistoria anterior e a fachada oeste, que recebe apenas o sol da tarde, ainda não havia aquecido de forma que os descolamentos fossem vistos com nitidez, então optou-se por voltar à tarde, porém à tarde choveu na região.

Os dias subsequentes alternaram entre sol e chuva. No dia 31/05/2022 foi inspecionada a fachada oeste das 17:00 às 17:30, depois de uma manhã chuvosa e início de tarde nublada, onde provavelmente a fachada estaria transferindo calor no fluxo inverso. Segundo Pavón (2017), para identificar os descolamentos no fluxo inverso seria necessário um diferencial térmico entre a superfície da placa cerâmica e a superfície do bloco cerâmico de $-2,5^{\circ}\text{C}$, o que não seria possível para este edifício de acordo com a simulação higrotérmica respeitando o gradiente encontrado pelo autor. No dia e horário da inspeção, a simulação térmica indicava um diferencial de $-1,43^{\circ}\text{C}$ na fachada oeste, porém foi possível visualizar com nitidez os descolamentos das placas (Figura 39).

Figura 39 – Imagem termográfica da fachada oeste

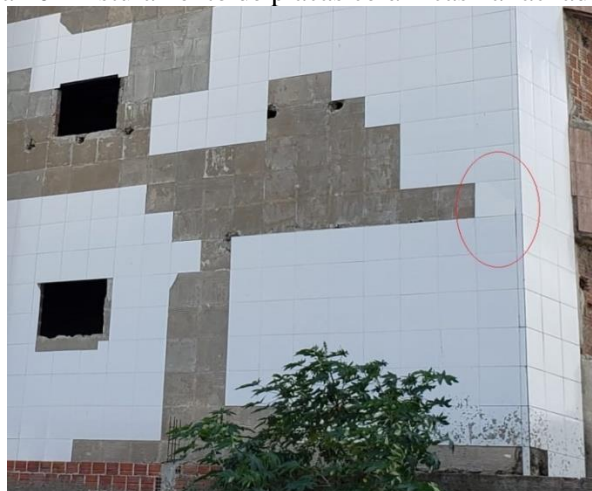


Fonte: Elaborado pela autora

A área destacada em vermelho mostra uma parte da cerâmica que está descolada. Como a fachada estava esfriando, ou seja, transferindo o calor no fluxo inverso, as áreas mais frias, com cores mais próximas ao roxo, representam as áreas com possível descolamento cerâmico. Na Figura 40, que é uma imagem real da área, é possível ver o estufamento das placas cerâmicas na área em destaque.

As outras áreas em roxo que aparecem acima, destacadas em preto, sugerem áreas com descolamento apresentando vazios semelhantes aos encontrados na fachada leste por falta de argamassa colante e/ou falha no espalhamento da mesma.

Figura 40 – Estufamento de placas cerâmicas na fachada oeste



Fonte: Elaborado pela autora

Foi possível identificar também na fachada leste o mesmo descolamento cerâmico visto nos dias com fluxo direto de calor, conforme destacado em vermelho na Figura 41. Na parte mais a direita da imagem, é possível identificar outra área de descolamento que foi confirmada pelo ensaio de percussão.

Figura 41 – Imagem termográfica da fachada leste com fluxo inverso de calor



Fonte: Elaborado pela autora

O termograma da fachada leste indica que também é possível ver os descolamentos no fluxo de calor inverso, com um gradiente térmico de $-1,36^{\circ}\text{C}$.

Com relação às causas dos deslocamentos e descolamentos precoces, pode-se indicar, além das falhas de execução relacionadas ao espalhamento da argamassa colante, como visto nas Figuras 38a e 38b, a ausência de juntas de movimentação conforme prevê a NBR 13755 (ABNT, 2017). A ausência dessas juntas potencializa a ação das tensões térmicas provocadas pela ação solar causando o descolamento das placas cerâmicas.

Além dos problemas citados anteriormente, durante a inspeção notou-se que nos locais onde há deslocamento, o rompimento apresentou-se na camada da argamassa colante como pode ser visto na Figura 42.

Figura 42 – Rompimento na camada da argamassa colante



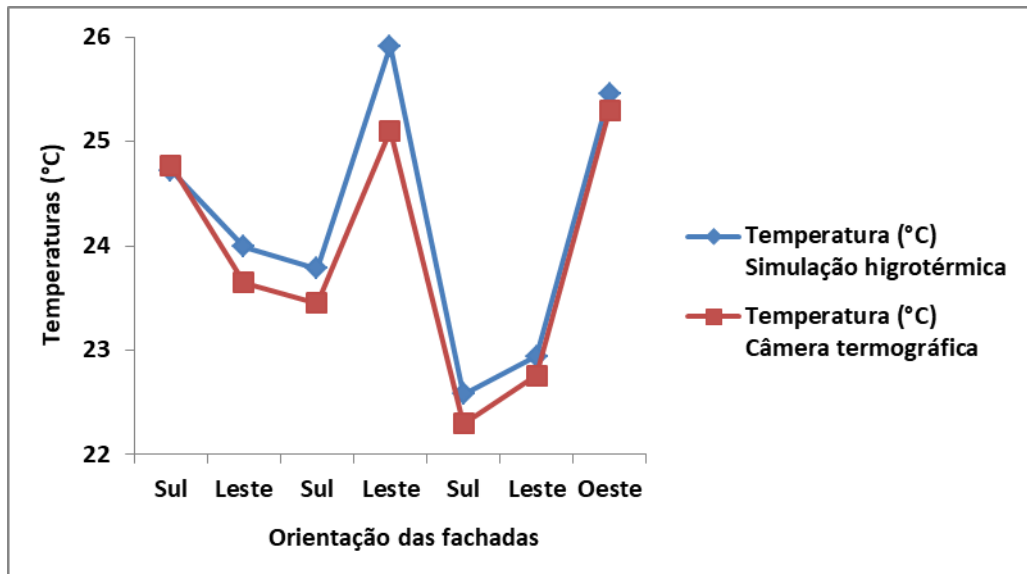
Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com um dos proprietários que acompanhou a fase de execução do revestimento, a argamassa utilizada nas fachadas leste e oeste foram de marca não conhecida no mercado, adquirida por um fabricante da região que foi escolhido por oferecer um preço inferior ao tradicional de argamassas colantes para fachada. Logo, a qualidade da argamassa utilizada pode ter sido um dos fatores que provocou a manifestação patológica em questão.

4.3 Análise da eficácia da simulação higrotérmica

Os resultados da simulação mostraram que as fachadas que recebem mais calor são respectivamente: oeste, leste e sul. Este resultado corrobora com a situação vista em campo, pois a fachada oeste que recebe mais calor e conseqüentemente sofre mais variações térmicas é a que apresenta o maior percentual de revestimento deslocado. A fachada sul, que é a menos afetada pelas variações térmicas, apresenta apenas uma pequena área de descolamento e nenhum deslocamento.

Com relação às temperaturas superficiais do revestimento cerâmico, simuladas pelo WUFI nos horários e nas fachadas em que foram feitas as inspeções com a câmera termográfica os valores estiveram, no geral, muito próximos dos valores medidos *in loco* pela câmera termográfica como pode ser visto na Figura 43.

Figura 43 – Comparação entre as temperaturas medidas *in loco* e simuladas

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores detalhados das temperaturas são apresentados no Quadro 7. A temperatura apresentada da medição termográfica foi obtida tirando a média dos pontos medidos pela câmera.

Quadro 7 – Comparação das temperaturas

Data	Fachada	Temperatura (°C) Simulação higrotérmica	Temperatura (°C) Câmera termográfica
14/05/2022	Sul	24,72	24,77
	Leste	23,99	23,65
17/05/2022	Sul	23,78	23,45
	Leste	25,91	25,10
31/05/2022	Sul	22,58	22,30
	Leste	22,94	22,76
	Oeste	25,46	25,30

Fonte: Elaborado pela autora

A maior diferença foi medida na fachada leste para o dia de sol, porém a divergência ainda foi muito pequena, menor que 1°C. Dessa forma, é possível notar que a simulação higrotérmica apresentou bons resultados.

Foi possível também identificar os descolamentos cerâmicos nos horários previstos pela simulação higrotérmica no fluxo direto com o gradiente térmico entre a superfície do revestimento e a superfície do bloco maior ou igual a 0,6°C, tanto no dia nublado como no dia

de sol, contudo, no dia de sol os descolamentos estavam mais visíveis. Divergindo do previsto por Pavón (2017), não foi necessário um gradiente térmico de $-2,5^{\circ}\text{C}$ para identificar os descolamentos no fluxo inverso, pois foi possível identificar as anomalias nitidamente para um gradiente de $-1,36^{\circ}\text{C}$.

Dessa forma, pode-se dizer que a modelagem feita na simulação higrotérmica trouxe resultados de temperatura satisfatórios e uma previsão eficaz dos melhores momentos para realização da inspeção termográfica, sendo uma boa ferramenta no auxílio das inspeções de fachadas.

4.4 Análise da influência das diferentes cores dos revestimentos

A variação de temperatura e as diferentes cores dos revestimentos cerâmicos estão diretamente ligadas às manifestações patológicas. Nas fachadas estudadas, a simulação higrotérmica mostrou, para a mesma orientação, temperaturas diferentes quando comparados os revestimentos marrom e o branco. No Quadro 8 é possível ver para cada orientação as variações de temperatura para as diferentes cores.

Quadro 8 – Variações de temperatura dos revestimentos de diferentes cores

Fachada	Cor	Horários	Temperatura mínima °C	Horários	Temperatura máxima °C
Sul	Marrom	01:00	19,13	13:00	35,54
	Branca	05:00	19,23	14:00	30,17
Leste	Marrom	05:00	19,24	11:00	40,98
	Branca	05:00	19,23	11:00	31,06
Oeste	Marrom	04:00	19,21	15:00	49,56
	Branca	04:00	19,02	15:00	34,75

Fonte: Elaborado pela autora

Com base no Quadro 8 é possível notar que para todas as fachadas houve diferença entre a temperatura máxima atingida para cada cor. A cerâmica branca em todas as fachadas atingiu temperaturas máximas menores que o revestimento marrom devido a sua absorvência menor, o que traz mais conforto térmico aos usuários, pois a estrutura acaba absorvendo menos calor e, consequentemente, o ambiente interno se torna mais agradável.

Corroborando com Esquivel (2009), a cor escura é capaz de atingir temperaturas maiores que levam ao surgimento de descolamentos mais rápido. Na fachada sul a diferença da temperatura máxima entre as cores marrons e brancas é aproximadamente 5°C. Na fachada leste essa diferença é de 10°C e na fachada oeste, de 15°C. A diferença na absorção de calor é bastante significativa; quanto maior o choque térmico, ou seja, a diferença de temperatura diária atingida, maior é a probabilidade de falha do sistema.

No edifício em questão não é possível afirmar que o descolamento de placas cerâmicas prevaleceu na cor marrom. Ambas as cores apresentam um descolamento expressivo, pois para este caso, outros fatores contribuíram, como utilização de argamassa colante de baixa qualidade, falhas de execução e ausência de juntas. Porém, pela análise através da simulação higrotérmica pode-se afirmar que as placas cerâmicas de cor escura atingem temperaturas maiores, o que pode levar ao aparecimento de problemas patológicos antes daquelas de cor clara que atingem variações diárias de temperaturas menores.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

A termografia infravermelha tem se mostrado um ensaio não destrutivo com bons resultados na detecção dos descolamentos de placas cerâmicas. Porém, por ser uma técnica relativamente nova, não possui parâmetros definidos para a realização das inspeções e a depender de alguns fatores como horário do dia, posição do sol e velocidade do vento, os defeitos podem não ser identificados. Dessa forma, fez-se necessário um estudo mais aprofundado da técnica e a utilização de ferramentas de apoio como, por exemplo, a simulação higrotérmica.

A partir da simulação higrotérmica da fachada, considerando o revestimento cerâmico nas cores branca e marrom, pôde-se identificar os horários propícios para realização da inspeção termográfica, calculando o diferencial térmico entre a superfície do revestimento cerâmico e a superfície do bloco cerâmico. Concluiu-se que para a fachada sul onde a cor marrom é predominante, o momento mais propício para realização do ensaio termográfico seria entre 8:00 e 9:00 e para as fachadas onde a cor branca prevalece (leste e oeste), entre 9:00 e 10:00 da manhã.

As inspeções termográficas foram realizadas em três dias, com condições climáticas diferentes. Os resultados mostraram que foi possível detectar os descolamentos cerâmicos no dia de sol e dia nublado nos horários indicados pela simulação higrotérmica considerando o fluxo direto de calor. No dia pós-chuva foi possível identificar os descolamentos no fluxo de calor inverso com uma amplitude térmica de $-1,36^{\circ}\text{C}$, indo contra o esperado que era a detecção da manifestação patológica com gradientes menores ou iguais a $-2,5^{\circ}\text{C}$.

A simulação higrotérmica mostrou resultados satisfatórios, pois quando comparadas as temperaturas estimadas com as temperaturas medidas pela câmera termográfica, os valores ficaram muito próximos, com uma diferença máxima inferior a 1°C . A simulação também se mostrou uma boa ferramenta de auxílio à termografia infravermelha, pois foi possível detectar as manifestações patológicas nos horários previstos.

Com base na inspeção realizada e em entrevistas com proprietários, conclui-se que os descolamentos e deslocamentos foram causados por utilização de argamassa de má qualidade, falhas de execução e ausência de juntas de movimentação conforme prevê a NBR 13755 (ABNT, 2017). Com base nos resultados da simulação, é possível perceber a influência que as cores exercem na absorção de temperatura. A cerâmica de cor escura chega a aquecer 15°C a mais que a cerâmica branca, o que torna o revestimento marrom mais propício a falhas. No edifício em questão não é possível afirmar que a diferença das cores causou o descolamento, pois ambas apresentam um deslocamento significativo que pode ser associado aos fatores citados anteriormente.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros aconselha-se que a simulação higrotérmica seja mais explorada como ferramenta de apoio à termografia nas fachadas, abrangendo buscar o momento mais propício para a detecção de outras manifestações patológicas, como, por exemplo, as fissuras.

Sugere-se também a ampliação dos estudos utilizando a termografia infravermelha na investigação dos descolamentos cerâmicos e de outras anomalias, de modo a difundir padrões e critérios de investigação associando ao clima local e época do ano.

Por fim, aconselha-se um estudo mais amplo sobre a influência das cores nos descolamentos cerâmicos, utilizando um número significativo de edifícios com revestimentos de diferentes cores e utilizando a simulação higrotérmica para estimar as temperaturas em cada revestimento.

REFERÊNCIAS

- AIDAR, L. A. G. **Metodologia de inspeção e análise de termogramas para estudo de fachadas em revestimento cerâmico**. 2019. 209 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- AKBARI, H.; LEVINSON, R.; BERDAHL, P. **ASTM standards for measuring solar reflectance and infrared emittance of construction materials and comparing their steady-state surface temperatures**. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States), 1996.
- AKBARI, H.; LEVINSON, R.; STERN, S. Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies. **Solar Energy**, v. 82, n. 7, p. 648-655, 2008.
- AMARAL, I. B. C.; VIEIRA, L. H. L.; MARTINS, I. C.; DONATO, F. C.; SILVA, R. C.; REIS, A. B. **Patologias mais comuns na construção civil**. Diamantina: UFVJM, 2018. 31 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1549-09**: Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer. Philadelphia, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1862**: Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers. Philadelphia, 1997. (Reapproved 2010).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1918-06**: Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-sloped Surfaces in the Field. Philadelphia, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1980-11**: Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-sloped Opaque Surfaces. Philadelphia, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E903-12**: Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. Philadelphia, 2020.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING, AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 160**: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. Atlanta, 2009.
- ANDRADE, R. P. de. **Uso da termografia infravermelha embarcada em drone como ferramenta para a inspeção de patologias em revestimentos aderidos de fachada**. 2020. 199 p. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.
- ASDRUBALI, F.; BALDINELLI, G.; BIANCHI, F. A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. **Applied Energy**, v. 97, p.365–373, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13755**: Revestimentos cerâmicos de fachadas de paredes externas com utilização de argamassa colante – Projeto, execução, inspeção e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15424**: Ensaio não destrutivo - Termografia – Terminologia, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15572**: Ensaio não destrutivo — Termografia — Guia para inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15763**: Ensaio não destrutivo - Termografia - Critérios de definição de periodicidade de inspeção em sistemas elétricos de potência. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15866**: Ensaio não destrutivo — Termografia — Metodologia de avaliação de temperatura de trabalho de equipamentos em sistemas elétricos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16818**: Ensaio não destrutivo - Termografia infravermelha — Procedimento para aplicações do método da termografia infravermelha, Rio de Janeiro, 2020.

AVDELIDIS, N.P.; MOROPOULOU, A. Emissivity considerations in building thermography. **Energy and Buildings**, v.35, p.663-667, 2003.

BAGAVATHIAPPAN, S.; LAHIRI, B. B.; SARAVANAN, T.; PHILIP, J.; JAYAKUMAR, T. Infrared thermography for condition monitoring - A review. **Infrared Physics and Technology**, v. 60, p. 35–55, 2013.

BARTH, F. Fachadas: Arquitetura, Ambiente e Tecnologia. In: Congresso Paranaense do Ambiente Construído CONPAC, II, 2001, Londrina, 2001. **Anais [...]**. Londrina, 2001.

BATISTA, K. M.; SILVA, E. P.; ARAÚJO, A. O. Manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos de fachadas: Um estudo de caso na central da biblioteca do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES, XVII, 2021, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: Evento online, 2021.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; HILDENBERG, A.; PAVON, E. Critérios para a aplicação da termografia de infravermelho passiva como técnica auxiliar ao diagnóstico de patologias em fachadas de edifícios. **Revista Politécnica (Bahia)**, v. 21, p. 266–277, 2014.

BAUER, E.; NASCIMENTO, M. L. M.; CASTRO, E. K. **Parâmetros e ensaios físicos de materiais e componentes da fachada. Relatório Interno–Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM)–UnB/ENC**, 2015.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; SILVA, M. N. B. Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília. **Cerâmica**, v. 61, p. 151–159, 2015.

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

BAUER, E.; MILHOMEM, P.; AIDAR, L. Utilização da simulação higratérmica como ferramenta de apoio para inspeção termográfica de fachadas. *In: CONSTRUÇÃO 2018 – PATOLOGIA E REABILITAÇÃO – TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO E INSPEÇÃO*, 2018, Porto. **Anais [...]**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2018. p. 892 – 900.

BERDHAL, P.; BRETZ, S. E. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. **Energy and Buildings**, v.25, 149-158, 1997.

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

CARNEIRO, B. D. G. **A Influência da Cor na Temperatura Superficial de Revestimentos Térmicos**. 2016. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil — Especialização em Construções) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

CASTRO, A. P. A. S. **Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica**. 2002. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

CLIMA ARCOVERDE (BRASIL). *In: Climate-Data.Org*, 2022. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/arcoverde-43016/>> Acesso em: 10 mar. 2022.

CORREA, G. A.; SANTOS, M. D. F.; TATIM FILHO, Y. Santos. Utilização da injeção de resina epóxi como método de correção do som cavo em fachadas com revestimento cerâmico. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 43828-43840, 2021.

CORTIZO, E.C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico**. 2007. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

DADOS DO MUNICÍPIO. *In: Prefeitura de Arcoverde*, 2022. Disponível em: <<https://www.arcoverde.pe.gov.br/pag/institucional/dados-do-municipio>> Acesso em: 10 mar. 2022.

DELGADO, J. M. P.Q.; RAMOS, N. M. M.; BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. A Critical Review of Hygrothermal Models Used in Porous Building Materials. **Journal of Porous Media**, v. 13, p. 221-234, 2010.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15026**: Hygrothermal performance of building components and building elements: assessment of moisture transfer by numerical simulation. Berlin, 2007.

DONATO, F. C. *et al.* Manifestações Patológicas Relacionadas a Revestimentos Cerâmicos de Fachadas na Cidade de Ipatinga-MG. **Revista Tecnológica**, v. 27, n. 1, p. 82-94, 2018.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. Tese (Doutorado.) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, São Paulo, 2008.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. A ilusão das cores na identificação da absortância solar de superfícies opacas. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, IX, 2007, Ouro Preto. **Anais [...]**. Ouro Preto, 2007.

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. 187–197, 2014.

ESQUIVEL, J. F. T. **Avaliação da influência do choque térmico na aderência dos revestimentos de argamassa**. 2009. 262 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2009.

FERREIRA, F.; PRADO, R. Medição do albedo e análise de sua influência na temperatura superficial dos materiais utilizados em coberturas de edifícios no Brasil. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**. São Paulo, 2003.

FLIR SYSTEMS BRASIL. **FLIR Série E – Os Novos Termovisores FLIR Linha E40, E50 e E60 Agora com MSX**. São Paulo, Brasil FLIR Systems Brasil, 2013.

FLIR SYSTEMS INC. **User’s manual: FLIR Exx series**. Wilsonville, EUA: FLIR Systems Inc., 2016. Disponível em: <http://www.omega.com/manuals/manualpdf/M5162.pdf>. Acesso em: 25 set. 2020.

FLIR SYSTEMS. **Manual do equipamento**. ThermaCAM® E320, 2014.

FLORES-COLEN, I. **Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva**. Tese (Doutorado). Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.

FRAUNHOFER. **WUFI**, 2019. WUFI Pro. Disponível em: <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>. Acesso em: 20 de set. de 2020.

FREITAS, V.P.; CORVACHO, H.; VAZ SÁ, A.; QUINTELA, M. **Discussing the durability assessment of cement mortars – —a contribution for a prediction model**. In: Proceedings of the 11th International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC- 2008), Istanbul, Turkey, 2008.

IBARRA-CASTANEDO, C.; SFARRA, S.; KLEIN, M.; MALDAGUE, X. Solar loading thermography: Time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. **Infrared Physics and Technology**, v. 82, p. 56–74, 2017.

JORNE, F.J.F. **Análise do comportamento higrotérmico de soluções construtivas de paredes em regime variável**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências Tecnologia da

Universidade Nova de Lisboa. Orientador: Professor Doutor Fernando Henriques. Lisboa, 2010.

JUST, A.; FRANCO, L. S. Descolamentos dos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife. **Boletim Técnico da Escola Politécnica**, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LUZ, M. A. **Manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos de fachada em três estudos de caso na cidade de Balneário Camboriú**. 2004. 172 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, Santa Catarina, 2004.

MALDAGUE, X. P. V. **Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing**. 1st Edition. New York: Wiley, 2001. 684 p.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. Designing ceramic tile building façades. In: QUALICER 98 World Congress on Tile Quality, V, 1998, Castellon. **Anais [...]**. Castellon Spain, 1998.

MEOLA, C.; MAIO, R. di; ROBERTI, N.; CARLOMAGNO, G. M. Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. **Engineering Failure Analysis**, v.12, p. 875-892, 2005.

MOREIRA, C. A. S.; MARCONDES, C. G. N. Levantamento quantitativo de manifestações patológicas de descolamento e eflorescência em fachadas de edifícios com revestimento cerâmico no bairro batel e imediações em Curitiba. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Curitiba, n. 4, p. 1 -16, jun. 2016.

MUÑOZ MOSCOSO, Y. F. **Estudo numérico e experimental das tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica**. 2013. xix, 123 f., il. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios**. 2016. 173 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

OLIVEIRA, L. A. de; SAHADE, R. F.; VARELLA, L. A. M.; TEIXEIRA, E. S. L. Incidência de descolamento em revestimentos cerâmicos aderidos em fachadas: contribuição para o projeto e a produção. In: WORKSHOP DE TECNOLOGIAS DE PROCESSOS E SISTEMAS CONSTRUTIVOS, TECSIC, 1., 2017, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2017.

PACHECO, C. P.; VIEIRA, G. L. Análise quantitativa e qualitativa da degradação das fachadas com revestimento cerâmico. **Cerâmica**, v. 63, p. 432 – 445, 2017.

PAVÓN, E. **Critérios e padrões de comportamento para avaliação de descolamentos cerâmicos com termografia de infravermelho**. 2017. 250 p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção civil) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

- PEDRA, S. A. **Potencialidades da termografia infravermelha aplicada ao design do conforto térmico de alvenaria estrutural**. 2011. 100 p. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Design, Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- PEIXOTO, F. The use of wall and floor tiles in ultra-modern brazilian architecture. In: QUALICER 92 II World Congress on Tile Quality, II, 1992, Castellon. **Anais [...]**. Castellon Spain, 1992.
- PEREIRA, C. P. A. **A Cor no Desenho Industrial: Fundamentos para o Projeto Cromático de Produtos**. 2000. Dissertação (Mestrado) - FAU, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000
- PEREIRA, C.; MARINOSKI, D.; LAMBERTS, R.; GUTHS, S.; GHISI, E. **Guia de medição e cálculo para refletância e absortância solar em superfícies opacas**. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.
- PERNAMBUCO (Estado). Lei n. 13.032/2006, de 14 de junho de 2006. Dispõe sobre a obrigatoriedade de vistorias periciais e manutenções periódicas, em edifícios de apartamentos e salas comerciais, no âmbito do Estado de Pernambuco, e dá outras providências. **Diário Oficial [do] Estado de Pernambuco**: seção 1: Executivo, n. 2, p. 3 - 7, 15 jun. 2006. Disponível em: <http://legis.alepe.pe.gov.br/texto.aspx?id=3919&tipo=TEXTO> ATUALIZADO. Acesso em: 05 set. 2020.
- REAGAN, J. A.; ACKLAM, D. M. Solar reflectivity of common building materials and its influences on the roof heat gain of typical southwestern US residences. **Energy and Buildings**, v.2. 237-248, 1979.
- SACHT, H.; BRAGANÇA, L.; ALMEIDA, M.; CARAM, R. Sistemas de fachadas inovadoras e conforto térmico: estudo em Portugal. **Revista Tecnológica**. Maringá, v. 21, p. 13-25, 2012.
- SANTOS, M. C. F. N. **Uso da termografia para caracterizar qualitativamente fachadas de edifícios**. 2014. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de ciências e tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.
- SENA, G. O. de; NASCIMENTO, M. L. M.; NABUT NETO, A. C.; LIMA, N. M. **Patologia das construções**. 1ª Edição. Salvador: 2B, 2020. 256 p.
- SERRA, C.; TADEU, A.; SIMÕES, N.; SIMÕES, I. Simulation of heat diffusion in multi-layered construction systems for active IRT data analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUANTITATIVE INFRARED THERMOGRAPHY, 12., 2014, Bordeaux. **Proceedings[...]**. Bordeaux, 2014.
- SILVA, D. D. S. **Diagnóstico de patologias em fachadas utilizando termografia**. 2012. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2012.
- SILVA, R. N. T.; BEZERRA, L. A.; GUERRERO, J. R. H.; MAGNANI, F.S. Estudo da influência de parâmetros por termografia. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4., 2006, Recife. **Anais [...]**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.

TAHA, H.; SAILOR, D; AKBARI, H. High-albedo materials for reducing building cooling energy use. **Rep. n° LBL-31721**, Lawrence Berkeley National Laboratory. 1992.

TOULOUKIAN, Y. S.; DEWITT, D. P.; HERNICZ, R. S. **TPRC data series. Thermophysical properties of matter**, v.9, IFI/Plenum, New York, 1972. 1507p.

ULIANA, J. G.; FALCÃO, A. F. O.; SOARES, R. B.; MAIOLI, R. N.; VIEIRA, G. L. Estudo da incidência de manifestações patológicas em fachadas de edifícios localizados em região litorânea. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 1., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Fundação Parque Tecnológico Itaipu, 2014. p. 1 – 16.

VIÉGAS, D. J. A. **Utilização de termografia infravermelha em fachadas para verificação de descolamento de revestimento**. 2015. 164 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

WUFI ONLINE HELP. **Forum Software © phpBB**. Disponível em <http://wufi-forum.com/index.php>. Acesso em 2021 <http://wufi-forum.com/index.php>. Acesso em 2021.

WUFI PRO 5.3. IBP – **Fraunhofer Institute for Building Physics**. Holzkirchen, Germany, 2013.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Tese (Doutorado) Universidade de Brasília, 2015. 293 p.