

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS EM REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE
FACHADAS POR MEIO DA TERMOGRAFIA**

Autora: Fabíola Martins Mesquita Pereira Nunes

Orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior

Co Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte

Março/2016

Fabíola Martins Mesquita Pereira Nunes

**IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS EM REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE
FACHADAS POR MEIO DA TERMOGRAFIA**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais cimentícios.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Neves de Carvalho Júnior
Co Orientadora: Profa. Dra. Maria Teresa Paulino Aguiar

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2016

Fabíola Martins Mesquita Pereira Nunes

**IDENTIFICAÇÃO DE PATOLOGIAS EM REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE
FACHADAS POR MEIO DE TERMOGRAFIA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Departamento de Engenharia de Materiais, ao William, Ivonete, Ariela e Admilson pelo suporte administrativo.

Aos demais colegas do DEMC.

Ao Prof Dr. Antônio Júnior pela confiança, pela oportunidade de trabalhar ao seu lado e por ser incentivador da superação dos meus limites.

Agradeço a Prof^a. Dra. Maria Teresa pela infinita disponibilidade, por todos os ensinamentos e pela impecável construção do meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Roberto Márcio e ao Pof. Dr. Matheus Porto, pela disponibilidade ao ceder o laboratório e seu bolsistas para desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos colegas e parceiros do LabTerm pela colaboração inestimável.

Ao querido Efrem, obrigada pela paciência, pois muitas horas dedicadas a este trabalho seriam nossas.

A minha família, por me ter dado valores que permitiram ser a pessoa que sou hoje, e por entender minhas ausências e contratempos ao longo deste período.

Aos amigos Ramon Lopes, Renata Martini e Rafael Ferreira pelas parcerias e demais conversas.

Aos meus grandes amigos pela amizade, carinho, disponibilidade e capacidade de me distrair nos momentos de descanso.

À CAPES pelo apoio financeiro.

*"MORPHEUS: It is sometimes a mistake to climb;
it is always a mistake never even to make the attempt
If you do not climb, you will not fall. This is true. But is it that bad to fail, that hard to fall?
Sometimes you wake, and sometimes, yes, you die. But there is a third alternative
TODD: Sometimes you wake up. Sometimes the fall kills you.
And sometimes, when you fall, you fly."
— Neil Gaiman, The Sandman, Vol. 6: Fables and Reflections*

*Mistakes are almost always of a sacred nature. Never try to correct them.
On the contrary: rationalize them, understand them thoroughly.
After that, it will be possible for you to sublimate them.
—Salvador Dali*

RESUMO

A utilização de ensaios térmicos não destrutivos é cada vez mais comum devido, principalmente, ao caráter não intrusivo e não destrutivo da técnica, a facilidade de operação do equipamento e o tempo reduzido para obtenção das imagens resultantes, o que possibilita sua interpretação *in loco*. A termografia infravermelha é utilizada para avaliar a temperatura superficial de diferentes materiais por meio da captação da radiação térmica na sua superfície, e pode ser aplicada em várias situações, como na detecção de objetos em ambientes não iluminados, identificação de defeitos ocultos, inspeções prediais, dentre outros. A utilização da termografia em análises de fachadas apresenta algumas vantagens, já que não existe necessidade de realizar testes diretamente no revestimento (tais como o teste de percussão, ou a procura da identificação de “som cavo” em um sistema de revestimento cerâmico), o que agiliza o processo de avaliação, além de possibilitar a avaliação de uma grande área em uma só inspeção. Patologias relacionadas à aderência de revestimentos cerâmicos em fachadas são comuns, e é importante que sejam identificadas, pois interferem na arquitetura e na durabilidade da edificação. A termografia infravermelha seria uma opção para identificar tais patologias, contudo, existem alguns parâmetros que precisam ser considerados e que podem influenciar esta técnica (como a emissividade do material, temperatura ambiente, umidade relativa e transmissividade do meio). O objetivo deste trabalho é identificar e caracterizar patologias que ocorrem em fachadas utilizando a termografia infravermelha ativa. Para isto, foram construídas amostras de blocos cerâmicos estruturais, utilizando revestimentos cerâmicos assentados de forma correta e assentados com defeitos inseridos propositalmente. Tais resultados foram comparados com os resultados obtidos por simulação teórica. Os resultados mostram que a termografia pode identificar diferenciais de temperatura relevantes para a análise de patologias, mas, devido ao pequeno tempo de análise após o assentamento do revestimento, as patologias não se desenvolveram adequadamente e, assim, não foram identificadas neste estudo.

Palavras-chave: Termografia, Patologias, Revestimentos, Fachadas.

ABSTRACT

The use of non-destructive thermal evaluation (NDTE) is increasingly common mainly due to the non-intrusive and non-destructive nature of this technology, also the ease of operation of the equipment and reduced time to obtain the resulting images, which allows interpretation in loco. Infrared thermography is used to measure the surface temperature of different materials by means of capture of thermal radiation on the surface, and can be applied in various situations, as to detect objects in non-lit environments, identification of hidden defects, building inspections, among others. The use of thermography in facades analysis has some advantages, since there is no need to conduct tests directly in the coating (such as the percussion test, or the search for identification of a "hollow sound" in a ceramic coating system), which streamlines the evaluation process, and enables the evaluation of a large area in a single inspection. Pathologies related to the adherence of ceramic tile facades are common, and it is important to identify those, because they interfere in the architecture and durability of the building. The infrared thermography would be an option to identify such conditions, however, there are some parameters that need to be considered and may influence this technique (as the emissivity of the material, temperature, relative humidity and transmissivity of the medium). The purpose of this work is to identify and characterize injuries that occur on façades using active infrared thermography. In order to achieve this, samples of structural ceramic blocks were built using ceramic tile placed correctly and placed with purposely inserted defects. Such results were compared with those obtained by theoretical simulation. The results show that thermography can identify temperature differences relevant to the analysis of conditions, but due to the short analysis time after the laying of the coating, the conditions have not developed properly and thus have not been identified in this study.

Key-words: Thermography, Pathologies, Coatings, Facades.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVOS	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. Materiais cerâmicos	22
3.2. Histórico da utilização do revestimento cerâmico em fachadas	23
3.3. Sistemas de revestimentos de fachadas	24
3.3.1. Componentes do sistema de revestimentos cerâmicos de fachadas	25
3.3.2. Assentamento do revestimento cerâmico na alvenaria	31
3.4. Patologias do sistema	33
3.5. Ensaio não destrutivo	36
3.6. Histórico da técnica de termografia infravermelha	37
3.7. Ensaio térmico não destrutivo	38
3.8. Mecanismos de transferência de calor	41
3.8.1. Condução	42
3.8.2. Convecção	42
3.8.3. Radiação	43
3.9. Modelagem matemática do problema da condução de calor na amostra cerâmica	46
3.9.1. Condução unidimensional em regime permanente	46
3.9.2. Condução unidimensional em regime transiente	49
3.10. Termografia em construção civil	52
4. MATERIAIS E MÉTODOS	59

4.1.	Materiais	59
4.2.	Método.....	60
4.2.1.	Amostras	60
4.2.2.	Bancada de testes.....	63
4.2.3.	Equipamentos.....	64
4.3.	Ensaios preliminares	65
4.4.	Simulação	66
4.5.	Ensaios termográficos.....	67
4.6.	Análise dos dados.....	69
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	76
5.1.	Ensaios preliminares	76
5.2.	Simulação	76
5.3.	Procedimentos experimentais	77
5.3.1.	Termogramas (Amostra S1)	78
5.3.2.	Termogramas (Amostra S2)	80
5.3.3.	Termogramas (Amostra S3)	80
5.3.4.	Termogramas (Amostra S4 - REF)	81
5.3.5.	Termogramas (Amostra S5 - TAE)	83
5.3.6.	Termogramas (Amostra S6 - PULV)	84
5.3.7.	Termogramas (Amostra S7 - OIL).....	85
5.3.8.	Termogramas (Amostra S8 - SAT)	87
5.4.	Validação dos ensaios	91

6. CONCLUSÕES.....	96
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXO 1	110
APENDICE 1.....	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Imagens da Igreja de São Francisco de Assis – Pampulha / BH	24
Figura 3.2: Esquema de uma placa de cerâmica.....	29
Figura 3.3: Fabricação dos revestimentos cerâmicos.....	30
Figura 3.4: Tipos de rupturas	35
Figura 3.5: Representação esquemática de técnicas de termografia passivas e ativas. Fonte: Bagavathiappan <i>et al</i> (2013), p. 40.....	39
Figura 3.6: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação	42
Figura 3.7: Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção	43
Figura 3.8: Espectro eletromagnético e as faixas espectrais onde se inserem os termovisores comerciais.....	44
Figura 3.9: Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida, refletida e transmitida.	46
Figura 3.10: Transferência de calor unidimensional por condução em uma parede plana	47
Figura 3.11: Resistência térmica de uma parede em analogia a um circuito elétrico.	48
Figura 3.12: Distribuição em seções de um componente plano.....	49
Figura 3.13: Distribuição de temperatura transiente em um sólido semi infinito para três condições de superfície: temperatura constante da superfície (Caso 1), fluxo de calor constante na superfície (Caso 2) e convecção na superfície (Caso 3).	51
Figura 3.14: Componentes da radiação térmica existentes entre o objeto em estudo e o termovisor	53
Figura 3.15: Diagrama simplificado de um termovisor genérico.....	54

Figura 3.16: Vista da fachada de um edifício e do termograma correspondente.	54
Figura 4.1: Bloco estrutural em cerâmica.	59
Figura 4.2: Esquema da proposta do método.....	60
Figura 4.3: Esquema de montagem das amostras.	61
Figura 4.4: Identificação das camadas das amostras.	62
Figura 4.5: Esquema de montagem das amostras.	62
Figura 4.6: Túnel térmico e configuração interna de lâmpadas	64
Figura 4.7: Equipamentos utilizados para as medições.....	65
Figura 4.8: Termograma que demonstra o maior aquecimento na porção superior da amostra.....	66
Figura 4.9: Posicionamento dos equipamentos	68
Figura 4.10: Identificação das placas dos blocos com revestimento cerâmico	69
Figura 4.11: Interface do QuickReport em análise da área superficial do bloco.....	70
Figura 4.12: Caixa de diálogo do EES com relação matemática para determinação do fator de forma.....	72
Figura 4.13: Caixa de diálogo do EES com a relação utilizada para o cálculo da difusividade.	74
Figura 4.14: Caixa de diálogo do EES com a tabela paramétrica com os dados de temperatura por instante de tempo.....	74
Figura 5.1: Primeira simulação no software Ansys	76
Figura 5.2: Segunda simulação no software Ansys	77
Figura 5.3: Termogramas dos ensaios da amostra S1	78
Figura 5.4: Bloco cerâmico estrutural utilizado	79

Figura 5.5: Representação esquemática das placas cerâmicas sobre a amostra S1	79
Figura 5.6: Termogramas dos ensaios da amostra S2	80
Figura 5.7: Termogramas dos ensaios da amostra S3	81
Figura 5.8: Termogramas dos ensaios da amostra S4	82
Figura 5.9: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S4.....	82
Figura 5.10: Termogramas dos ensaios da amostra S5	83
Figura 5.11: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S5.....	84
Figura 5.12: Termogramas dos ensaios da amostra S6	85
Figura 5.13: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S6.....	85
Figura 5.14: Termogramas dos ensaios da amostra S7	86
Figura 5.15: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S7.....	86
Figura 5.16: Termogramas dos ensaios da amostra S8	87
Figura 5.17: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 90 minutos de ensaio da amostra S8.....	88
Figura 5.18: Perfil de temperatura média das amostras ao longo do tempo	88
Figura 5.19: Perfil de temperatura da parte inferior da amostra.....	90
Figura 5.20: Perfil de temperatura das amostras.....	91
Figura 5.21: Caixa de diálogo do EES com valor encontrado para o fator de forma.	92
Figura 5.22: Dimensões consideradas da amostra S1	92

Figura 5.23: Dimensões consideradas das amostras S2; S3; S4; S5; S6; S7; S8. 93

Figura 5.24: Variação da difusividade de todas amostras, calculada ao longo do tempo 94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Camadas e materiais constituintes de revestimentos cerâmicos de fachadas aderidos	25
Tabela 3.2 – Classificação das argamassas colantes de acordo com a norma NBR 14.081 (ABNT, 2012)	26
Tabela 3.3 - Principais requisitos e propriedades das argamassas para as diferentes funções	28
Tabela 3.4: Histórico de pesquisas com termografia passiva	55
Tabela 3.5: Histórico de pesquisas com termografia pulsada	56
Tabela 3.6: Histórico de pesquisas com termografia ativa: pulsada por fase.....	58
Tabela 4.1: Identificação das amostras para cada situação	63
Tabela 4.2: Variáveis.....	70
Tabela 4.3: Valores de condutividade térmica para o ar, cerâmica, concreto, argamassa industrializada e emboço.....	73
Tabela 5.1: Medidas da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar antes dos ensaios termográfico.	77
Tabela 5.2 – Tempo necessário para variar em 2°C a face externa da amostra.....	89
Tabela 5.3: Valores para resistência térmica total e condutividade térmica equivalente das amostras	93
Tabela 5.4: Valores das constantes do modelo matemático para o sólido semi infinito ...	94
Tabela 5.5: Últimos valores de difusividade térmica encontrados para todas amostras ..	95

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área, m ²
c _p	Calor específico a pressão constante, J/kg.K
d	Distância, m
E	Poder emissivo
e	Espessura do bloco, m; espessura da camada, m
F _{ij}	Fator de forma
G	Radiação absorvida
h _c	Coeficiente de transferência de calor por convecção, W/m ² .K
h _r	Coeficiente de transferência de calor por radiação, W/m ² .K
k	Condutividade térmica, W/m.K
L	Comprimento característico, m
Pot	Potência, W
q	Taxa de transferência de calor, W
q"	Fluxo de calor, W/m ²
R	Resistência térmica, m ² .K/W
R _t	Resistência térmica total (ou equivalente), m ² .K/W
S	Sinal da termocâmara
T	Temperatura, °C ou K
T _e	Temperatura da superfície externa, °C ou K
T _i	Temperatura da superfície interna, °C ou K
t	Tempo, s
α	Difusividade térmica, m ² /s; absorptância
ε	Emissividade
ρ	Massa específica, kg/m ³ ; refletância
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Transmitância

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistencia inicial

CCD - Charged Couple Device

CP – V – Cimento Portland tipo V

DEMC - Departamento de Engenharia de Materiais e Construção

DEMEC – Departamento de Engenharia Mecânica

EPU – Expansão por umidade

LabTerm – Laboratório de Termometria

LT - lock in thermography (termografiamodulada)

MDF - Medium Density Fiberboard

NBR – Norma Brasileira

NDT – Non Destructive testing

NDTE - Non Destructive testing and evauation

PT – Pulsed Thermography (termografia pulsada)

SH - step heating thermography (aquecimento contínuo)

1. INTRODUÇÃO

O revestimento de fachadas com placas cerâmicas, em Minas Gerais, é bastante comum, e se dá por inúmeras razões, como sua durabilidade e resistência a agentes atmosféricos. (Edis *et al.*, 2014). Todavia, há defeitos que são recorrentes a este tipo de revestimento, como falhas nas juntas, trincas (nas placas ou no rejunte), destacamentos e eflorescências, que podem possuir causas variadas.

Patologias em revestimentos são comuns e, portanto, estudadas por diversos pesquisadores. Bauer (1997) aponta como causas para as patologias nestes sistemas a inexistência de projeto, desconhecimento das características dos materiais, utilização de materiais inadequados, erros de execução, desconhecimento ou não observância de Normas Técnicas, além de falhas na manutenção. Cincotto *et al.* (1995) identificaram também como causas as características dos materiais e mistura dos mesmos, e perceberam que a ação de fatores externos sobre o revestimento e a interrelação entre estes também afeta a durabilidade e o desempenho do sistema.

Estes fatores identificados pelos autores têm como consequência não só as patologias visíveis: a não qualidade na construção apresenta desdobramentos importantes, como seus custos, que podem variar de país para país. Em Portugal e França há sistemas de seguros da construção, o que permite aos profissionais e usuários verificar os gastos empregados na manutenção dos edifícios, desde o início de sua utilização. Identificou-se, em Portugal, que algumas empresas de construção gastam, com manutenção, mais de 2% do custo total da obra no período de garantia (5 primeiros anos). Percebe-se, assim, que a patologia na construção civil é um problema de grande relevância, tanto no âmbito técnico quanto econômico. (Freitas e Alves, 2009)

Patologias em revestimentos de fachadas são bastante frequentes, e devem ser identificadas com a maior antecedência possível, pois interferem negativamente na arquitetura e na durabilidade (abertura de passagens a elementos que possam prejudicar os componentes da edificação) e podem, em alguns casos, desencadear graves acidentes. A perda na qualidade estética da edificação influencia no conforto do usuário, assim como no valor final do imóvel e no tempo de venda. A falha no revestimento permite a entrada de gases e água, o que pode conduzir a sérias deteriorações no interior dos edifícios, podendo ser as mesmas de ordem estética ou até mesmo estrutural (CARVALHO JR. *et al.*, 1999). A literatura identifica diversos casos de patologias em revestimentos de fachadas com acidentes, como em Costa e Silva (2001), Campante (2001), Mansur *et al.* (2006), Grilo e Calmon (2000). A identificação das patologias com

maior antecedência pode reduzir os custos de manutenção, tanto para as construtoras (período de garantia), quanto para o usuário final.

A identificação de patologias antecipadamente é abordada, neste trabalho, a partir da termografia infravermelha, uma técnica de ensaios não intrusivo e não destrutivo do objeto de estudo. A técnica é aplicada utilizando-se um termosensor ou termocâmera, que capta os sinais de radiação infravermelha. A faixa de comprimento de onda em que se encontra esta radiação está fora da faixa de luz visível ao olho humano. Com a captação da radiação infravermelha emitida pelo objeto, associado a outros parâmetros codificados pelo aparelho, é possível identificar gradientes de temperatura no objeto de estudo e, com uma maior análise, os valores destas temperaturas. De posse destas informações e com conhecimento do funcionamento do objeto de estudo, pode-se avaliar e identificar a presença de defeitos no mesmo. Uma grande limitação desta técnica é a profundidade da patologia a ser avaliada, já que o equipamento não identifica defeitos a partir de certas profundidades. Utilizando os dados fornecidos pelas imagens térmicas (termogramas), é possível realizar uma análise matemática e identificar uma importante propriedade do material: a difusividade, que representa a capacidade de um material conduzir energia térmica. Por meio desta propriedade, pode-se identificar falhas na transferência de calor em um material.

A utilização de técnicas de investigação térmicas e sem contato tem ganhado força devido às suas vantagens expressivas sobre os sistemas com contato, como a facilidade de operação, a alta velocidade da medição e obtenção de respostas, a relativa facilidade na interpretação de resultados e a possibilidade de utilização sobre objetos em movimento (CHRZANOWSKI, 2001; MALDAGUE, 2000; TITMAN, 2001). A termografia envolve investigações relativas aos fenômenos de transferência de calor nas mais variadas áreas. Atualmente, há vários casos de aplicação da termografia, como detecção da presença de objetos em ambientes não iluminados, diagnóstico de algumas doenças, identificação de defeitos e inclusões não aparentes em estruturas de concreto e obras de arte. (BAGAVATHIAPPAN, *et al*, 2010; SALES, 2008; TAVARES, 2006)

A dimensão das fachadas é um dificultador para a avaliação e identificação de patologias, pois as técnicas mais comuns existentes requerem que o técnico faça uma verificação diretamente no revestimento, placa por placa, como o teste de percussão, para a identificação de som cavo em um sistema de revestimento cerâmico. A realização deste exame por meio da termografia permite que áreas maiores sejam avaliadas em um menor intervalo de tempo, possibilitando uma redução no tempo em campo, o que agiliza o processo de diagnóstico.

Neste trabalho foi construído um túnel térmico para, por meio da termografia ativa (técnica “*step heating*”), identificar patologias em revestimentos cerâmicos de fachadas, utilizando um termovisor. O túnel foi desenvolvido com base nos estudos de Barbosa (2014), pois possibilita boa vedação do sistema e, portanto, menos perdas de calor. As amostras desenvolvidas tinham como objetivo reproduzir o revestimento cerâmico de fachadas, portanto foram utilizadas amostras compostas de blocos cerâmicos estruturais assentados com argamassa de assentamento, e revestidos com chapisco, emboço, argamassa colante, placas cerâmicas e rejunte. As amostras diferem na forma de assentamento: foram reproduzidos alguns erros de assentamento frequentemente cometidos em obra, como tempo em aberto da argamassa colante estendido, material pulverulento na superfície da argamassa colante, substâncias gordurosas no tardo da placa cerâmica, placas cerâmicas encharcadas com água.

Após a realização dos ensaios e das análises, verificou-se que, no volume de ar interno ao túnel térmico pode haver convecção, que pode ser atenuada com uma distribuição uniforme da fonte de calor utilizada. As amostras com menos camadas de revestimentos são melhores condutoras de calor do que aquelas com revestimento cerâmico, por meio da análise dos valores de difusividade de cada sistema. A transferência de calor nas amostras com revestimento cerâmico apresentou diferenças pouco significativas entre uma amostra e outra, provavelmente devido a falha na aderência do revestimento à argamassa. Comprovou-se, também, a validade da termografia para identificar a estrutura interna da amostra, por meio dos diferenciais de temperatura lidos na sua superfície.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral: avaliar a identificação de patologias em revestimentos cerâmicos utilizando termografia infravermelha.

Objetivos específicos:

- Projetar e construir um túnel térmico (bancada experimental) para avaliar a difusividade do sistema, utilizando a metodologia proposta e validada por Barbosa (2014);
- Verificar a temperatura da superfície do sistema composto por blocos de alvenaria assentados e revestidos por placas cerâmicas e de suas partes, isoladamente:
 - Bloco de alvenaria
 - Blocos assentados com argamassa industrializada
 - Blocos assentados com argamassa industrializada + chapisco (areia e cimento)
 - Blocos assentados com argamassa industrializada + chapisco + emboço (argamassa industrializada)
 - Blocos assentados com argamassa industrializada + chapisco + emboço + assentamento das placas cerâmicas (argamassa tipo AC-II)
- Comparar os resultados experimentais, e identificar diferenças de temperatura entre os sistemas que permitam realizar a identificação das patologias;
- Verificar a difusividade térmica dos sistemas por meio de análise matemática, utilizando o modelo do sólido semi-infinito;
- Comparar os resultados experimentais e os teóricos, e identificar as divergências e semelhanças entre eles.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ocorrência e manifestação de patologias está relacionada à especificação e utilização adequada dos materiais. Assim, as características dos materiais devem ser avaliadas com foco no objetivo em questão, além de critérios específicos. Posteriormente, deve-se considerar o desgaste do material e, finalmente, o seu custo. (CALLISTER, 2012)

As propriedades dos materiais dividem-se em: mecânica, elétrica, térmica, magnética, óptica e deteriorativa. A propriedade mecânica relaciona-se à deformação do material como consequência da aplicação de uma carga ou força. A elétrica refere-se à resposta ao estímulo de um campo elétrico. A térmica relaciona-se à variação de temperatura. A magnética decorre da resposta do material à ação de um campo magnético. A óptica relaciona-se ao estímulo da radiação eletromagnética ou luminosa. E, finalmente, a deteriorativa decorre da reatividade química dos materiais. (CALLISTER, 2012; SHACKELFORD, 2008)

Os materiais sólidos são organizados em três categorias básicas: metais, cerâmicos e polímeros. A diferenciação entre eles ocorre, principalmente, por meio da composição química e da estrutura atômica. Há outras três categorias de materiais: compósitos, semicondutores e biomateriais. Os materiais compósitos se constituem de uma combinação de dois ou mais materiais classificados entre as categorias básicas. (CALLISTER, 2012)

3.1. Materiais cerâmicos

A cerâmica é um material muito utilizado na construção civil, tanto em elementos de vedação (alvenarias) quanto nos elementos de revestimento das edificações brasileiras, o que motivou o foco do estudo nestes materiais. É um material inorgânico composto por elementos metálicos e não metálicos, o que a caracteriza como material compósito. As ligações interatômicas, nestes materiais, são predominantemente iônicas, com alguma natureza covalente. (CALLISTER, 2012)

São materiais rígidos e resistentes, e apresentam maior resistência à compressão e ao cisalhamento do que à tração; são duros (resistem à pressão sem sofrer deformação ou riscos), devido à elevada energia de ligação entre os átomos; são frágeis (pouco dúcteis) e com baixa tenacidade às fraturas; apresentam alta estabilidade química e térmica, consequência das ligações iônicas existentes; e baixas condutividades elétrica e térmica, devido ao pequeno número de elétrons livres. Além disso, apresentam baixo coeficiente de dilatação térmica, quando comparadas aos metais. (CASCUDO *et al.*, 2007; CALLISTER, 2012)

O processo de manufatura da cerâmica inicia-se na obtenção de uma massa a base de argila, que será moldada, submetida a secagem lenta e cozida em altas temperaturas. (KAZMIERCZAK, 2007). As argilas para aplicação na indústria cerâmica devem apresentar propriedades essenciais, como plasticidade, capacidade de absorção e cessão de água, comportamento ao calor; e propriedades secundárias, como fusibilidade, porosidade e cor. A variação de massa pode ser de natureza física (densidade, porosidade, dureza, resistência, plasticidade, condutividade térmica e elétrica) ou química (desidratação, decomposição, formação de novos compostos), e pode ser verificada por meio de análise termogravimétrica. (PETRUCCI, 1978). Os materiais cerâmicos compostos de barro vermelho são muito utilizados na construção civil. (KAZMIERCZAK, 2007).

3.2. Histórico da utilização do revestimento cerâmico em fachadas

A utilização do revestimento cerâmico no Brasil foi estimulada pela influência cultural, econômica e política de Portugal que, desde o século XVI, era um dos países que mais aplicava o revestimento cerâmico. O interesse pela cerâmica, em Portugal, iniciou-se com as Grandes Navegações, no séc. XV, momento em que a Europa conheceu outras culturas e absorveu parte delas. A princípio, a aplicação deste material restringiu-se aos revestimentos de espaços internos, com azulejos. Posteriormente foram utilizados também como revestimento externo, mas apenas em pináculos e cúpulas de igrejas, por ser um material caro. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

No século XVII, azulejos em estilo barroco começaram a ser encomendados de Lisboa para o Brasil, trazidos em forma de painéis, utilizados apenas com função de ornamentação. No Brasil, assim como em Portugal, os revestimentos cerâmicos possuíam alto custo, portanto, eram aplicados em menores áreas, principalmente em interiores. Aos poucos foram aplicados em painéis externos e jardins, até que, no séc. XVIII começou a ser utilizado em fachadas. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

Em fins do século XIX e início do séc. XX iniciou-se, no Brasil, o desenvolvimento do setor industrial, e abriram as primeiras fábricas de revestimento cerâmico. O modernista Le Corbusier incentivou a utilização da cerâmica de revestimento. O estilo Modernista procurava conciliar a arquitetura moderna com as questões do regionalismo e com as tradições locais. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

Na década de 1940, o arquiteto modernista Oscar Niemeyer utiliza a aplicação do azulejo no Conjunto da Pampulha (Igreja São Francisco de Assis, Cassino, Iate Clube, Casa do Baile). Os azulejos foram utilizados em forma de painéis, com ilustrações variadas: conceitos históricos, geométricas, abstratas. A Igreja de São Francisco de Assis (Figura 3.1) é um dos

marcos da Arquitetura Moderna no Brasil. Seu painel representa a história de São Francisco, foi pintado por Portinari, e constitui uma de suas obras mais importantes no campo da azulejaria. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)



Figura 3.1: Imagens da Igreja de São Francisco de Assis – Pampulha / BH
Fonte: <http://arqdelicia.blogspot.com.br/2012/08/igreja-sao-francisco-de-assis-oscar.html>

Quando utilizado integralmente em fachadas, o revestimento cerâmico é padronizado, como forma de redução de custos. Esta utilização ocorreu com muita frequência até o final da década de 1960. Após a inauguração de Brasília fica clara uma regionalização da arquitetura, e ocorre uma mistura do Estilo Moderno com as características de cada local. Com isso, percebe-se redução do uso do material cerâmico em fachadas em algumas regiões, e seu crescimento, em outras. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

3.3. Sistemas de revestimentos de fachadas

Os revestimentos verticais têm sido denominados, de forma genérica, por *cladding* (inglês britânico) ou *siding* (inglês americano). Os revestimentos cerâmicos de fachada podem ser classificados utilizando-se diversos critérios, como a técnica construtiva utilizada ou seu comportamento após a aplicação. Os revestimentos de fachada podem apresentar aplicação de pinturas, placas pétreas, tijolo aparente, argamassa decorativa ou revestimento cerâmico. (MEDEIROS E SABBATINI, 1999)

Os revestimentos podem ser aderidos ou não aderidos. Os primeiros trabalham completamente aderidos sobre bases e substratos, como é o caso dos revestimentos cerâmicos de fachada. Os revestimentos não aderidos podem apresentar camadas com funções de isolamento térmico, acústico; e de camadas de impermeabilização, que não permitem a aderência entre as camadas. (MEDEIROS E SABBATINI, 1999)

3.3.1. Componentes do sistema de revestimentos cerâmicos de fachadas

A norma NBR 13.755 (ABNT, 1997d) estabelece os requisitos para execução, fiscalização e recebimento de paredes externas com placas cerâmicas e argamassa colante em fachadas. Esta norma define como revestimento externo o conjunto de camadas, que devem estar superpostas e intimamente ligadas. É composto por: estrutura suporte, alvenarias, camadas sucessivas de argamassas, e revestimento final. A função do revestimento externo é proteger a edificação das intempéries e dar acabamento estético.

As normas NBR 13.816 (ABNT, 1997a); NBR 13.817 (ABNT, 1997b), NBR 13.818 (ABNT, 1997c) regulam a terminologia, classificação, especificação e métodos de ensaios de revestimentos cerâmicos. A norma NBR 13.816 (ABNT, 1997a) define revestimento cerâmico como o conjunto formado pelas placas cerâmicas, argamassa de assentamento e rejunte. A Tabela 3.1 identifica as camadas e materiais constituintes de revestimentos cerâmicos de fachadas aderidos.

Tabela 3.1 – Camadas e materiais constituintes de revestimentos cerâmicos de fachadas aderidos

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

Fonte: Elaborado pela autora com base em Sabbatini e Medeiros, 1999 e ABNT, 1997 d

O revestimento cerâmico é um sistema, e sua qualidade e desempenho dependem de alguns fatores, como a qualidade da base ou substrato; a qualidade do chapisco; a qualidade da placa cerâmica (considerando-se sempre o local de uso); a correta especificação do sistema; e correto assentamento. O assentamento envolve algumas variáveis, sendo algumas delas a preparação e aplicação da argamassa de assentamento; especificação da argamassa de rejunte; e mão de obra. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

Os tijolos maciços e os blocos cerâmicos são compostos por cerâmica vermelha, e são regulamentados pela norma NBR 15.270 (ABNT, 2005), que define que os blocos cerâmicos podem ser estruturais ou de vedação. Os primeiros apresentam a função de suportar as cargas estruturais previstas em cálculo, e devem ser assentados com os furos no sentido vertical. (KAZMIERCZAK, 2007).

Na alvenaria, seja de vedação ou estrutural, os blocos são elementos de grande importância. Para que estes elementos formem a alvenaria, deve-se utilizar argamassa, que podem ser dosadas em obra, ou industrializadas. As preparadas em obra são confeccionadas a partir da mistura homogênea de aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água. Em alguns casos pode conter, também, aditivos ou adições minerais (CARASEK, 2007).

As argamassas adesivas industrializadas são uma mistura pré dosada pulverulenta, no estado seco, e são regulamentadas pela norma NBR 14.081 (ABNT, 2012). Esta norma classifica as argamassas colantes nas seguintes categorias: tipo I, tipo II, tipo III, tipo E e tipo D (Tabela 3.2). A capacidade de retenção de umidade é a propriedade que diferencia estas duas argamassas: a industrializada retém melhor a umidade se comparada à virada em obra, o que permite sua aplicação em camadas finas sem prejuízo para a hidratação da pasta. Além disso, o aditivo retentor de água presente na argamassa colante elimina a necessidade de deixar as placas cerâmicas imersas em água antes do assentamento.

Tabela 3.2 – Classificação das argamassas colantes de acordo com a norma NBR 14.081 (ABNT, 2012)

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

Fonte: Elaborado pela autora com base em ABNT, 2012

Na construção civil, as argamassas são utilizadas no assentamento de alvenarias e nas etapas do revestimento: emboço, reboco, revestimento de camada única de paredes e tetos, contrapisos, e assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra. As funções das argamassas estão ligadas às suas finalidades ou aplicações e, consequentemente, definem as suas propriedades. (CARASEK, 2007)

As argamassas de assentamento possuem as seguintes funções: conectar as unidades de alvenaria para auxiliar na resistência aos esforços laterais; distribuir de maneira uniforme as cargas que atuam na parede por toda a área dos blocos; selar as juntas, para garantir a estanqueidade do pano de alvenaria; absorver as deformações naturais a que a alvenaria está sujeita. Estas funções definem algumas propriedades, como a trabalhabilidade; aderência; resistência mecânica; e a capacidade de absorver deformações. (CARASEK, 2007)

A trabalhabilidade garante as condições para executar a parede. A aderência auxilia na resistência aos esforços de cisalhamento e tração, e garante também a estanqueidade. A aderência da argamassa pode ocorrer por ancoragem mecânica e / ou química. A primeira depende da penetração da pasta nos poros e nos interstícios das camadas adjacentes. A ancoragem química ocorre quando a argamassa possui aditivos químicos (resinas), e deve ser utilizada, principalmente, para cerâmicas e substratos lisos e polidos, e que absorvam pouca ou nenhuma umidade. (CARASEK, 2007)

A resistência mecânica da argamassa não influencia significativamente na resistência final do pano da alvenaria, mas deve apresentar um ganho de resistência suficiente para que seja possível o assentamento de diversas fiadas em um mesmo dia. A capacidade de absorver deformações relaciona-se ao módulo de elasticidade. Além disso, a argamassa precisa deformar sem que as fissuras influenciem no comportamento do sistema. (CARASEK, 2007)

Sobre a base de alvenaria assentada com argamassa é aplicado o substrato, que é constituído, nas fachadas externas, pelo chapisco e pelo emboço. Esta camada pode ser executada com materiais e técnicas construtivas variadas, desde que atenda às solicitações previstas em projeto, assim como às normas correspondentes. A resistência mecânica, deformabilidade, estanqueidade, resistência ao fogo e textura superficial devem apresentar propriedades compatíveis com a camada final de revestimento especificada. O substrato influencia, também, na resistência de aderência com as camadas que constituem o sistema. (FLAIN, 1995)

O chapisco tem a função de preparo da base, para uniformizar a superfície com relação à propriedade de absorção de água, além de melhorar a aderência do revestimento e garantir maior ancoragem do emboço à base. O chapisco, para fachadas externas, é regulado pela norma NBR 13.755 (ABNT, 1996b). (CARASEK, 2007)

O emboço cobre e regulariza a base, e possibilita a aplicação de nova camada, que pode ser reboco ou um revestimento decorativo (como cerâmica) (CARASEK, 2007). O emboço, para fachadas externas, assim como o chapisco, é regulado pela norma NBR 13.755 (ABNT, 1996b). A norma NBR 13.749 (ABNT, 1996a) apresenta as recomendações relativas à sua

resistência e aderência. Para aplicação do reboco, o emboço deve estar finalizado há, no mínimo, 14 dias, para que sejam reduzidos os riscos de descolamentos devido à movimentação da base por retração hidráulica. Esta camada deve se apresentar seca, isenta de poeira, barro, fuligem, substâncias gordurosas, graxas, eflorescências ou outros elementos que possam interferir na aderência com a argamassa colante. (CARVALHO JR, 2005)

Para que resista aos esforços durante sua vida útil, a argamassa de emboço deve apresentar algumas propriedades, como: trabalhabilidade, aderência, durabilidade, resistência mecânica, e capacidade de absorver deformações, assim como a argamassa de assentamento. São considerados importantes parâmetros, também, a retenção de água, consumo de cimento, a função da cal e a retração por secagem. (BARROS, SABBATINI E LORDSLEEN JUNIOR, 1998)

O reboco é utilizado para cobrimento do emboço, e permite a aplicação de uma camada de revestimento decorativo. Finalmente, pode-se aplicar, também, o revestimento decorativo monocamada, que tem a função de regularizar e decorar a superfície. (CARASEK, 2007). A argamassa apresenta diversas funções, que variam de acordo com sua aplicação no edifício. A Tabela 3.3 a seguir lista algumas delas.

Tabela 3.3 - Principais requisitos e propriedades das argamassas para as diferentes funções

Tipo de argamassa	Função	Principais requisitos / propriedades
Argamassa de assentamento de alvenaria (elevação)	• Unir as unidades de alvenaria e ajuda-las a resistir aos esforços laterais • Distribuir uniformemente as cargas atuantes na parede por toda a área resistente dos blocos • Absorver deformações naturais a que a alvenaria estiver sujeita • Selar as juntas	• Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e retenção de água) • Aderência • Capacidade de absorver deformações • Resistência mecânica
Chapisco	• Garantir aderência entre a base e o revestimento de argamassa • Contribuir com a estanqueidade da vedação	• Aderência
Emboço e camada única	• Proteger a alvenaria e a estrutura contra ação do intemperismo • Integrar o sistema de vedação dos edifícios contribuindo com diversas funções (estanqueidade, etc.) • Regularizar a superfície para receber acabamento (piso)	• Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e adesão inicial) • Baixa retração • Aderência • Baixa permeabilidade à água • Capacidade de absorver deformações • Resistência mecânica
Contrapiso	• Regularizar a superfície para receber acabamento (piso) • “Colar” a peça cerâmica ao substrato	• Aderência • Resistência mecânica
Argamassa colante (assentamento de revestimento cerâmico)	• Absorver deformações naturais a que o sistema de revestimento cerâmico estiver sujeito	• Trabalhabilidade (retenção de água, tempo em aberto, deslizamento e adesão inicial) • Aderência • Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) – principalmente para fachadas

Argamassa de rejuntamento (das juntas de assentamento das peças cerâmicas)	• Vedar as juntas • Permitir a substituição das peças cerâmicas • Ajustar os defeitos de alinhamento • Absorver pequenas deformações do sistema	• Trabalhabilidade (consistência, plasticidade e adesão inicial) • Baixa retração • Aderência • Capacidade de absorver deformações (flexibilidade) – principalmente para fachadas
Argamassa de reparo de estruturas de concreto	• Reconstituição geométrica de elementos estruturais em processo de recuperação	• Trabalhabilidade • Aderência ao concreto e armadura originais • Baixa retração • Resistência mecânica • Baixa permeabilidade e absorção de água (durabilidade)

Fonte: Carasek, 2007. P. 874

A argamassa colante (para assentamento de revestimento cerâmico) une as placas cerâmicas ao substrato. O revestimento cerâmico é composto pela base (ou tardo) e pela superfície, e deve apresentar algumas propriedades, utilizadas para verificar sua adequação à cada aplicação (Figura 3.2): absorção de água, expansão por umidade (EPU), resistência mecânica da base da placa. Após a definição da base da placa, podem ser definidas as características da sua superfície, como facilidade de limpeza, coeficiente de atrito, dureza, resistência à abrasão, e resistência ao ataque químico. As especificações em função do local de uso (interior / exterior), devem começar pelas características da base (ou tardo) da placa cerâmica. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

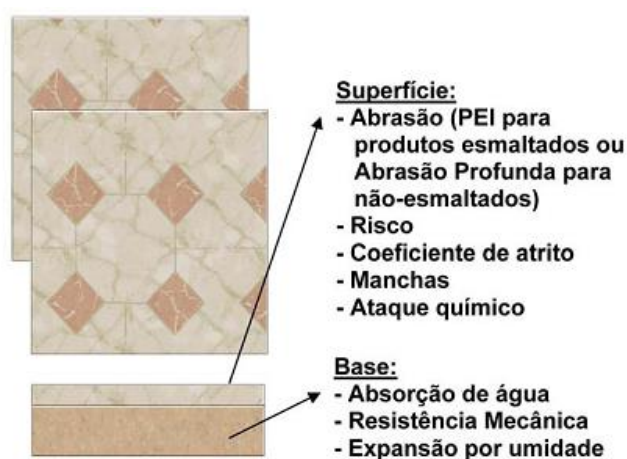


Figura 3.2: Esquema de uma placa de cerâmica.

Fonte: Sichieri, 2003, (apud GASTALDINI e SICHIERI, 2007 p. 592)

A norma NBR 13.816 (ABNT, 1997a) define placas cerâmicas para revestimento como material composto de argila e matéria prima inorgânica, utilizada geralmente para revestir pisos e paredes. São incombustíveis e não são afetadas pela luz. A Figura 3.3 apresenta um diagrama que representa os processos de fabricação de diversos produtos para revestimentos cerâmicos. As principais etapas são: preparação da matéria prima, conformação, secagem, esmaltação e queima. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

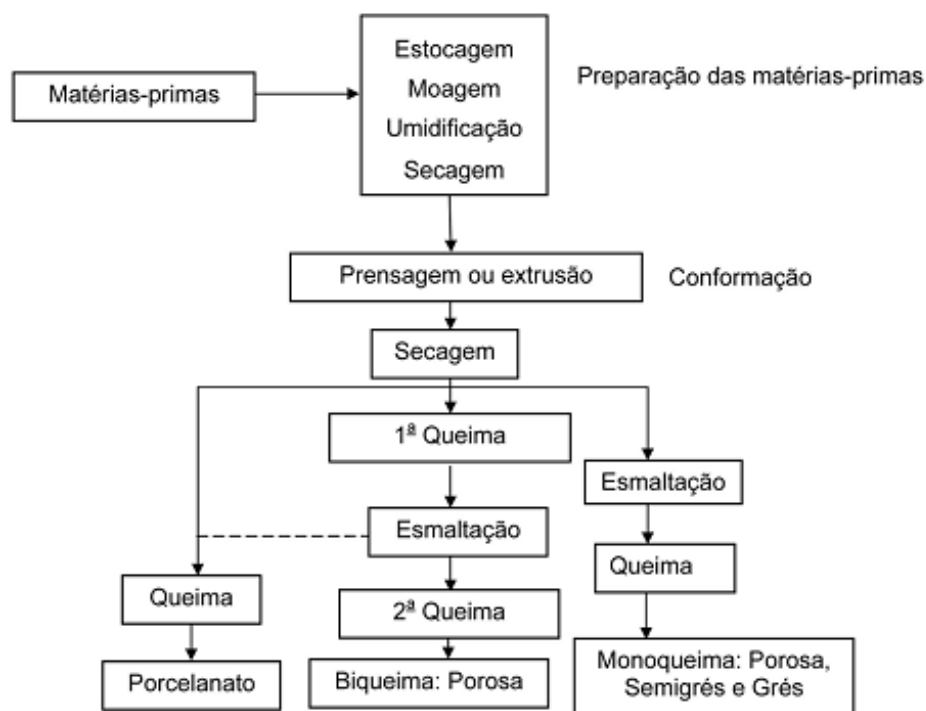


Figura 3.3: Fabricação dos revestimentos cerâmicos
Fonte: GASTALDINI e SICHIERI, 2007 p. 593

Os revestimentos cerâmicos podem ser compostos de uma grande diversidade de matérias primas, que podem ser materiais argilosos ou não argilosos. A composição é definida de acordo com dados técnicos, comerciais, industriais e de logística. Durante a fabricação, a homogeneização, moagem e granulação das matérias primas possuem grande influência na qualidade. Moagem insuficiente resulta em perda de resistência, com formação de quebras e trincas. Quanto mais fina a moagem, maior é a área superficial do grão, e maior o contato entre eles, o que torna o processo de sinterização mais eficiente. A granulação influencia na fluidez da massa, na resistência da peça, no ciclo de prensagem (produção de peças), retração do produto seco (interfere na esmaltação), e na uniformidade da espessura. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

A etapa de secagem objetiva reduzir o teor de umidade do material antes da etapa de queima. A queima pode ser precedida por uma etapa de esmaltação ou não. A temperatura e o tempo de queima do material são definidos de forma que as transformações cerâmicas na base da peça ocorram adequadamente. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

As características e propriedades dos revestimentos cerâmicos são estabelecidos pela norma NBR 13.818 (ABNT, 1997c). O desempenho do revestimento cerâmico depende das condições de uso e do ambiente aos quais estará sujeito. Cada placa cerâmica pode apresentar características físicas e químicas distintas. Algumas destas propriedades são: absorção de água, resistência à abrasão, resistência a manchas e ataques químicos,

resistência ao choque térmico, resistência ao gretamento, resistência ao chumbo e ao cádmio, coeficiente de atrito, dureza. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

A absorção de água está relacionada com a porosidade do material; sua resistência ao impacto e com o módulo de resistência à flexão; resistência ao congelamento; expansão por umidade. Em temperaturas muito baixas, a água presente no material congela, aumenta de volume e pode danificar a peça, devido ao aumento das tensões internas. Da mesma forma, materiais com alta absorção de água podem apresentar elevada EPU, com alteração nas dimensões, o que pode causar destacamento da placa cerâmica, devido ao estufamento. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

A resistência à abrasão é definida como a resistência que a peça apresenta ao desgaste superficial. A facilidade para remoção de manchas é muito importante em algumas aplicações, como cozinhas, hospitais, garagens, entre outros. Quanto mais lisa e menos porosa for a superfície da placa, mais fácil é sua limpeza. A resistência ao ataque químico é dividida em categorias de uso residencial e industrial. A resistência ao choque térmico é importante para aplicações em locais que sofrem alterações repentinas na temperatura, e que resultam na dilatação do conjunto, e saída, sob pressão, da água adsorvida nos poros da placa. O gretamento consiste em pequenas fissuras que surgem no esmalte da placa cerâmica, e que pode ser causada por uma elevada expansão por umidade. Não é permitido para nenhuma faixa de absorção de água. A resistência ao chumbo e cádmio é de grande importância em locais com manipulação de alimentos. (GASTALDINI e SICHIERI, 2007)

A norma NBR 13.755 (ABNT, 1996) recomenda a inclusão de juntas, definidas como o espaço regular entre duas peças, e que pode ser composta de materiais idênticos ou não. As juntas são classificadas nas seguintes categorias: estrutural, de assentamento, de movimentação, de dessolidarização. Têm a função de absorver as tensões do sistema, originadas, principalmente, por deformações. O rejuntamento das placas deve ser iniciado com pelo menos três dias após o assentamento. Para cada tipo e finalidade de junta há uma argamassa ou material elastomérico recomendados.

3.3.2. Assentamento do revestimento cerâmico na alvenaria

Para que a execução do revestimento cerâmico seja eficaz, é indispensável a atenção em todas as fases, utilizando-se de um projeto, correta escolha de materiais, emprego de mão de obra qualificada. Deve ser realizado adequado preparo da base, escolha da argamassa adequada, assim como seu correto preparo e aplicação, e cuidado na especificação das placas cerâmicas.

A base que irá receber o revestimento deve atender a alguns requisitos: a estrutura e alvenaria devem estar finalizadas; a argamassa de regularização deve atender às normas NBR 7.200 (ABNT, 1998) e NBR 13.749 (ABNT, 2013), não deve exceder 3,0 cm de espessura, não deve conter em sua composição cimento ou gesso, deve estar finalizada com no mínimo 14 dias de antecedência com relação ao início da execução do revestimento, a sua superfície deve apresentar-se limpa, isenta de materiais que possam comprometer a aderência, sem trincas, no esquadro, com planeza e com acabamento sarrafeado áspero; recomenda-se que a superfície seja umedecida, sem saturação, em casos de locais com insolação e vento. (BAUER, 1997)

De acordo com a norma NBR 13.755 (ABNT, 1996), a base é o substrato constituído por superfície plana de paredes, sobre a qual é aplicada a argamassa colante, para assentamento de placas cerâmicas. Algumas características podem influenciar o desempenho do sistema, como a rugosidade, capacidade de absorção de água, presença ou não de materiais contaminantes, e planicidade das superfícies. A rugosidade interfere na aderência do sistema à base, assim como a capacidade de absorção de água, já que a água presente na argamassa de emboço é parcialmente perdida para o ambiente e para a base. A planicidade e o prumo se relacionam à integridade do revestimento. Há tolerâncias com relação às características geométricas do substrato, para que o revestimento desempenhe suas funções, e que se evite desperdícios de material e mão de obra. (FLAIN, 1995)

A especificação da argamassa colante adequada ao uso é de fundamental importância para um bom desempenho do sistema de revestimento cerâmico. As argamassas colantes devem atender à norma NBR 14.081 (ABNT, 2012), que especifica os diversos parâmetros necessários ao seu desempenho, como resistência de aderência, cura, tempo em aberto e resistência ao deslizamento.

A argamassa colante, ao ser misturada com água, origina um sistema composto por três fases: sólido granulado, líquido, e ar. Os aditivos formam uma dispersão coloidal que se interpõe entre as partículas de cimento e lubrifica o contato entre as partículas sólidas, modificando a plasticidade da argamassa. A aderência inicial da argamassa colante depende desta plasticidade e da atividade superficial do aditivo. (BAUER, 1997).

Há um intervalo de tempo mínimo para que a argamassa colante adquira as propriedades mínimas necessárias para sua aderência após a mistura do produto anidro com a água de amassamento. Neste intervalo ocorrem as reações dos constituintes ativos do material, principalmente a passagem dos polímeros orgânicos, a dissolução coloidal e as primeiras etapas da hidratação do cimento. Este tempo é, geralmente, de 15 minutos, e também deve estar especificado na embalagem, pois alguns aditivos podem alterá-lo.

Após a mistura, a argamassa possui uma vida útil, que é condicionada ao tempo de pega. Assim, seu tempo de uso máximo é, geralmente, de 2h30 min. Após seu endurecimento, a mistura deve ser descartada, e não se deve adicionar mais água para sua utilização. O tempo em aberto da argamassa é o maior intervalo de tempo no qual uma placa cerâmica pode ser assentada sobre a pasta de argamassa colante, após a aplicação desta última sobre a base. (ABNT, 2012)

A expansão por umidade (ou dilatação higroscópica) da placa cerâmica é um dos fatores que pode influenciar no descolamento do revestimento cerâmico. Este fenômeno é causado pela adsorção de água (água retida nos poros do material, que modifica a sua estrutura, com consequente aumento de volume). (BAUER, 1997)

Outra variável que interfere no desempenho do revestimento cerâmico são as juntas de movimentação: juntas intermediárias, mais largas que as de assentamento, com a função de aliviar tensões geradas pela movimentação da parede e do revestimento. A execução inadequada das juntas de assentamento pode originar patologias relacionadas à infiltração de água no sistema, que pode gerar esforços na argamassa e na placa cerâmica resultantes de variação volumétrica por absorção de água, assim como possível formação de vapor d'água e eflorescências. A norma NBR 13.754 (ABNT, 1996) e a norma NBR 13.755 (ABNT, 1997d) regulamentam as características das juntas para revestimentos cerâmicos.

3.4. Patologias do sistema

Os revestimentos cerâmicos de fachadas são bastante utilizados em Minas Gerais devido, também, à sua durabilidade. Estes materiais são bastante susceptíveis a patologias, como falhas em juntas, trincas, deslocamentos, eflorescências, entre outros. (EDIS *et al.*, 2014). São diversas as causas das falhas em revestimentos: inexistência ou deficiência de projeto, ausência de juntas de movimentação, desconhecimento das características da argamassa, das placas cerâmicas e dos materiais utilizados nas juntas, uso de materiais inadequados, erros de execução em qualquer etapa do revestimento, não observância das normas técnicas, e problemas de manutenção. É bastante comum o descolamento de revestimentos cerâmicos. São citadas como causas comuns: ausência de juntas de movimentação, erros de execução, e falta de rejuntamento. (BAUER, 1997).

O descolamento pode ocorrer entre o tardo (ou base da placa cerâmica, representada na Figura 3.4 e argamassa; ou entre a argamassa e a base. Com o descolamento de peças cerâmicas, abre-se caminho para a atuação dos agentes atmosféricos e entrada de elementos nocivos, que podem originar inúmeras outras patologias (BAUER, 1997). Esta patologia se manifestou nos painéis de azulejo da fachada da Igreja da Pampulha, em Belo

Horizonte, obra de Candido Portinari, em projeto arquitetônico de Oscar Niemeyer (TAVARES, 2006).

O diagnóstico de falhas e anomalias é realizado por meio de ensaios específicos, que podem ser destrutivos ou não (TEIXEIRA, 2012). Os primeiros causam danos à amostra, podendo inutilizá-la. Já os ensaios não destrutivos, não comprometem a integridade ou a vida útil da amostra. Alguns quesitos são importantes para que uma técnica de ensaios seja utilizada: exatidão¹; deve permitir a inspeção de áreas maiores ou mais específicas; deve ser econômica; não pode ser inconveniente aos usuários do local. Outros são bastante desejáveis, como a repetitividade e o caráter não destrutivo do ensaio. (MALHOTRA e SIVASUNDARAM, 1991)

A técnica mais utilizada para identificar descolamentos em revestimentos cerâmicos é a técnica do som cavo. A norma NBR 13.755 (ABNT, 1997) define, como uma das formas de verificar a aderência do revestimento, a percussão das placas cerâmicas com objeto não contundente, antes de iniciar o rejuntamento. A presença do som cavo indica problema de aderência, que pode ser da placa à camada de regularização subjacente, desta ao chapisco, ou do chapisco à base (alvenaria ou estrutura). Este método é subjetivo, por depender da experiência e conhecimento do profissional.

A norma NBR 14.081-4 (ABNT, 2012) regulamenta a determinação da resistência de aderência à tração da argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Esta norma define que o arrancamento da placa deve ocorrer após a cura da argamassa de assentamento. A peça metálica de arrancamento deve ser colada na placa cerâmica pelo menos 72h antes do arrancamento. O ensaio deve ser realizado por tração manual, e a carga deve ser aplicada a uma velocidade uniforme de 250 +/- 50 N/s até a ruptura. A carga máxima (T) deve ser registrada.

Cada placa cerâmica deve ser examinada, e seu tipo de ruptura deve ser descrito (Figura 3.4):

- ruptura do substrato (S)
- ruptura na interface argamassa e substrato (S/A)
- ruptura da camada de argamassa colante (A)
- ruptura na interface argamassa e placa cerâmica (A/P)
- ruptura da placa cerâmica (P)

¹ Grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando.

- falha na colagem da peça metálica (F)

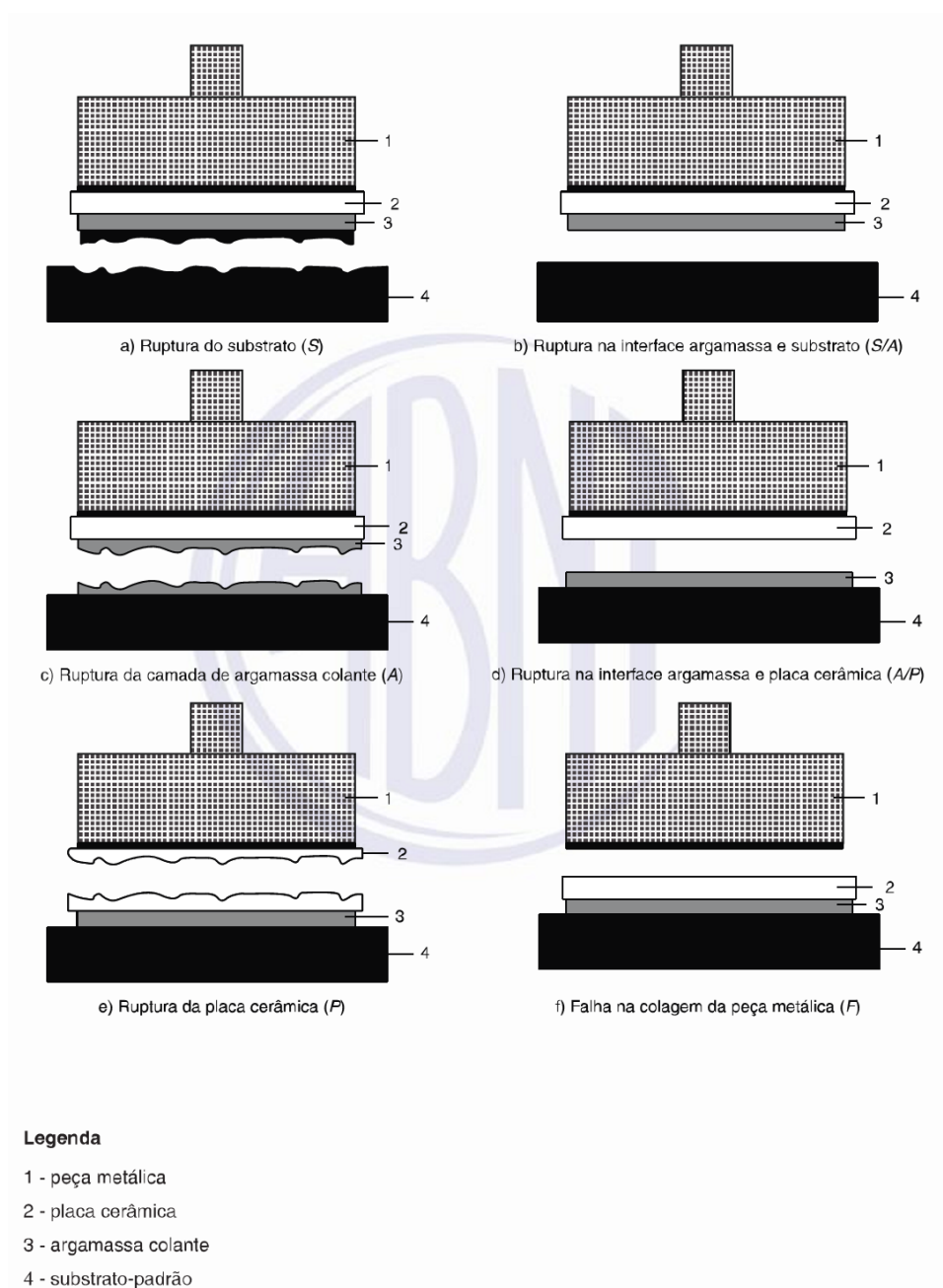


Figura 3.4: Tipos de rupturas
Fonte: NBR 14.081-4 (ABNT, 2012) p. 5

Após a ruptura das amostras, a tensão de ruptura de cada placa cerâmica deve ser calculada de acordo com a Equação 3-1.

$$f_t = \frac{T}{A} \quad \text{Equação 3-1}$$

onde [ft] é a tensão de ruptura, em (MPa); [T] é a força de ruptura, em (N); [A] é a área da placa cerâmica, em (mm²).

Neste trabalho foi estudada a patologia de destacamento da placa cerâmica, que ocorre entre o tardo da placa e a argamassa colante, e pode ser originada pelos seguintes erros de execução, reproduzidos em laboratório: tempo em aberto estendido (da argamassa); argamassa com sujidades na sua superfície (pó de pedra); presença de substâncias gordurosas do tardo da placa cerâmica; e placas cerâmicas encharcadas com água.

3.5. Ensaios não destrutivos

Ensaios não destrutivos não danificam o objeto de estudo, e têm algumas vantagens, como: podem ser realizados *in loco*, são de rápida execução, baixo custo, repetitividade, possibilitam acompanhamento sistemático da estrutura. Apresenta, também, desvantagens, como: o profissional deve possuir conhecimento das condições de trabalho, resultados são qualitativos, alto custo de aquisição dos equipamentos, falta de normalização. (KYLILI *et al.*, 2014)

Há inúmeras técnicas de ensaios não destrutivos disponíveis, e cada uma delas apresenta particularidades, pois utilizam-se de princípios teóricos diferentes. As informações obtidas devem ser analisadas a posteriori, adequando-se a interpretação ao material estudado, assim como sua composição e propriedades físicas. Como nenhuma técnica é capaz de identificar todas as imperfeições em qualquer tipo de material, o método mais efetivo para a situação deve ser escolhido antes de iniciar-se o ensaio. Os autores sugerem que se faça uma combinação de técnicas de ensaios não destrutivos, para maior qualidade dos resultados. Na construção civil os ensaios não destrutivos mais utilizados são: ultra som, esclerometria, resistividade. (KYLILI *et al.*, 2014)

De acordo com Kylili *et al.* (2014), a utilização de ensaios térmicos não destrutivos no diagnóstico de edificações tem se tornado cada vez mais comum, pois apresenta diversas vantagens: não necessita contato direto com a estrutura, é um método rápido e exato, o que permite a aplicação da técnica em diferentes campos, como montagem de produtos, manutenção e investigação das condições de edifícios. Além disso, possibilita uma identificação precoce da patologia, antes de sua manifestação (TAVARES, 2006). Neste trabalho, a termografia será utilizada com objetivo de identificar o descolamento de placas cerâmicas.

Dentre os ensaios não destrutivos, estão os ensaios térmicos não destrutivos, NDTE (*Non Destructive Thermal Evaluation*), que são um conjunto de técnicas não intrusivas, e se utilizam da avaliação do perfil térmico da amostra em estudo. Tais ensaios possibilitam observar padrões de distribuição de temperatura a partir do calor emitido pela superfície do material. O caráter não intrusivo da técnica não pode ser generalizado a todos os casos, pois

há situações em que a integridade da amostra pode ser comprometida (TEIXEIRA, 2012). Em avaliações de obras de arte, o estímulo térmico em excesso pode danificar a superfície e a estrutura da amostra de maneira irreversível (Carlomagno e Meola, 2001; Tavares e Andrade, 2004; Tavares et al., 2006).

3.6. Histórico da técnica de termografia infravermelha

Parte do embasamento teórico para a tecnologia utilizada na termografia foi descoberto por Herschel em 1800. Ao tentar descobrir novos filtros que iriam reduzir o brilho da imagem do sol em telescópios, identificou o espectro infravermelho. (FLIR Systems, 2005a). Com maiores pesquisas, percebeu que estes raios apresentavam comportamento semelhante ao da luz visível: foram refletidos, refratados, absorvidos e transmitidos (BARR, 1960; BARR, 1961; BARREIRA *et al.*, 2012; HERSCHEL, 1800; RAO, 2008). Ao realizar experimentos com pequenos fluxos de corrente elétrica em circuitos fechados de condutores metálicos, Seebeck (1822) iniciou discussões relativas à natureza da luz e calor. Posteriormente, com base no efeito termoelétrico, Nobili produziu o primeiro termopar. (ROGALSKI, 2012; BARR, 1962) A primeira imagem térmica foi obtida por Herschel, em 1840. (FLIR, 2005b) O bolômetro foi inventado em 1880, por Langley. Este dispositivo aumentou significativamente a sensibilidade na detecção infravermelha (BARREIRA *et al.*, 2012; HUDSON, 1969), e possibilitou uma ampliação da análise da irradiação solar além da região do infravermelho, além de permitir que a intensidade da radiação solar fosse medida em vários comprimentos de onda (BARR, 1963; LANGLEY, 1881; WALCOTT, 1912).

No ano de 1929 foi inventada por Tihanyi a primeira câmera sensível a radiação infravermelha. Este equipamento foi utilizado por militares na Grã-Bretanha para a defesa antiaérea (LISOWSKA-LIS A., MITKOWSKI S. A., AUGUSTYN J., 2011). A descoberta e progressos mais significativos das tecnologias e materiais de detecção da radiação infravermelha ocorreram, principalmente, no período entre guerras e durante a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) (KYLILI *et al.*, 2014). Os primeiros detectores de um único elemento foram desenvolvidos ao final dos anos 1950 pela *Texas Instruments* e pelos Militares dos Estados Unidos. Isso possibilitou a verificação de cenas e a produção de imagens. A comercialização das câmeras IR iniciou-se somente ao fim dos anos 1960, possibilitando que a imagem térmica atingisse um público maior, além dos militares. (BARREIRA *et al.*, 2012)

De acordo com Malhotra (2004), o primeiro trabalho experimental documentado na área de construção civil utilizando-se de termografia data de 1973. Esta pesquisa ocorreu no Canadá, e utilizou a termografia para identificar destacamentos abaixo da superfície do concreto. Mostrou métodos efetivos, mas técnicas pouco eficientes. Posteriormente foram

realizados outros estudos, também no Canadá, que comprovaram a capacidade da termografia de identificar defeitos abaixo da superfície do concreto.

A partir da década de 1990 acelerou-se o desenvolvimento da termografia, com surgimento do CCD (Charged Couple Device). O CCD possui alta sensibilidade e resolução, e transforma a luz em sinais elétricos para gerar imagens de alta qualidade e baixo ruído. Em seguida, os microbolômetros passam a ser bastante utilizados pelos fabricantes dos termovisores, e sua maior vantagem é dispensar dispositivos de resfriamento, o que possibilita redução do custo final do termovisor. O microbolômetro é utilizado para absorção da radiação em detectores térmicos; (TAVARES, 2006; SALES, 2008; TEIXEIRA, 2012)

3.7. Ensaios térmicos não destrutivos

A termografia infravermelha, segundo Calado (2013),

“consiste na captura, sem contato físico, da radiação térmica infravermelha emitida pela superfície dos corpos através de um equipamento que transforma a energia térmica em pulsos elétricos que, depois de tratados, são exibidos na forma de uma imagem digital que representa o perfil de temperatura de uma determinada região do espaço”.

Se o material apresenta não homogeneidades próximas à superfície, o fluxo de calor neste local será alterado, o que, conseqüentemente, irá refletir em diferenças mensuráveis na temperatura da superfície. (MALHOTRA e SIVASUNDARAM, 1991; KYLILI *et al.*, 2014).

A termografia pode ser classificada como passiva ou ativa (de acordo com a ausência ou presença de estímulo térmico). A termografia passiva é caracterizada pela não utilização de estímulo térmico durante os ensaios, sendo empregada apenas quando a temperatura do ambiente e da amostra são naturalmente diferentes (MALDAGUE, 2000, MALDAGUE, 2002; AVDELIDIS E MOROPOULOU, 2004). Na termografia ativa ocorre a aplicação de um estímulo térmico artificial, externo à amostra. É aplicada quando a diferença de temperatura entre a amostra e o meio em que se encontra não é o bastante para que sua integridade ou comportamento sejam avaliados satisfatoriamente (CALADO, 2013; TEIXEIRA, 2012). A termografia ativa se subdivide em termografia pulsada (PT), em que é aplicado um pulso de calor curta duração; termografia *lock in*, ou modulada (LT), em que é utilizada uma onda sinusoidal de calor; termografia pulsada por fase, que combina a termografia PT e LT; *step heating* (SH) ou aquecimento contínuo, em que um pulso de calor de longa duração é aplicado; vibrotermografia, em que o calor é gerado pela excitação por ultra-som. (MALHOTRA e SIVASUNDARAM, 1991; MALDAGUE, 2002; AVDELIDIS E MOROPOULOU, 2004; KYLILI *et al.*, 2014) A Figura 3.5 apresenta uma representação esquemática das técnicas de termografia ativas e passivas, e suas aplicações nos diversos campos.

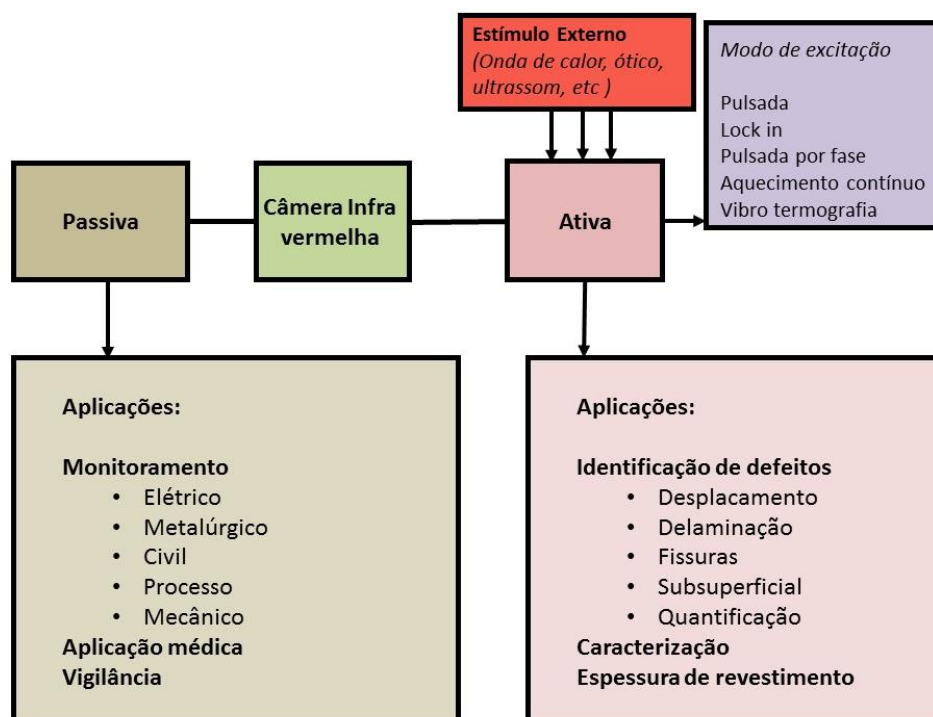


Figura 3.5: Representação esquemática de técnicas de termografia passivas e ativas. Fonte: Bagavathiappan *et al* (2013), p. 40.

Na termografia por SH, o aquecimento da amostra é monitorado durante a aplicação do estímulo térmico. O aquecimento é contínuo, e a fonte de calor apresenta baixa potência. Variações da temperatura ao longo do tempo são relacionadas às características da amostra, assim como na termografia pulsada. Esta técnica é, muitas vezes, chamada de radiometria infravermelha resolvida no tempo, ou *time-resolved infrared radiometry* (TRIR). É chamada de “resolvida no tempo” devido ao acompanhamento da variação da temperatura durante e após o aquecimento. (MALDAGUE, 2002)

De acordo com Maldague (2002), é possível realizar a medição da temperatura por termografia de três maneiras:

- Linhas de temperatura em um momento específico após o aquecimento;
- Temperatura em função do tempo, em uma posição específica da amostra;
- Reconstrução da imagem em um dado instante (a reconstrução da imagem ocorre numa linha de montagem em que a amostra é localizada em um “palco”, que é reposicionado a cada etapa)

A termografia é cada vez mais utilizada para verificar desempenho de equipamentos e componentes de máquinas, controle de qualidade de produtos, e validação de processos. É aplicada nos mais diversos campos, como setores da indústria (automotiva, aeronáutica,

siderúrgica, petroquímica, metalúrgica, robótica, elétrica e eletrônica), medicina, meio ambiente, arquitetura e construção civil, estudos de obras de arte e materiais compósitos. Jadin e Taib (2012) destacam a importância da termografia para a manutenção preventiva e para monitorar equipamentos. Lahiri *et al.* (2012) identificaram melhorias na técnica da termografia infravermelha, que a tornam uma boa alternativa para identificar padrões anormais de temperatura, e verificaram sua utilização em diagnósticos de câncer de mama, diabetes, distúrbios em vasos sanguíneos periféricos, dermatologia, coração, entre outros. Zilioli, Gomarasca e Tomasoni (1992) utilizaram a termografia para verificação de locais utilizados como lixões; Spampinato *et al.* (2011) utilizaram a técnica para monitoramento da atividade de vulcões na Itália.

Barbosa (2014) utiliza a termografia para avaliação e escolha de materiais, com objetivo de melhorar o conforto térmico das edificações. Kylili *et al.* (2014) reúne diversos casos em que a termografia foi utilizada na construção civil, para identificação de patologias em edificações. Sales (2008) verificou que a técnica é sensível à presença de falhas e aos constituintes do concreto, e, portanto, uma ferramenta bastante importante para o controle da estabilidade do material ao longo de sua vida útil.

Tavares (2006) propôs e validou uma metodologia para avaliação da integridade de obras de arte utilizando-se de termografia, e comparou a técnica com a vibrometria laser Doppler, já utilizada para este tipo de avaliação. Grinzato *et al.* 2002a realizou o mapeamento de patologias e estruturas ocultas na Capela Scroveni, na Itália, utilizando a técnica da termografia. Na avaliação de materiais compósitos, Kordatos, Aggelis, Matikas (2012) utilizaram a termografia para monitoramento de fissuras em estruturas; Bodnar *et al.*, (2012) aplicaram a termografia na identificação de defeitos em murais. Na preservação de bens culturais, Casadio e Toniolo (2001) verificaram que a termografia é capaz de identificar materiais orgânicos e inorgânicos.

A termografia é utilizada, na engenharia civil, para localizar vazios e outras irregularidades nas regiões próximas à superfície (MAIERHOFER *et al.*, 2007), detecção de destacamentos (MEOLA E CARLOMAGNO, 2006), investigação da estrutura de vedação por trás do revestimento (ARNDT, 2010), detecção de umidade na região próxima à superfície (POBLETE E PASCUAL, 2007), identificação de estruturas (HAO T., *et al.*, 2012), entre outras (KYLILI *et al.*, 2014).

A utilização de NDTE apresenta diversas vantagens, como a possibilidade de monitoramento remoto, portabilidade, facilidade na manipulação dos dados, possibilidade de analisar grandes áreas simultaneamente, relativa facilidade de operação do termovisor, resultado visual do perfil térmico, possibilidade de análise dos dados na inspeção, não há necessidade

de contato entre o objeto e o termovisor, o que aumenta a segurança do procedimento, e possibilita a não interferência no funcionamento do equipamento ou amostra avaliada, não há necessidade de iluminação. O equipamento é versátil, pois permite alteração das lentes e utilização de filtros. (MALDAGUE, 2002; CLARK, MCCANN E FORDE 2003; TAVARES, 2006; TEIXEIRA, 2012; CALADO, 2013, KYLILI *et al.*, 2014). Esta técnica de ensaios também apresenta desvantagens, como: alto custo do equipamento, limitação de profundidade de alcance, interferência de efeitos térmicos indesejáveis que podem alterar o contraste térmico (convecção, difusão, radiação), e problemas na identificação da umidade da superfície (MALDAGUE, 2000; MALDAGUE, 2002; TEIXEIRA, 2012; KYLILI *et al.*, 2014).

3.8. Mecanismos de transferência de calor

A operação da IRT (Infra Red Thermography) e da câmera IR (Infra Red) se baseiam na teoria da radiação térmica (KYLILI *et al.*, 2014). Assim, para operação de um termovisor e interpretação dos termogramas, é necessário conhecer os fundamentos da transferência de calor e radiação térmica. (EDIS *et al.*, 2013) A transferência de calor é o processo pelo qual a energia é transportada. Ela ocorre sempre que houver um diferencial de temperatura entre dois corpos em contato. (KREITH, 2003) A termodinâmica estuda a relação entre o calor e outras formas de energia, mas não considera os mecanismos de transferência de calor ou os métodos para cálculo da taxa da troca de calor. Esta ciência tem foco nos estados de equilíbrio da matéria, e o equilíbrio elimina a presença dos diferenciais de temperatura. (KREITH, 2003; INCROPERA E DEWITT, 2014)

Há duas condições que propiciam a transferência de energia térmica: a troca seca, ou calor sensível (diferença de temperatura entre corpos); e a troca úmida, ou calor latente (mudança de estado de agregação da matéria). Os principais mecanismos que realizam transferência de calor por trocas secas são: condução, convecção e radiação (Figura 3.6); e os por trocas úmidas são, principalmente, a condensação e a evaporação. Alguns autores afirmam que os processos de transferência de calor podem ser quantificados, e para isso são utilizadas equações de taxas de transferência de calor (KREITH, 2003; INCROPERA E DEWITT, 2014).

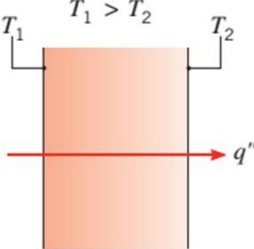
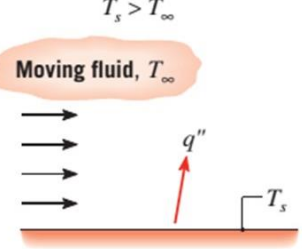
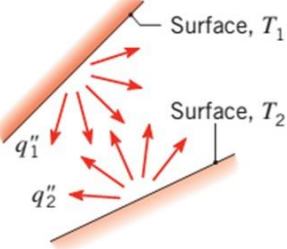
Condução através de um sólido ou fluido em regime estacionário	Convecção de uma superfície para um fluido em movimento	Troca de calor por radiação entre duas superfícies
		

Figura 3.6: Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação
Fonte: Incropera e DeWitt, 2014 p. 02

3.8.1. Condução

A condução, ou difusão, é o processo em que o calor flui através de um sólido. Pode ocorrer também em líquidos e gases, mas, nesses casos, sempre acompanhada do mecanismo de convecção e / ou radiação. Este mecanismo ocorre por meio de colisões elásticas e inelásticas entre os átomos, que transferem energia cinética. Quanto maior a temperatura, maior a energia molecular interna. Sempre que houver um diferencial de temperatura, irá ocorrer transferência de energia por condução. (KREITH, 2003; INCROPERA E DEWITT, 2014)

A transferência de calor em meios sólidos ocorre apenas por condução, e pode ocorrer em regime permanente (estacionário) ou transiente (não estacionário). No primeiro, o perfil de temperatura é constante ao longo do meio e do tempo. No segundo, a temperatura varia com o tempo. Em ambos a transferência pode ocorrer em diferentes direções. (INCROPERA E DEWITT, 2014)

3.8.2. Convecção

A troca de calor por convecção ocorre sempre entre um fluido (líquido ou gás) em movimento e uma superfície (corpo sólido) em contato e em diferentes temperaturas. A transferência de calor, neste caso, ocorre devido à condução de calor e ao movimento global do fluido. Ao considerar uma superfície de maior temperatura, em contato com um fluido de menor temperatura (Figura 3.7), ocorre, a princípio, transferência de calor por condução da superfície para as partículas do fluido. A temperatura interna destas partículas irá aumentar, e estas se deslocarão na direção das regiões de menor temperatura, e parte de sua energia será transferida para as partículas com menor energia interna. (INCROPERA E DEWITT, 2014; KREITH, 2003)

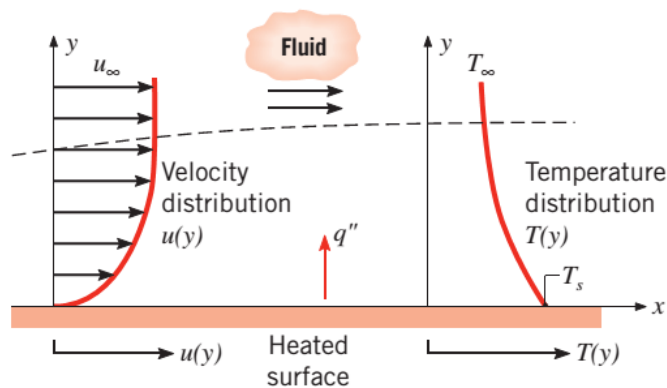


Figura 3.7: Desenvolvimento da camada limite na transferência de calor por convecção
Fonte: Incropera e Dewitt, 2014 p. 05.

Nesse processo de transferência de calor ocorre o deslocamento de energia e de massa, devido à diferença de massa específica entre regiões do fluido com energias internas distintas (maior energia interna, maior temperatura, moléculas com maior energia cinética, mais afastadas e, portanto, região com menor massa específica). A transferência de calor por convecção pode ocorrer de maneira natural ou forçada. Na primeira, o movimento ocorre apenas por causa da diferença de massa específica. Na segunda, há interferência de um agente externo (ventilador, bomba, ventos atmosféricos). (INCROPERA E DEWITT, 2014; KREITH, 2003). A intensidade do fluxo de calor por convecção [q''_c], em (W/m²), é dada pela Equação 3-2

$$q''_c = \frac{q_c}{A} = hc\Delta T \quad \text{Equação 3-2}$$

onde [q_c] é a intensidade da taxa de transferência de calor por convecção, em (W); [A] a área de transmissão de calor, em (m²); [hc] o coeficiente de transferência por convecção, em (W/m²K); e [ΔT] a variação de temperatura, em (°C ou K) entre a superfície e um ponto do fluido, geralmente muito afastado da superfície. O coeficiente de transferência por convecção é influenciado pela geometria da superfície, natureza do movimento do fluido, além de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. (INCROPERA E DEWITT, 2014; KREITH, 2003).

3.8.3. Radiação

Toda forma de matéria que se apresenta em uma temperatura não nula emite energia em forma de radiação térmica. A radiação não necessita de um meio material para ocorrer, diferente da condução e da convecção. (INCROPERA E DEWITT, 2014). Kreith (2003) define a radiação como troca térmica entre dois corpos, a certa distância um do outro, que possuem a capacidade de emitir e absorver energia. Neste processo, a energia em movimento é chamada de calor radiante. (KREITH, 2003)

O funcionamento dos termovisores baseia-se na teoria da radiação térmica. A radiação pode ser definida como a energia radiante emitida por um meio, e relacionada à movimentação de elétrons, que interferem na temperatura do meio. A principal característica destas ondas é sua frequência, utilizada para caracterizar as faixas do espectro eletromagnético, de acordo com a Figura 3.8. A radiação abrange uma gama de comprimentos de onda, e a termografia infravermelha possui aplicação limitada apenas à radiação térmica, que se encontra na porção intermediária (10^{-4} a 10^{-7} nm) do espectro. A magnitude da radiação está diretamente ligada ao seu comprimento de onda. (MALDAGUE, 2002; KYLILI *et al.*, 2014; SALES, 2008; INCROPERA E DEWITT, 2014)

As faixas de radiação infravermelha mais utilizadas na termografia são as de ondas médias (MW), e ondas longas (LW), como pode ser visto na Figura 3.8. As primeiras são aplicadas, principalmente, para a captação de radiação advinda de gases e vapor d'água, com objetivo de identificar vazamentos em instalações; e as segundas, nas câmeras de aplicação geral na indústria e pesquisa. (MALDAGUE, 2002; ABNT, 2006; CHRZANOWSKI, 2010; CALADO, 2013; FERREIRA, 2015)

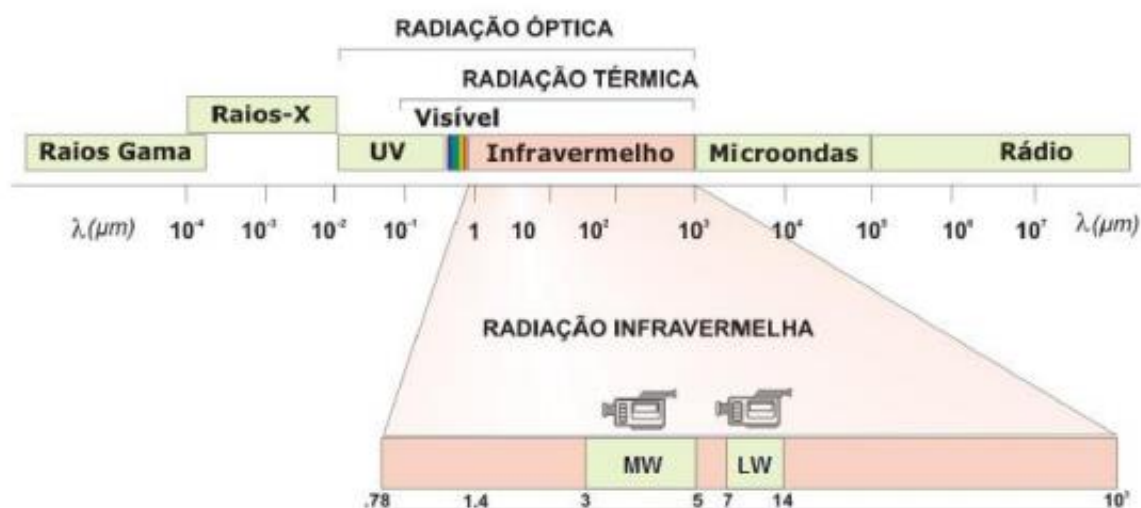


Figura 3.8: Espectro eletromagnético e as faixas espectrais onde se inserem os termovisores comerciais.

Fonte: Santos (2006), *apud* Ferreira (2015), p. 16.

A intensidade da radiação emitida por um corpo sofre influência da temperatura absoluta da superfície, assim como de suas características físicas e geométricas. O corpo negro, considerado um objeto hipotético, é um emissor e absorvedor perfeito e, portanto, é parâmetro comparativo para as propriedades radiantes das superfícies reais. Este limite é previsto pelas leis de *Stefan-Boltzmann* e *Planck*. O corpo negro é capaz de absorver toda a radiação incidente, e reemite estas radiações em todas as direções, ou seja, é um irradiador

difuso. (SALES, 2008; BARBOSA, 2014; INCROPERA E DEWITT, 2014; MALDAGUE, 2002; MEOLA *et al*, 2005; BAGAVATHIAPPAN *et al*, 2013)

A razão entre a energia emitida por um objeto real e a energia emitida por um irradiador perfeito, à mesma temperatura, descreve a emissividade do objeto: taxa na qual a energia é liberada por unidade de área. Assim, como a emissividade de um corpo negro é igual a 1 (um), esta propriedade para superfícies reais será sempre menor que 1, e nunca menor que 0 (zero). De um modo geral, esta propriedade sofre influência das seguintes características: comprimento de onda, temperatura, ângulo de incidência, material e condição da superfície (como rugosidade e presença de sujidades ou impurezas). (BARBOSA, 2014; INCROPERA E DEWITT, 2014; MALDAGUE, 2002; BAGAVATHIAPPAN *et al*, 2013; EDIS, FLORES-COLEN, BRITO, 2013)

A avaliação correta da emissividade é de fundamental importância no processo de medição por meio da termografia. Esta avaliação pode ser realizada por técnicas experimentais (antes da aquisição de dados pelo termovisor), ou no processamento dos dados coletados pelo termovisor, via *software* de tratamento. (MALDAGUE, 2002; FERREIRA, 2015)

A emissividade pode ser determinada por meio de duas técnicas: temperatura conhecida ou emissividade conhecida. Em ambas, utiliza-se o valor de um parâmetro já conhecido (temperatura lida pelo termopar ou emissividade de um material já conhecida). Na primeira, utiliza-se a leitura realizada pelo termopar para ajustar o parâmetro emissividade na termocâmara até que esta acuse o mesmo valor acusado pelo termopar. Na segunda, utiliza-se o valor de emissividade já conhecido para realizar a leitura da temperatura em um ponto vizinho ao do material que se deseja identificar a emissividade, e utiliza-se esta leitura para ajustar o valor de emissividade que se desconhece, até que o valor de temperatura lido para este segundo ponto seja igual ao do primeiro.

A totalidade da radiação que incide em uma superfície é chamada de irradiância (G). Em uma superfície semitransparente (Figura 3.9), ela é decomposta em três frações: refletida, absorvida e transmitida, que definem as propriedades absortividade (ou absortância), transmissividade (ou transmitância) e refletividade (ou refletância), que dependem do comprimento de onda e do material. Absortância é a fração do fluxo radiante incidente na superfície que é absorvida pela superfície. Transmitância é a fração que transpassa o corpo; e refletância é a fração refletida pela superfície. (CALADO, 2013). A emissividade relaciona-se com a radiação emitida, e a absortividade, refletividade e transmissividade relacionam-se com a radiação incidente (FERREIRA, 2015).

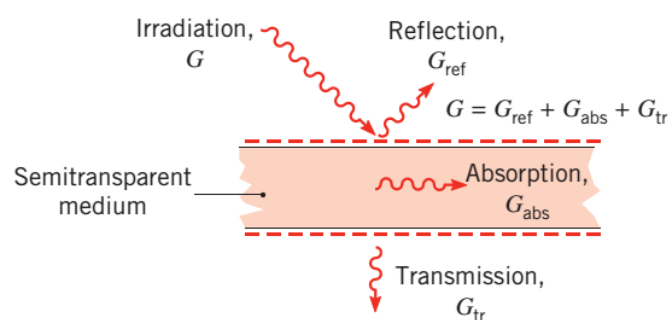


Figura 3.9: Representação gráfica da radiação incidente em um objeto real e as possíveis frações de radiação absorvida, refletida e transmitida.
Fonte: Incropera (2014), p. 772.

Assim como para a emissividade, o valor da absortividade do corpo negro é utilizado como parâmetro: a absortividade determina a fração da radiação absorvida por uma superfície real com relação ao corpo negro. (INCROPERA E DEWITT, 2014). A energia térmica de um corpo é influenciada apenas pelas radiações emitidas e absorvidas. Como as radiações refletidas e transmitidas não causam consequências ao material, no âmbito da energia térmica, materiais de alta reflexividade são utilizados com frequência como isolantes térmicos. As propriedades radiativas podem ser afetadas ou não pela presença de revestimentos sintéticos ou texturas, aplicados na superfície dos materiais. A absortividade é influenciada significativamente pela cor da superfície, que, consequentemente, interfere no comportamento térmico da superfície analisada. (FERREIRA, 2015)

3.9. Modelagem matemática do problema da condução de calor na amostra cerâmica

Como o estudo realizado utiliza a transferência de calor unidimensional em regime transiente, faz-se necessário conhecer o funcionamento da condução de calor em regime permanente e transiente.

3.9.1. Condução unidimensional em regime permanente

A lei de Fourier é uma generalização para a taxa da condução do calor, estabelecida por meio de evidências experimentais e descrita na Equação 3-3 a seguir.

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (\text{Equação 3-3})$$

sendo $[q''_x]$ o fluxo de calor, em (W/m^2) em um meio com distribuição de temperatura $[T(x)]$ em $(^\circ C)$; $[q_x]$, a taxa de transferência de calor² em (W) na direção $[x]$ por unidade de área $[A]$

² A taxa de transferência de calor corresponde ao calor transmitido por unidade de tempo ($1W = 1J/s$) (KREITH, 2003)

em (m^2), perpendicular à direção de transferência; $[k]$ a condutividade térmica, em ($W/m.K$). (INCROPERA E DEWITT, 2014)

A 'condutividade térmica' é uma propriedade de transporte relacionada à capacidade de uma substância conduzir calor, e expressa a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão. Esta propriedade depende da estrutura interna e da temperatura do material (INCROPERA E DEWITT, 2014). Na transferência de calor unidimensional por condução, sem geração interna de calor, (Figura 3.10), a temperatura varia apenas com a coordenada x , e o calor é transferido apenas nesta direção.

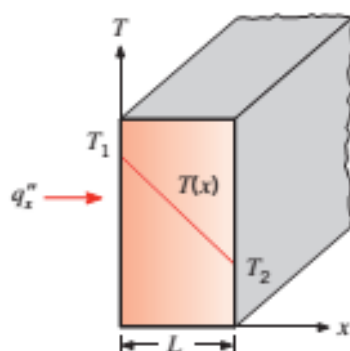


Figura 3.10: Transferência de calor unidimensional por condução em uma parede plana
Fonte: Incropera e DeWitt, 2014 p. 03

Pode-se realizar uma analogia entre o fluxo de calor e o fluxo de corrente elétrica, em que, assim como a resistência elétrica está associada à condução de eletricidade, a resistência térmica está relacionada à condução de calor. (INCROPERA E DEWITT, 2014).

Na Figura 3.11, $[R_{se}]$ corresponde à resistência térmica para convecção³ da superfície externa da parede, ($m^2.K/W$); $[R_{reb}]$ a resistência térmica para condução da camada de reboco externa ($m^2.K/W$); $[R_{tij+arg}]$ a resistência equivalente do bloco, ($m^2.K/W$); $[R_{si}]$ resistência térmica para convecção da superfície interna da parede, ($m^2.K/W$). As temperaturas são dadas em ($^{\circ}C$ ou K). A soma das resistências térmicas dos materiais que compõem a parede é representada por $[R_T]$.

³ Assim como na transferência de calor por condução, há resistência térmica para o processo de convecção.

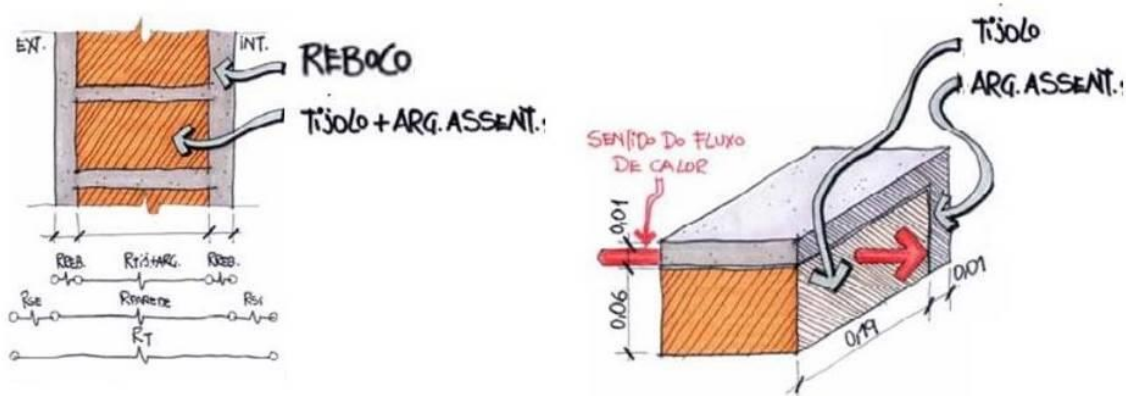


Figura 3.11: Resistência térmica de uma parede em analogia a um circuito elétrico.
Fonte: Adaptado de Lamberts *et al.*, 1997

Para o cálculo de $[R_T]$ (resistência térmica total ou equivalente), em um componente plano formado por camadas perpendiculares ao fluxo de calor, sejam elas homogêneas ou não, a norma NBR 15.220-2 (2005) propõe a Equação 3-4:

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad \text{Equação 3-4}$$

onde $[A_a]$, $[A_b]$, ... $[A_n]$ são as áreas (m^2) de cada seção perpendicular ao fluxo de calor, e $[R_a]$, $[R_b]$, ... $[R_n]$ são as resistências térmicas ($m^2.K/W$) de uma superfície à outra, para cada seção do componente (a, b, ..., n), determinadas pela Equação 3-5:

$$R = \frac{e}{k} \quad \text{Equação 3-5}$$

onde $[e]$ corresponde à espessura da camada, em (m) e $[k]$ a condutividade térmica do material da camada, em ($W/m.K$). A Figura 3.12 mostra a distribuição de um componente plano, formado por camadas homogêneas e não homogêneas, em seções. A seção b, representada na figura, não é homogênea e, por isso, deve ser calculada a sua resistência equivalente (soma das resistências de cada camada), utilizando-se a Equação 3-4.

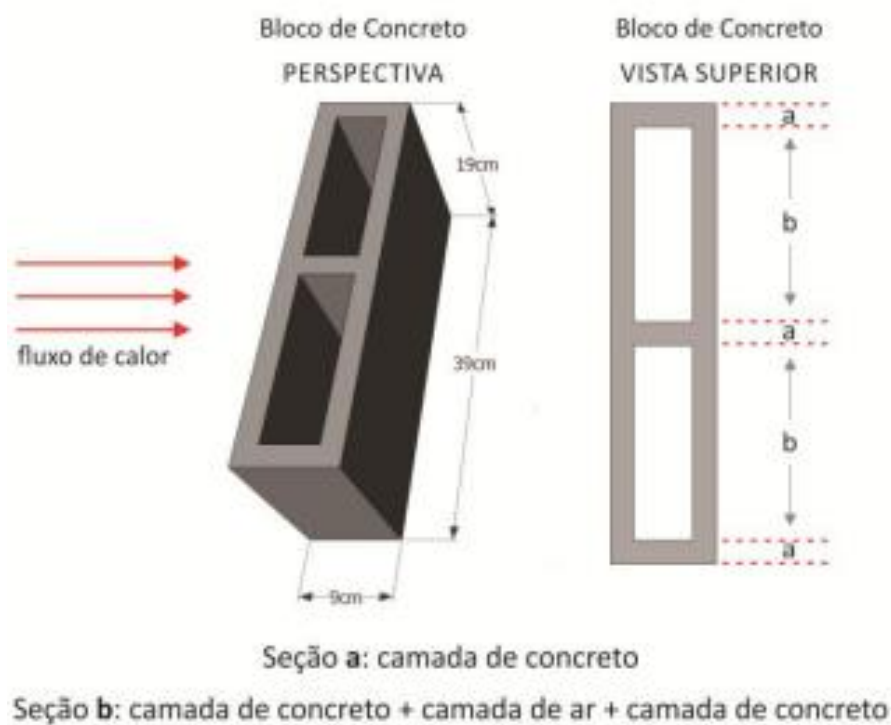


Figura 3.12: Distribuição em seções de um componente plano
Fonte: Barbosa, 2014, p. 33.

3.9.2. Condução unidimensional em regime transiente

Os problemas de transferência de calor que dependem do tempo (transientes) se caracterizam pela mudança das condições de contorno do sistema, como ocorre diariamente em uma edificação. A partir do instante em que a temperatura da superfície externa da parede se altera, uma alteração também irá ocorrer em cada ponto da parede, até que seja atingido o equilíbrio.

Em condições de transferência de calor unidirecional, em que os gradientes de temperatura não podem ser desprezados, há soluções exatas para a equação de transferência de calor. A difusividade térmica corresponde à capacidade que um material possui para conduzir energia térmica, em relação à sua capacidade de armazená-la, e pode ser descrita pela Equação 3-6. (INCROPERA E DEWITT, 2014)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad \text{Equação 3-6}$$

onde $[\alpha]$ é a difusividade térmica do material, em (m^2/s) , $[k]$ é a condutividade térmica, em $(W/m.K)$, $[\rho]$ a massa específica, em (kg/m^3) e $[c_p]$ o calor específico a pressão constante, em $(J/kg.K)$.

A condutividade térmica, massa específica e calor específico são propriedades térmicas elementares de qualquer material. Porém, o estudo do comportamento de materiais em

regime transiente torna necessária a introdução da propriedade difusividade térmica (GONZÁLES CRUZ, 2003). A condutividade térmica varia com a temperatura, mas, em problemas de transferência de calor por condução transiente, pode ser considerada constante (INCROPERA E DEWITT, 2014).

A geometria das paredes planas pode ser comparada com a de um sólido semi infinito, que se estende em todas as direções, com exceção de uma, e se caracteriza por uma superfície chamada identificável. Portanto, ao serem modificadas as condições em que esta superfície identificável se encontra, estas alterações não irão atingir a sua extremidade oposta. Assim, com uma alteração repentina nas condições da superfície identificável, a condução unidimensional transiente ocorrerá no sólido. A geometria do sólido semi infinito é uma idealização que auxilia a solução de inúmeros problemas e, na situação da parede, Incropera e DeWitt (2014) ressaltam que a aproximação é melhor aplicada na porção inicial do transiente, em que as temperaturas internas (em posições afastadas da superfície), ainda não foram influenciadas pelas condições superficiais. (INCROPERA E DEWITT, 2014)

Com base na Equação 3.6 foram obtidas soluções para três condições importantes de superfície, em casos de condução unidimensional transiente: temperatura constante da superfície, fluxo de calor constante na superfície e convecção na superfície (Figura 3.13). A condição inicial para a análise é dada pela Equação 3-7:

$$T(x, t) = T_i \quad \text{Equação 3-7}$$

onde $T(x, t)$ é a temperatura no interior do sólido em uma posição $[x]$, na direção do fluxo do calor, em um instante $[t]$ de tempo. Assim, temos que, em qualquer posição do sólido, no instante $[t=0]$, a temperatura deve ser a mesma $[T_i]$. A condição de contorno no interior do sólido é dada pela Equação 3-8:

$$T(x \rightarrow \infty, t) = T_i \quad \text{Equação 3-8}$$

ou seja: quando a espessura $[x]$ tende ao infinito, em qualquer instante de tempo $[t]$ a temperatura é igual à temperatura inicial $[T_i]$.

O método experimental utilizado neste trabalho utiliza a situação de distribuição de temperatura transiente unidimensional em um sólido semi infinito em sua condição de contorno de segunda espécie (Caso 2, na Figura 3.13), ou seja, com fluxo de calor constante aplicado na superfície identificável.

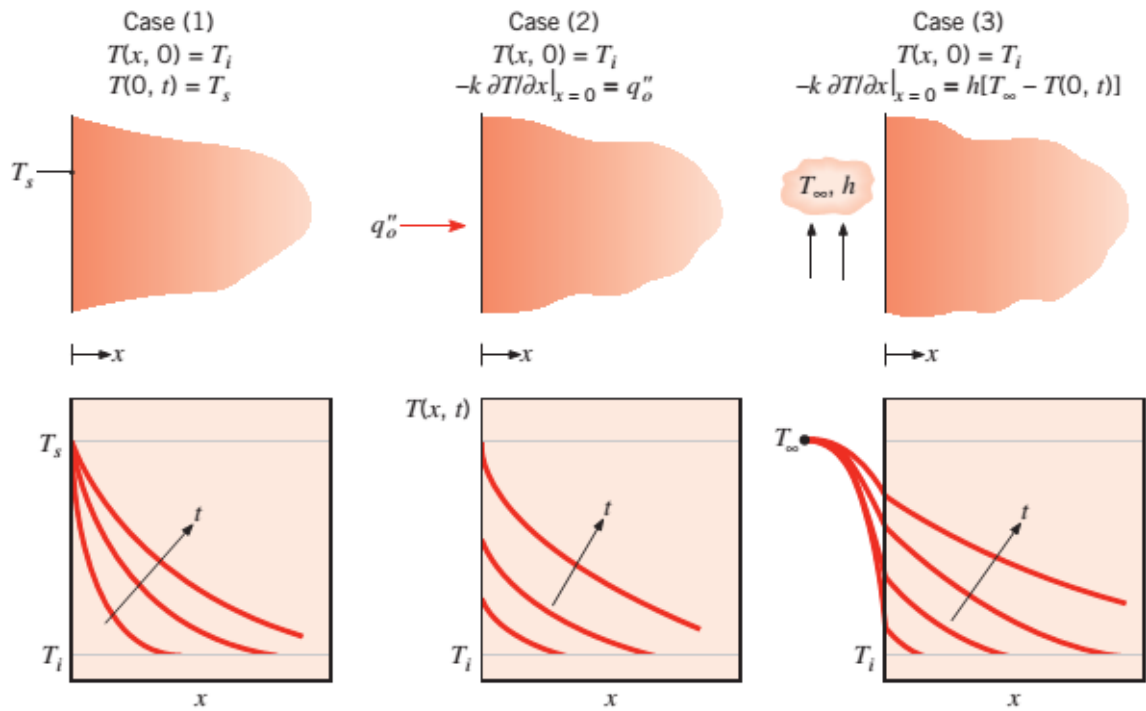


Figura 3.13: Distribuição de temperatura transiente em um sólido semi infinito para três condições de superfície: temperatura constante da superfície (Caso 1), fluxo de calor constante na superfície (Caso 2) e convecção na superfície (Caso 3).

Fonte: Incropera e Dewitt, 2014 p. 178.

A Equação 3-9 representa a solução analítica para o caso 2, dada por Incropera e Dewitt (2014):

$$T(x, t) - T_i = \frac{2q_o x \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_o x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad \text{Equação 3-9}$$

onde $[T(x,t)]$ é a temperatura, em ($^{\circ}\text{C}$), no interior do sólido em uma posição $[x]$, em determinado tempo $[t]$; $[T_i]$ é a temperatura da superfície identificável, em ($^{\circ}\text{C}$), no instante inicial $[t=0]$; $[q_o]$, o fluxo de calor constante aplicado na superfície identificável, em (W/m^2); $[\alpha]$ a difusividade térmica do sólido em (m^2/s), $[t]$, o tempo em (s); $[k]$, a condutividade térmica do sólido em ($\text{W}/\text{m.K}$); $[x]$ a posição, em (m), e $[\operatorname{erfc}(w)]$, a função erro complementar. A função erro complementar é calculada de acordo com a Equação 3-10:

$$\operatorname{Erfc}(w) = 1 - \operatorname{erf}(w), \quad \text{sendo } w = \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad \text{Equação 3-10}$$

onde $[\operatorname{erf}(w)]$ corresponde à função erro de Gauss.

A resolução deste sistema de equações envolve interpolação e iteração. A primeira refere-se a qualquer processo de obtenção de valores de uma função em um intervalo, desde que o comportamento desta função nos extremos do intervalo seja conhecido. A segunda, relaciona-se à resolução de uma equação utilizando operações que dependem do resultado

da operação anterior. Devido à grande complexidade deste sistema de equações, faz-se necessária a utilização de ferramentas para a sua resolução: o software *Engineering Equation Solver* (EES).

O software EES, desenvolvido pela *F-Chart Software*, é capaz de solucionar numericamente sistemas de equações diferenciais e não lineares, equações diferenciais e integrais, estimar análises de incertezas, realizar regressões lineares e não lineares, converter unidades de medida, gerar gráficos, entre outros. Possui um banco de dados com propriedades termodinâmicas e de transporte de diversos materiais e substâncias, além de funções matemáticas e propriedades termofísicas que auxiliam os cálculos. (F-CHART SOFTWARE, 2016; SILVA *et al.*, 2009).

Barbosa (2014) avaliou a difusividade de blocos cerâmicos por meio de ensaios baseados no regime transiente com condução unidimensional e fluxo de calor constante ao longo do tempo. Para isso, desenvolveu um túnel térmico com o objetivo de reduzir ao máximo as perdas de calor, e verificou que o bloco maciço cerâmico apresenta maior difusividade que o bloco vazado cerâmico e que o bloco vazado de concreto. A autora atribui esta diferença de propriedades entre as amostras à presença de volumes de ar no interior dos blocos vazados. Por sua vez, os blocos vazados de concreto apresentaram maior difusividade que os blocos vazados cerâmicos, quando comparadas amostras com mesmas dimensões. A autora identificou a potencialidade da termografia também para identificar a estrutura interna das amostras, uma vez que as superfícies correspondentes às seções com maior número de camadas de ar apresentaram cor (e, por sua vez, temperatura), diferente das superfícies com menor quantidade de camadas de ar. as seções com predomínio de camadas de ar apresentam temperatura mais elevada que aquelas homogêneas (em cerâmica ou concreto). Este comportamento foi atribuído ao acúmulo de energia térmica nas camadas de ar.

3.10. Termografia em construção civil

Kylili *et al.* (2014) ressalta a importância de se compreender os mecanismos de transferência de calor que ocorrem entre a superfície do alvo e o sensor do termovisor. A energia que chega ao sensor é composta tanto da energia emitida pelo alvo quanto pela energia refletida pelo ambiente, como pode ser visto na Figura 3.14.

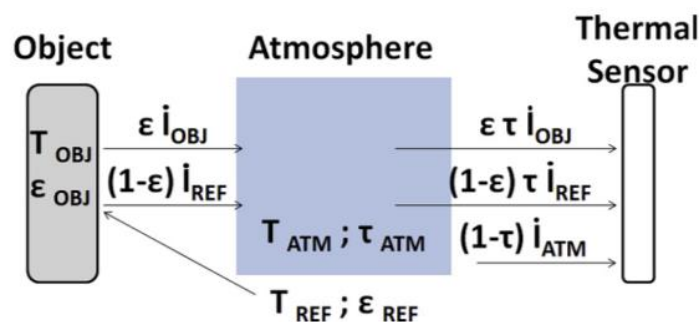


Figura 3.14: Componentes da radiação térmica existentes entre o objeto em estudo e o termovisor

Fonte: Fokaides e Kalogirou (2011), p. 4359

O principal equipamento utilizado em uma inspeção termográfica é chamado termovisor (ou termocâmara, câmera infravermelha, câmera termográfica, câmera térmica, dispositivo de imagem térmica,), que mede a radiação térmica emitida por um corpo, composta pela energia emitida pelo objeto e pela energia refletida pelo entorno (CALADO, 2013; TEIXEIRA, 2012, KYLILI *et al.*, 2014). É construído com foco na radiação térmica infravermelha, o que determina o material dos sensores e lentes, as variáveis que interferem na medição, e faz com que seja de fundamental importância a compreensão da natureza das ondas eletromagnéticas a que se destina (CALADO, 2013). O termovisor é definido no documento “*Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments*” (OIML R141-2008) como:

“instrumento optoeletrônico concebido para observação, medição e registro espacial e temporal da radiação térmica de objetos, no campo de visão do instrumento, por formação de uma sequência temporal de termogramas e pela determinação da temperatura superficial de objetos a partir do conhecimento de sua emissividade e parâmetros de influência (temperatura refletida, transmissão atmosférica, distância de observação, etc.)”.

Para realizar uma inspeção utilizando um termovisor, são necessários os seguintes dados: emissividade do material analisado, temperatura refletida, temperatura atmosférica, e umidade relativa (KYLILI *et al.*, 2014). Os equipamentos de termografia sensíveis à radiação infravermelha possuem lentes e sensores (ou detectores de radiação), que captam a radiação na faixa do infravermelho e a convertem em sinais elétricos, que são amplificados, lidos e processados pelo equipamento e convertidos em imagens digitalizadas, chamadas imagens térmicas ou termogramas. (SALES, 2008; BARBOSA, 2014; CALADO, 2013)

O campo de visão, ou *field of view* (FOV), representado na Figura 3.15, define a “área de observação do termovisor para uma dada distancia de observação” (TEIXEIRA, 2008, p. 29). Podem ser utilizadas lentes com maior campo de visão, para avaliar grandes objetos, como em edificações; ou com menor campo de visão, para observação de detalhes, como na odontologia. Na área determinada pelo FOV, temos o IFOV (*Instantaneous field of view*),

campo de visão instantâneo, que define a resolução espacial do termovisor e corresponde ao menor detalhe medido com exatidão dentro do campo de visão do termovisor. (TEIXEIRA, 2008)

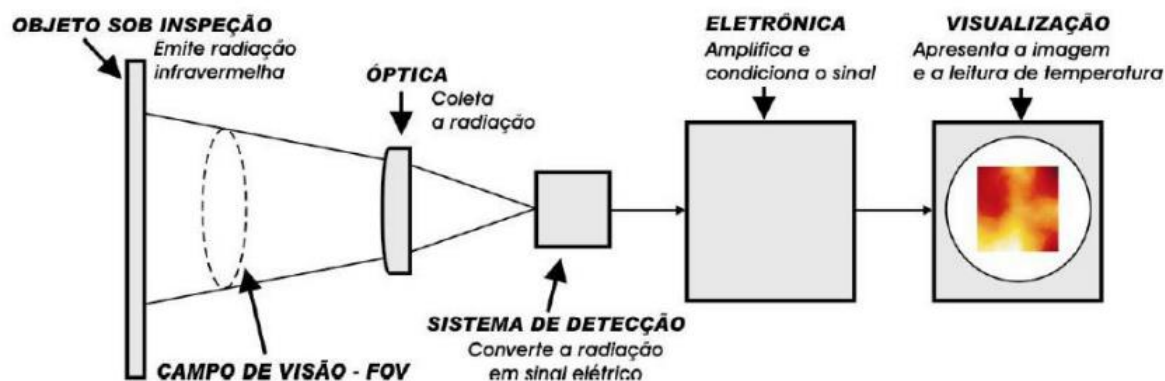


Figura 3.15: Diagrama simplificado de um termovisor genérico.
Fonte: Santos (2006), *apud* Ferreira (2015), p. 14.

O sinal é apresentado nas imagens em uma graduação de tons de acordo com uma escala de temperatura, como pode ser visto na Figura 3.16. O registro é digital, o que permite o processamento das informações em softwares, assim como o ajuste dos parâmetros de entrada. (AVDELIDIS E MOROPOULOU, 2004; SALES, 2008; BARBOSA, 2014; KYLILI *et al.*, 2014)



Figura 3.16: Vista da fachada de um edifício e do termograma correspondente.
Fonte: Lehmann *et al.* (2013), p. 535

A termografia infravermelha pode ser influenciada pelos seguintes parâmetros: emissividade, cor da superfície, reflexões em superfícies metálicas ou brilhantes, condições atmosféricas, distância entre a câmera e o objeto, características técnicas do termovisor, e o procedimento de calibração disponível (AVDELIDIS E MOROPOULOU, 2004). As tabelas 3.4 a 3.6 apresentam algumas pesquisas de termografia em construção civil, separadas por tipo de termografia (passiva, pulsada, e pulsada por fase).

Tabela 3.4: Histórico de pesquisas com termografia passiva

ANO	AUTOR	INOVAÇÃO	CONSEQUENCIA
2012	Asdrubal <i>et al.</i>	Desenvolvimento de uma metodologia que expressa o efeito de ponte térmica em envelopes construtivos, utilizando apenas as informações obtidas por termografia e análise posterior.	A verificação do fator de incidência da ponte térmica por investigação termográfica em laboratório.
2011	Fokaides and Kalogirou	Determinação do coeficiente de transferência total de calor (U-value) em envelopes construtivos	O desvio absoluto é de 10-20% entre o valor calculado e os valores medidos para U. A variável mais sensível na termografia é a temperatura aparente refletida e o valor da emissividade assumida para a superfície do edifício
2013	González-Aguilera <i>et al.</i>	Desenvolvimento de uma nova modelagem termográfica baseada em imagem, para avaliar a eficiência energética das fachadas dos edifícios	O novo método envolve uma série de pontos fortes, como baixo custo, automação, flexibilidade, precisão e confiabilidade. O desafio é extrapolar o processo para termogramas captados por um sistema robótico aéreo, que acesse as partes mais remotas do edifício.
2004	Martin Ocaña <i>et al.</i>	Comparação do desempenho térmico de dois edifícios em duas inspeções- ao final da noite e no início da manhã	Inspeção ao amanhecer, em edifícios alvenaria de vedação e com uma pequena espessura, ou seja, neste caso edifícios modernos fornecem mais informações. A inspeção dos edifícios tradicionais deve ser realizada de preferência durante a noite
2013	Martínez <i>et al.</i>	Caracterização físico-química da argamassa original usada durante a construção do campanário de uma igreja construída em 1672	Problemas de umidade, desagregação da argamassa, trincas em tijolos e problemas na aderência entre a argamassa e a alvenaria, identificados por termografia. Útil na detecção de diferentes materiais, como por exemplo, zonas com argamassa reparada diferente da original
2010	Zalewski <i>et al.</i>	Avaliação quantitativa das perdas de calor por pontes térmicas em construção de paredes pré-fabricadas	O desenvolvimento de um método numérico simples e preciso, de três dimensões, que poderia ser utilizado para a concepção de instalações específicas e estudos paramétricos

Fonte: Kylili *et al.* (2014), p. 539

Tabela 3.5: Histórico de pesquisas com termografia pulsada

ANO	AUTOR	INOVAÇÃO	ESTÍMULO EXTERNO	CONSEQUENCIA
2013	Brown e Hamilton	Caracterização da FRP aplicada ao concreto, usando a análise por pixel único	Lâmpadas halógenas de 4.5 kW por 60 s.	Método eficaz para minimizar os efeitos de aquecimento não-uniforme e que institui a profundidade relativa de defeitos fabricadas da interface FRP / concreto
2011	Cerdeira <i>et al.</i>	Viabilidade da IRT na identificação de defeitos no concreto utilizado para empilhar painéis de pedra	Gerador de ar quente com potência de 2.200W	IRT tem provado ser uma técnica não destrutiva adequada para a identificação de defeitos na lavagem de cimento em uma parede, tal como a falta de aderência dos painéis de pedra. Por outro lado, fornece resultados confiáveis quando os painéis são mais finos do que 30 mm.
2012	Di Maio <i>et al.</i>	Modelagem numérica para termografia <i>in-situ</i> e laboratorial da estrutura arquitetônica	Lâmpadas halógenas de 1.5 kW	Aplicação de códigos numéricos à termografia pulsada oferece mais precisão à natureza e geometria das anomalias da estrutura arquitetônica
1998	Grinzato <i>et al.</i>	Processo quantitativo para análise de termogramas para a caracterização de defeitos em edificações	Irradiação solar direta	Deteção de defeitos no estado transiente é mais conveniente do que no estado estacionário, apesar do tempo de processamento maior. São necessários mais estudos para o diagnóstico do edifício por IR especialmente quando se utiliza a irradiação solar como um estímulo externo
2009	Lai <i>et al.</i>	Avaliação da durabilidade de vigas de concreto FRP expostas a água em temperaturas elevadas, usando IRT	Aplicação de um bloco quente com temperatura constante de superfície (40°C) sobre a superfície de CFRP durante 30s.	Água em altas temperaturas causa deterioração da camada de ligação adesiva de compósitos de FRP de concreto devido ao rompimento das cadeias de matriz polimérica da resina <i>epoxy</i> .
2010	Lai <i>et al.</i> (2010)	Caracterização da deterioração dos materiais FRP-concreto colados externamente	Aplicação de um bloco quente com temperatura constante de superfície (40°C) sobre a superfície de CFRP durante 30s	Verificação da precisão da medição dos tamanhos dos defeitos medidos pelo QIRT: 88% Falhas originais com pouca mudança e a camada de ligação apresenta deterioração significativa devido às temperaturas mais altas da água
2013	Lai <i>et al.</i>	Avaliação da durabilidade de vigas de concreto FRP- usando IRT e ensaios de cisalhamento direto quasi-estática para monitorar os processos intermediários de fissuração	Aplicação de um bloco quente com uma temperatura constante de superfície (40°C) sobre a superfície de CFRP durante 30s	As ligações adesivas são enfraquecidas sob altas temperaturas, devido ao alcance da temperatura de distorção pelo calor da resina epoxi durante a exposição, o que fez com que as ligações interfaciais se tornassem mais vulneráveis.
2012	Sham <i>et al.</i>	Avaliação da técnica de monitoramento de temperatura de superfície contínua	Aquecimento em forno a 50°C durante 2h	Verificação de que a liberação de calor sensível estimada pela técnica de monitoramento de temperatura de superfície contínua é consistente com

		para investigação de características de liberação de calor sensível durante o período noturno, pela construção		o calor sensível calculado pela equação tradicional de energia interna. IRT é uma ferramenta confiável que pode ser empregada para fins de verificação
2011	Taillade <i>et al.</i>	Caracterização dos defeitos de adesão de FRP em estruturas de concreto	Aplicação de cobertura elétrica flexível por 50 s.	IRT permite a detecção dos defeitos de ligação e uma análise adicional permite a quantificação da sua profundidade Shearography permite a determinação da localização dos defeitos e a avaliação da qualidade da adesão.
2001	Wyckhuyse and Maldague	Investigação da deterioração da madeira, empregando IRT	Aquecimento por microondas durante 2 min	Defeitos em madeiras podres não têm um teor diferente de umidade com relação à madeira sã e, portanto, não podem ser detectados por IRT

Fonte: Kylili *et al.* (2014), p. 541

Tabela 3.6: Histórico de pesquisas com termografia ativa: pulsada por fase

ANO	AUTOR	INOVAÇÃO	ESTÍMULO EXTERNO	CONSEQUENCIA
2010	Aggelis <i>et al.</i>	Caracterização de danos sob a superfície de estruturas de concreto usando uma combinação de IRT e ULT	PT - Aquecimento em forno por 3 h a 90° C LT - 100 kHz, 200 e 20 kHz.	Fissuras verticais geralmente apresentam-se bastante finas, assim, a câmara de infravermelhos é obrigada a ter uma alta sensibilidade térmica ULT permite a caracterização da profundidade da fenda em mais detalhe
2012	Dudic <i>et al.</i>	Aplicação individual e combinada de ultra-som e IR na estimativa de perdas devido a vazamentos de ar comprimido	----	ULT tem a limitação do ruído de fundo, enquanto que a vantagem de a detecção da falha na ULT reside na sua versatilidade, velocidade de detecção, facilidade de utilização, capacidade de realizar no chão da fábrica, e capacidade de detectar vários tipos de vazamentos PT não é uma escolha ideal para a detecção de pequenas fugas, mas oferece bons resultados para as fugas a partir dos orifícios maiores que 1,0 milímetros
2013	Kordatos <i>et al.</i>	Avaliação de danos dos murais e alvenaria de um Mosteiro usando IRT	PT – 4 lâmpadas de 1 Kw ligadas em corrente direta na faixa de 0–10 V	A avaliação termográfica do mural no telhado resultou em descobertas valiosas, tais como fissuras superficiais e sub-superficiais críticas, e áreas extendidas de destacamento, causando preocupação com sua integridade estrutural
2013b	Kordatos <i>et al.</i>	Caracterização de defeitos subsuperficiais em concreto usando termografia e ultra-som	PT - Estufa a 90° C por 3 h LT - Quebra acústica com transdutores de chumbo com emissão de resposta na banda de 50 kHz a 800 kHz e diâmetro de 5 milímetros	Termografos a cerca de 60° C revelam fissuras do subsolo, na profundidade de 11 milímetros Em relação à ULT, a dependência da amplitude da profundidade da fissura é monotônica permitindo tanto a detecção quanto a de danos.
2013	Maierhofer <i>et al.</i>	Aplicação de termografia ativa para o monitoramento de processos de deterioração de estruturas históricas	PT - 2 lâmp. halógenas de 500W por 60 s LT – Freq. de 0,25; 0,10 e 0,05 Hz por 10-20 períodos, com duas lâmpadas halógenas	PT permite a detecção de camadas destacadas, enquanto LT fornece informações detalhadas sobre a composição estrutural das camadas individuais
2013	Meola <i>et al.</i>	Limitação na detecção de defeitos em compósitos por IRT	PT – lâmpada circular de quartzo de 1 kW LT - de alta para baixa frequência de onda	LT permite uma melhor detecção de defeitos O contraste diminui com a diminuição do tamanho do defeito e com o aumento da profundidade O ponto-chave na detecção de defeitos é a espessura; um defeito grande, mas muito fino pode ser mais difícil de descobrir que um de maior espessura

Fonte: Kylii *et al.* (2014), p. 543

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo experimental de identificação de patologias em revestimentos cerâmicos de fachadas utilizando a termografia infravermelha tomou como base os estudos desenvolvidos por Barbosa em 2014, em que a termografia foi utilizada para avaliar a difusividade térmica e a transferência de calor unidimensional em um sistema submetido a um regime transiente de blocos vazados de argila e blocos de concreto. As equações 3-3; 3-4; 3-5; e 3-9 que são apresentadas no item 3.8 da revisão de literatura foram utilizadas em ambas as pesquisas. A parte experimental foi desenvolvida no Laboratório de Concreto do Departamento de Materiais e Construção – DEMC, onde foram confeccionadas amostras de alvenaria revestida de cerâmica com e sem aplicação de patologias (erros de assentamento passíveis de ocorrer em obra). Para os ensaios termográficos foi construída uma bancada de testes no Laboratório de Termometria (LabTerm), do Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC, ambos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

4.1. Materiais

Para fabricação das amostras foram utilizados blocos cerâmicos de alvenaria estrutural com dimensões de 39x19x14cm (Figura 4.1), placas cerâmicas de 15x15 cm, com acabamento acetinado, cimento Portland CPV-ARI e areia natural quartzosa (para o chapisco), argamassa colante industrializada múltiplo uso (para assentamento dos blocos), argamassa industrializada tipo AC-II (para assentamento das cerâmicas), argamassa para rejuntamento cerâmico tipo II (sem pigmentação) e água da Copasa. Os materiais foram adquiridos no comércio de Belo Horizonte.

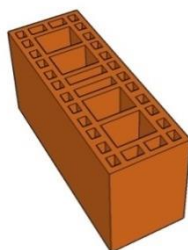


Figura 4.1: Bloco estrutural em cerâmica.

Para a construção da bancada de testes, foram utilizados: placas de *Medium Density Fiberboard* (MDF) cru de 15mm, parafusos cabeça chata 5x50mm, placas isolantes de fibra cerâmica Texfiber 1260 com espessura de 25,4mm, dobradiças para fixação do tampo, trincos de pressão por alavanca, manta isolante, lâmpadas palito, estrutura de alumínio para sustentar as lâmpadas e soquetes adequados para a lâmpada, cabo de silicone com fibra de vidro, conector sindal e plugue.

4.2. Método

O método utilizado considera a distribuição de temperatura transiente unidimensional em um sólido semi infinito, com a condição de contorno de segunda espécie. Na distribuição transiente de temperatura, o perfil de temperatura varia com o tempo e com a posição. O sólido semi infinito apresenta geometria simples, e utiliza-se da hipótese de que ele possui uma face identificável, e dimensões infinitas. Com isso, quaisquer alterações de temperatura nesta face nunca atingem o outro extremo. O esquema da proposta experimental pode ser visualizado na Figura 4.2.

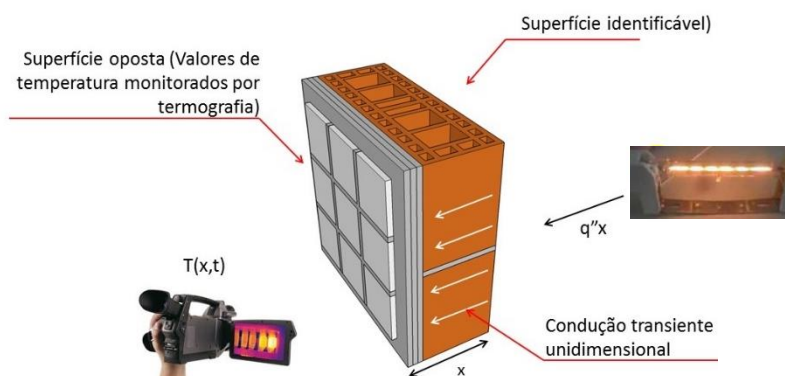


Figura 4.2: Esquema da proposta do método.

Para o desenvolvimento do trabalho, foram realizadas as seguintes etapas: montagem das amostras, construção do túnel térmico, procedimentos experimentais (ensaios preliminares, simulação em software, ensaios termográficos), análise das imagens no software da Flir, e análise matemática.

4.2.1. Amostras

Foram preparados oito tipos diferentes de amostras, sendo três sem aplicação de cerâmica e cinco com cerâmica. As três primeiras amostras foram preparadas com o objetivo de isolar cada elemento do sistema de assentamento. Desta forma, foi executada uma amostra com dois blocos unidos por argamassa de assentamento colante múltiplo uso (Figura 4.3a); uma amostra com dois blocos unidos sobre a qual foi aplicado chapisco de areia e cimento no traço 1:3, ou seja, uma parte de cimento para 3 partes de areia quartzosa (Figura 4.3b); uma amostra com dois blocos, chapisco, sobre o qual aplicou-se o emboço de argamassa colante múltiplo uso, na proporção de 7 kg de argamassa para 1 litro de água (Figura 4.3c); amostra com dois blocos, chapisco, aplicação de emboço, mais argamassa colante de assentamento cerâmico sobre a qual aplicou-se as placas de cerâmica de acordo com instruções do fabricante da argamassa, ou seja, camada única, aplicada com o lado liso da desempenadeira, diretamente no

emboço, em seguida a utilização do lado denteado da desempenadeira, e finalmente o acabamento com rejunte flexível (Figura 4.3d), sendo esta a amostra de referência. Na mistura da argamassa de assentamento da cerâmica na amostra de referência, utilizou-se uma quantidade de água suficiente para se obter uma consistência úmida, o que é considerado pelo fabricante como ideal para o assentamento.

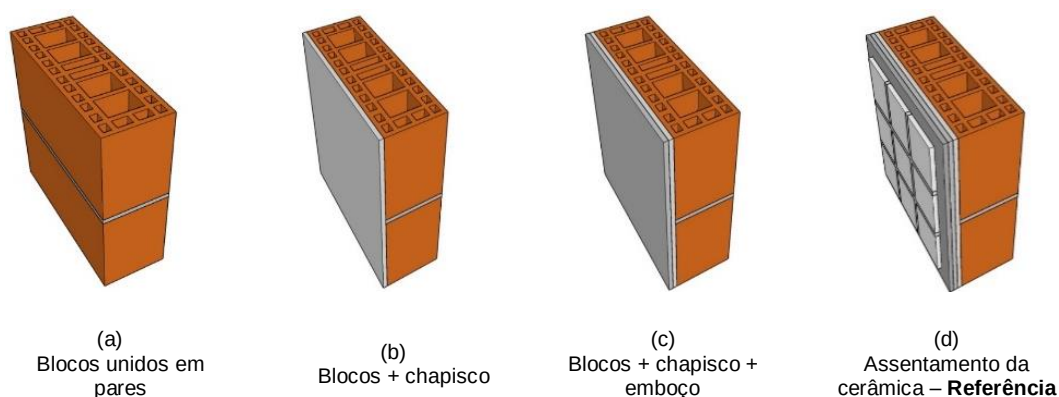


Figura 4.3: Esquema de montagem das amostras.

Com este esquema de montagem foram produzidas mais quatro amostras, onde foram introduzidos quatro erros de assentamento (um em cada amostra): após a aplicação da argamassa colante, esperou-se intervalo de tempo além do recomendado pelo fabricante para aplicar a cerâmica e, assim, a argamassa apresentou-se seca logo antes do assentamento (tempo em aberto estourado); sobre a argamassa úmida (intervalo de tempo recomendado pelo fabricante) aplicou-se material pulverulento (pó de pedra passado por peneira 200); no tardo da placa cerâmica aplicou-se substância gordurosa e assentou-se sobre argamassa úmida; assentou-se a cerâmica saturada de água (encharcada) sobre argamassa úmida. Tais erros ocorrem com frequência na construção civil e podem provocar o descolamento da cerâmica devido à má aderência da placa com a argamassa colante. A Figura 4.4 identifica as fases de montagem das amostras e a interface onde foram introduzidos os erros de assentamento.

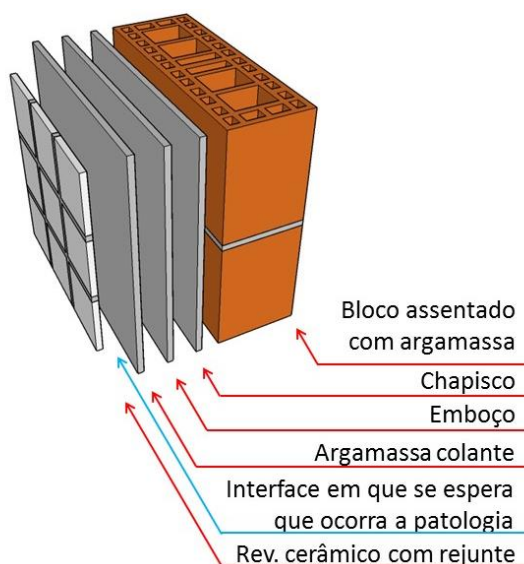


Figura 4.4: Identificação das camadas das amostras.

Houve um cuidado especial em se obter um prumo adequado dos componentes, e foi realizada a percussão das amostras com martelo de borracha, conforme pode ser visto na Figura 4.5 de acordo com os procedimentos do laboratório de concreto.

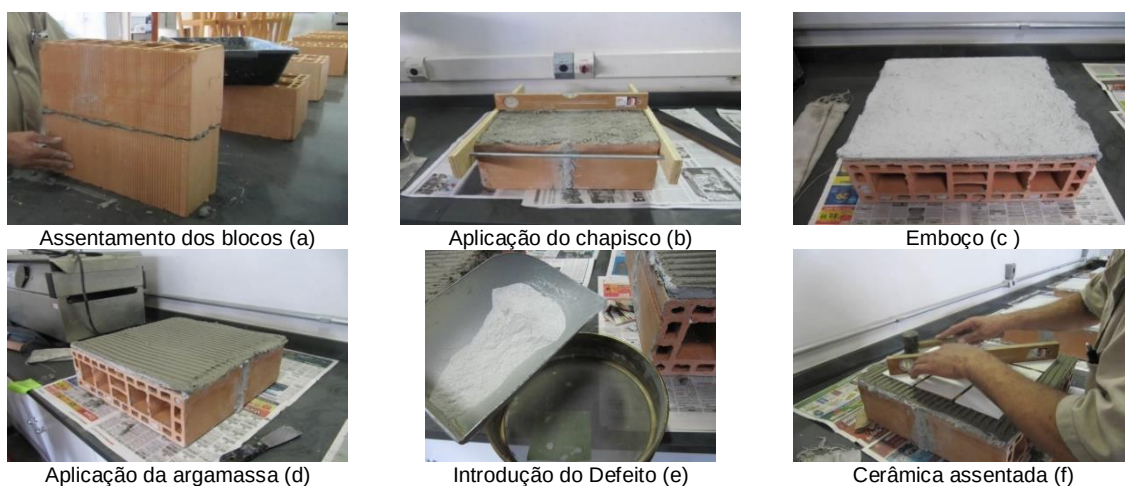


Figura 4.5: Esquema de montagem das amostras.

Para facilitar a identificação das amostras foi criado um código para cada situação (de S1 a S8), conforme descrito na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Identificação das amostras para cada situação

Identificação	Montagem das amostras	
S1	Blocos assentados com argamassa	
S2	Blocos assentados com argamassa + chapisco (areia e cimento traço 1:3)	
S3	Blocos assentados com argamassa + chapisco + emboço	
S4	Amostra Referência com dois blocos, chapisco e aplicação de emboço mais argamassa colante de assentamento. REF	Na mistura da argamassa utilizou-se uma quantidade de água suficiente para uma consistência úmida considerada ideal para o assentamento da cerâmica.
S5	Amostra com dois blocos, chapisco, aplicação de emboço, mais argamassa colante de assentamento sobre a qual foi aplicado a cerâmica e acabamento com rejunte flexível.	Tempo estendido entre a aplicação da argamassa e aplicação do revestimento cerâmico. (tempo em aberto estourado) TEMPO EM ABERTO EXCEDIDO – T.A.E.
S6		Aplicação de material pulverulento na argamassa colante (pó de pedra passado por peneira 200) ARGAMASSA COLANTE COM PULVERULENCIA SUPERFICIAL - PULV
S7		Aplicação de substâncias gordurosas no tardo das placas cerâmica aplicou-se substâncias gordurosas e assentou-se sobre amassa úmida TARDOZ DA CERÂMICA IMPREGNADO COM ÓLEO - OIL
S8		Placas cerâmicas foram aplicadas saturadas de água (encharcadas) sobre a argamassa. CERÂMICA SATURADA COM ÁGUA – SAT.

As amostras foram curadas por 28 dias e permaneceram em repouso no laboratório para que entrassem em equilíbrio térmico com o ambiente de cada ensaio.

4.2.2. Bancada de testes

Para os ensaios de termografia foi montada uma bancada para, experimentalmente, quantificar a difusividade térmica de cada componente do sistema (alvenaria, chapisco, emboço, cerâmica assentada) e para identificar as patologias geradas por erros de assentamento. A bancada foi desenvolvida para se obter um melhor sistema de vedação do calor na coleta dos dados por termografia. (Figura 4.6)

As dimensões do túnel térmico⁴ utilizado neste trabalho foram definidas a partir do tamanho das amostras (480x70x490mm). Tais medidas proporcionam o encaixe perfeito da amostra no túnel ficando apenas uma superfície em contato com o fluxo de calor (sem perdas de energia por possíveis frestas). A face superior do túnel é articulável e fixada ao fundo do túnel por dobradiças, para facilitar o manuseio das amostras durante os ensaios.

A parte interna do túnel foi revestida com placas isolantes nas laterais e no topo da caixa, para assegurar que apenas a face posterior da amostra estivesse em contato com o fluxo de calor gerado no interior da caixa (Figura 4.6a). Para garantir o perfeito isolamento entre a amostra e as laterais do túnel térmico foram utilizados fragmentos de manta nas

⁴ Detalhamento técnico da bancada de testes está no Apêndice 1

frestas que porventura surgissem. Para uma melhor vedação do túnel e encaixe das amostras, foram instalados quatro trincos de pressão por alavanca, dois em cada face lateral do túnel que estivesse em contato com o tampo do túnel. Na parte interna foi instalada a fonte de calor, que apresentou duas configurações (Figura 4.6b e 4.6c), devido aos resultados dos ensaios preliminares: a primeira conformação era de apenas uma lâmpada halógena tipo palito 110V/1.000W, centralizada no fundo do túnel; a segunda apresentava quatro lâmpadas halógenas tipo palito 76mm/220V/200W de potência, centralizadas horizontalmente e distribuídas uniformemente na vertical, sustentada por uma estrutura de alumínio e soquetes para a lâmpada halógena.

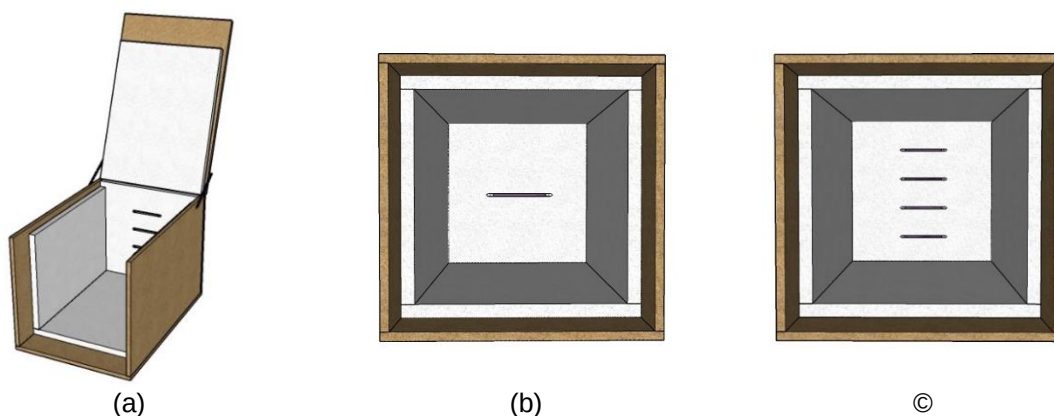


Figura 4.6: Túnel térmico e configuração interna de lâmpadas

Foi utilizado um cabo de silicone com fibra de vidro, conector sindal e plugue para reduzir emendas no cabeamento e, assim, possíveis perdas de corrente.

4.2.3. Equipamentos

Utilizou-se uma termocâmera da marca *FLIR Systems*, modelo SC660 para monitorar a temperatura da face externa das amostras (denominada, neste trabalho, de superfície oposta). Para registrar a temperatura da face externa do bloco utilizou-se um termopar e datalogger da marca *Agilent*. Foram utilizados cinco canais, e os terminais foram ligados ao sistema de aquisição de dados. O dispositivo teve a função de medir a temperatura na superfície da placa cerâmica, e registrá-la em um sistema de aquisição de dados (*datalogger*) a intervalos regulares. Um relógio termo higrômetro da marca Testo, modelo 622 para mensurar a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar (inputs requeridos pela termocâmera). Para mensurar a distância entre o bloco e o termovisor utilizou-se uma trena de aço da marca *LEE PRO Tools*. Régua graduada foi utilizada para medir as dimensões do bloco e a distância entre bloco e lâmpada. Régua de aço inox com 0,8m da marca Vonder, graduada em milímetros (Figura 4.7).



Figura 4.7: Equipamentos utilizados para as medições.

4.3. Ensaios preliminares

Para definição do tempo de ensaio e da distância que a amostra seria posicionada com relação à fonte de calor, foram realizados ensaios preliminares com a amostra de referência (S4) e uso de termopares, até que fosse identificada uma variação mínima de temperatura de 2°C^5 na superfície das placas cerâmicas. A amostra foi posicionada no túnel térmico e aquecida, e a variação da temperatura na face externa foi monitorada. Verificou-se que, após o desligamento da fonte de calor, a temperatura da face externa continuou a aumentar, já que o volume interno de ar estava a uma temperatura bastante alta e o material analisado é bastante isolante. Neste primeiro ensaio, o túnel possuía apenas uma lâmpada halógena palito (1.000W, 110V). Após encaixe do bloco, conectou-se o sistema de medição via termopar, e foram posicionados o relógio termo higrômetro e o termovisor.

Definido o tempo de ensaio, utilizou-se o termovisor para verificar da existência ou não do fenômeno de convecção no volume de ar interno ao túnel térmico. Esta hipótese foi considerada devido ao maior volume interno de ar, ao se comparar com o trabalho realizado por Barbosa (2014).

O segundo ensaio preliminar foi realizado com o mesmo procedimento anterior: a amostra foi aquecida, e a variação da temperatura na face externa (superfície oposta do sólido semi infinito) foi monitorada, pelo termopar e pelo termovisor, como pode ser visto na Figura 4.8. Nesse ensaio, as imagens térmicas mostraram um diferencial de temperatura entre a porção superior e inferior da amostra, o que reafirmou a hipótese de

⁵ Incerteza da câmera, dada pelo manual: "Accuracy (% of reading): $\pm 1^{\circ}\text{C}$ or $\pm 1\%$ of reading (object within $+5^{\circ}\text{C}$ to to 120°C , ambient within $+9^{\circ}\text{C}$ to 35°C); otherwise $\pm 2^{\circ}\text{C}$ or $\pm 2\%$ ".

que este comportamento poderia ser resultado de um movimento de convecção da massa de ar interna ao túnel térmico.



Figura 4.8: Termograma que demonstra o maior aquecimento na porção superior da amostra

Neste ensaio também foi possível determinar o valor da emissividade do revestimento cerâmico por meio da técnica da temperatura conhecida: comparou-se o valor de temperatura acusado pelo termopar, e assim, foi ajustado, na termocâmara, o parâmetro da emissividade até que o valor de temperatura acusado pelo equipamento fosse o mesmo do termopar. Para cada dia de ensaio adotou-se o seguinte protocolo de procedimento:

- janelas e portas do laboratório fechadas; ar condicionado desligado;
- utilização do mesmo equipamento de termografia;
- lente da termocâmera posicionada a 900 mm da face externa do bloco;
- lâmpada fria no início do experimento;
- registro da imagem termográfica no início dos testes (antes do aquecimento);
- face interna do bloco posicionada a 900 mm do eixo da lâmpada;
- relógio termo-higrômetro ligado e sempre na mesma posição;
- registro dos valores de temperatura ambiente e umidade do ar instantes antes de se iniciar o ensaio;
- registros termográficos a cada minuto durante uma hora.

4.4. Simulação

Para confirmação da hipótese de convecção no volume de ar no interior do túnel térmico, realizou-se uma simulação no *software Ansys*, e constatou-se que, conforme esperado, a diferença de temperatura ocorreu devido ao fenômeno de convecção. O modelo simulado

foi sistematizado conforme o modelo real utilizado nos ensaios: caixa de madeira internamente protegida por uma manta térmica de fibra de vidro, e uma câmara de ar confrontada com uma parede de tijolo. Na câmara de ar, uma fonte de calor (1000 W) foi posicionada no centro da caixa, a fim de simular a lâmpada halógena palito. Após confirmação da hipótese, foi realizada nova simulação, com uma disposição de lâmpadas diferente da inicial, a fim de minimizar o efeito de convecção: lâmpadas distribuídas uniformemente em quatro pontos verticais na parede da caixa, de forma que cada ponto equivalesse a uma fonte de 250 W com a potência total equivalente à potência da lâmpada utilizada inicialmente. Com os resultados da segunda simulação, considerou-se esta distribuição mais adequada nesta pesquisa. O túnel térmico foi adaptado para quatro lâmpadas de 200W (disponíveis no mercado) centralizadas horizontalmente e distribuídas de maneira uniforme na vertical. Após novos ensaios, ficou claro que a convecção ficou reduzida, mas apenas durante o período em que as lâmpadas ficaram ligadas.

4.5. Ensaios termográficos

Antes de cada ensaio termográfico, procedeu-se ao atendimento do protocolo definido nos ensaios preliminares, conforme descrito anteriormente. Para a montagem de cada ensaio ocorreram as seguintes etapas: preparação do túnel térmico, colocação das lâmpadas no soquete, inserção da amostra na parte frontal do túnel e vedação do sistema. Considerou-se que o túnel térmico atendeu à condição de contorno interna [$T(x \rightarrow \infty, t) = T_i$] para condução transiente unidimensional em um sólido semi-infinito, pois respeita os dois requisitos fundamentais (uma face identificável, e dimensões infinitas). O bloco possui apenas uma superfície identificável em contato com o fluxo de calor, e todas as outras faces ficaram isoladas, exceto a oposta (voltada para o termovisor). Na superfície identificável foi aplicado o fluxo de calor constante por meio das lâmpadas halógenas, gerando uma transferência de calor unidimensional transiente no interior da amostra. Quando a espessura $[x]$ do sólido tende ao infinito, este deve apresentar, em qualquer instante de tempo $[t]$, a temperatura constante e igual à temperatura inicial $[T_i]$.

Para que a condição inicial [$T(x \rightarrow \infty, t) = T_i$] fosse atendida, as amostras permaneceram em repouso no laboratório, até que atingissem o equilíbrio térmico com o ambiente. Nesta situação, qualquer posição $[x]$ no sólido, em um instante $[t = 0]$, deve possuir a mesma temperatura inicial $[T_i]$ da superfície identificável. Portanto, o primeiro valor de temperatura da superfície oposta, lido nos termogramas, foi considerado $[T_i]$.

Em seguida, foi feito o posicionamento dos equipamentos: relógio termo higrômetro para registro dos valores e termocâmera com os parâmetros de entrada e configuração definidos. A variação de temperatura na superfície oposta à da aplicação do fluxo de

calor, monitorada por termografia, descaracterizava a geometria do sólido semi-infinito na medida em que apresentava uma variação de temperatura perceptível. Considerou-se neste estudo uma variação de 2°C em função da incerteza de medição do equipamento de medição que é de $\pm 1^\circ\text{C}$.

Para posicionamento do equipamento de termografia infravermelha, foi utilizado um tripé onde foi fixada a câmera. O tripé foi centralizado e alinhado com o túnel conforme mostrado na Figura 4.9. A distância entre a face externa da amostra e o equipamento foi de 90 cm. A câmera foi programada para registrar imagens termográficas a cada 60 segundos e ajustada com os *inputs* de entrada, diferentes para cada ensaio: temperatura ambiente, umidade do ar, temperatura refletida, e emissividade do material que foi estimado pela técnica da emissividade conhecida (da fita crepe). A temperatura ambiente no momento de cada ensaio e a umidade do ar foram registradas pelo relógio termohigrômetro; a temperatura refletida foi considerada semelhante à temperatura ambiente por não haver objetos próximos que interferissem com as condições de medições.



Posicionamento do termovisor



Posicionamento do termovisor



Programação do termovisor

Figura 4.9: Posicionamento dos equipamentos

Foram avaliadas oito amostras em dias diferentes e, em cada ensaio, durante a fase de montagem do experimento, utilizou-se o mesmo relógio termohigrômetro, na mesma posição, com a função de medir a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar.

Durante o ensaio, a temperatura da face externa de cada amostra foi monitorada, ao longo do tempo, ao mesmo tempo que a face interna das mesmas recebia o fluxo de calor constante resultante das quatro lâmpadas halógenas palito de 200W, cada, totalizando 800W. As amostras foram ensaiadas individualmente, e a duração do ensaio e variação de temperatura de cada uma foi registrada.

Após os testes as imagens foram analisadas pelo *software FLIR ThermoCAM QuickReport*, os dados obtidos foram organizados em planilhas do Excel, onde foram gerados as tabelas e os gráficos. As amostras foram estudadas isoladamente, para verificação da interferência de cada camada no conjunto. Para possibilitar a avaliação de cada peça do revestimento cerâmico assentado, cada placa cerâmica foi identificada com um número, de acordo com a Figura 4.10 a seguir:

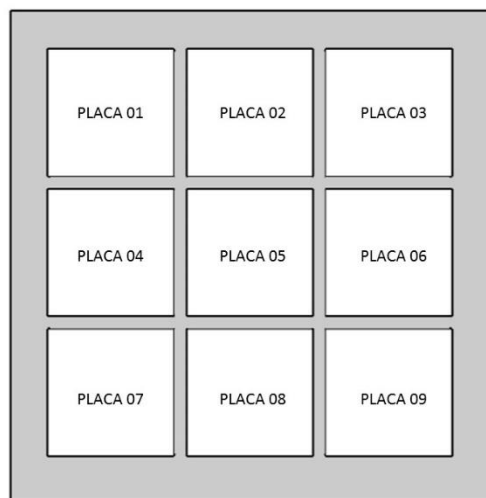


Figura 4.10: Identificação das placas dos blocos com revestimento cerâmico

A pesquisa, nesse contexto, tem foco no desenvolvimento de um método teórico-experimental que possibilite estimar a difusividade térmica de componentes planos construtivos, como os blocos cerâmicos e de concreto.

Este ensaio objetiva obter valores de temperatura na superfície das amostras, de modo a identificar diferenças na transferência de calor em uma mesma amostra e, assim, a existência de patologias nas amostras. Outro objetivo foi identificar a variação da temperatura em função do tempo, por termografia, para cálculo da difusividade do material.

4.6. Análise dos dados

Para a análise dos dados, utilizou-se o *software ThermaCAM QuickReport* (Figura 4.11), compatível com o Excel, onde foram compilados os dados e elaborado os gráficos. A temperatura superficial foi captada pelo equipamento e o software foi utilizado para gerar gráficos ao longo de linhas de perfil determinadas na superfície em estudo. As diferentes cores apresentadas no termograma permitem uma análise qualitativa e estimativa das diferentes temperaturas na superfície dos blocos, utilizando como referência a escala de cores do lado direito da imagem.

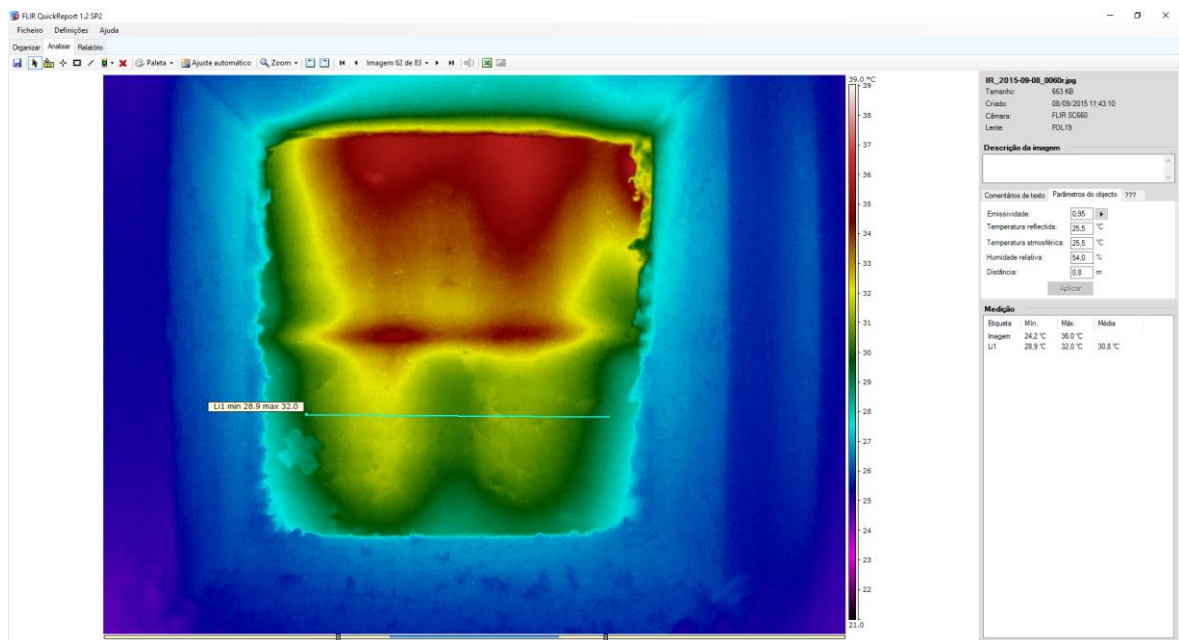


Figura 4.11: Interface do QuickReport em análise da área superficial do bloco

O software *Engineering Equation Solver* (EES) foi preparado para receber os dados coletados. A partir do procedimento experimental, que considerou cada amostra como um sólido semi infinito, foram identificadas as variáveis da Equação 3-15, listadas na Tabela 4.2. A posição de análise $[x]$ correspondeu à espessura da amostra, em (m), o que possibilitou o monitoramento e os registros dos valores de temperatura para $[T(x,t)]$, em (°C), por termografia. A termocâmera foi programada para aquisição de imagens com intervalo de 60 segundos, permitindo o controle da variável $[t]$. O fluxo de calor constante $[q_x]$ gerado por quatro lâmpadas halógenas, pôde ser quantificado devido à condição de vedação, que praticamente impediu a perda de energia térmica para o ambiente. Temperatura da superfície identificável $[Ti]$, em (°C), no instante inicial $[t=0]$. Como em qualquer posição do sólido, no instante $[t=0]$, a temperatura deve ser a mesma, $[Ti]$ é equivalente à primeira leitura realizada por termografia, relativa à superfície oposta. As condutividades térmicas equivalentes $[k]$ dos blocos e das amostras foram definidas conforme a norma NBR 15220-2 (2005) e dados de Incropera e DeWitt (2014).

Tabela 4.2: Variáveis

Variáveis	Descrição
$[T(x,t)]$	Temperatura, em (°C) Obtido por ENSAIO – termografia
$[t]$	Tempo de ensaio, em (s) Obtido por ENSAIO - termografia (aquisição de imagens com intervalo de 60 s)
$[Ti]$	Temperatura da superfície identificável, em (°C), em $[t=0]$ - constante ao longo do tempo Obtido por ENSAIO - termografia
$[x]$	espessura da amostra - constante ao longo do tempo Obtido por LEITURA DE EQUIPAMENTO - trena
$[q_x]$	Fluxo de calor, em (W/m²), aplicado na superfície identificável constante ao longo do tempo Obtido por CALCULO – Lei de Fourier Equação 3-3

[k]	Condutividade térmica equivalente do sólido, em (W/m.K) – constante ao longo do tempo Obtido por CALCULO - conforme a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005) Equação 3-4 e 3-5
[α]	Difusividade térmica equivalente do sólido, em (m²/s) INCÓGNITA Equação 3-9

O cálculo da difusividade térmica teórica equivalente, em função do tempo, foi realizado no *software EES*. Para tanto, o arquivo base recebeu os seguintes dados: valores de temperatura em função do tempo, espessura da amostra, condutividade térmica equivalente, e fluxo de calor. O programa possibilita que as funções sejam inseridas de três maneiras: entrada e interpolação de dados tabulados, que podem ser utilizados na solução do conjunto de equações; suporta funções, procedimentos, módulos e subprogramas escritos pelo usuário; e funções compiladas e procedimentos podem ser dinamicamente ligadas com o EES, desde que escritos em uma linguagem como Pascal, C ou FORTRAN, (F-CHART SOFTWARE, 2014).

Para o cálculo da condutividade térmica equivalente [k] foi realizada uma análise dimensional para cada amostra, como pode ser visto na Figura 3.12 (capítulo de revisão bibliográfica). Como há quatro tipos de amostras: S1, S2, S3 e de S4 a S8, foram realizadas quatro análises dimensionais.

Em cada ensaio, o fluxo de calor [q_x] que incidiu de forma constante na superfície identificável da amostra é apenas uma fração do calor emitido pela lâmpada. A lâmpada, uma superfície difusa, emite calor em forma de radiação em todas as direções. A sua geometria influencia a taxa total que a radiação é emitida e atinge a superfície da amostra. O fator de forma [Fij] quantifica esta variável. Assim, a parcela de calor absorvida pela superfície identificável da amostra pode ser calculada pela Equação 3.3 (capítulo de revisão bibliográfica).

Há diversas relações que permitem a determinação do fator de forma para troca radiante entre superfícies. Neste caso, para o cálculo do fator de forma entre as lâmpadas e a superfície identificável de cada amostra foi adotada a relação em que o cilindro (lâmpada) é considerado infinitamente longo, e paralelo a uma placa de largura finita (amostra), disponível e calculada pelo *software EES*. A Figura 4.12 apresenta a caixa de diálogo do software, utilizada para a determinação do fator de forma.

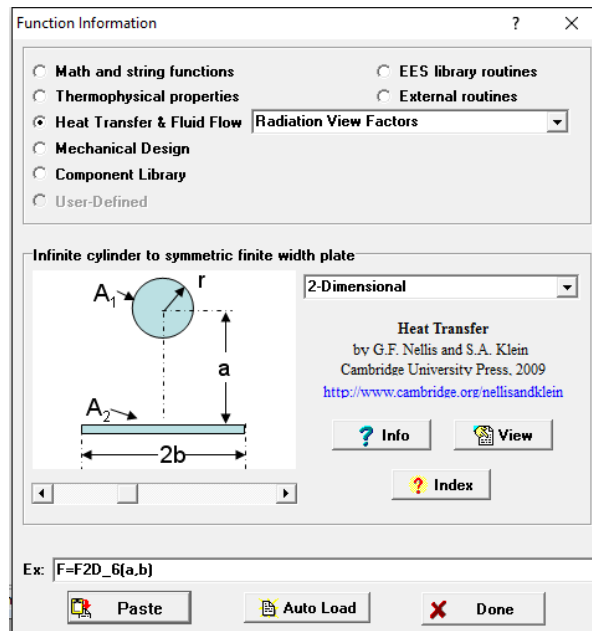


Figura 4.12: Caixa de diálogo do EES com relação matemática para determinação do fator de forma.

Os parâmetros de entrada são $[a]$ e $[b]$ e o de saída, o fator de forma $[F_{ij}]$. Neste caso, $[a]$ correspondeu à distância entre o eixo das lâmpadas e a face interna da amostra e $[b]$, à metade da altura da amostra. Assim, de posse dos valores de $[F_{ij}]$, $[A]$ (área de retângulo) e $[Pot]$ (potência da lâmpada fornecida pelo fabricante), foi possível determinar o fluxo de calor $[q_{x''}]$ para cada ensaio.

Para que se obtenha a difusividade $[\alpha]$ de um material (ou sistema) em função do tempo, é necessário conhecer o valor da condutividade térmica do mesmo. Como os valores de condutividade térmica dos sistemas em estudo não são apresentados nas bibliografias consultadas, utilizou-se os valores obtidos por Barbosa (2014) para os valores de condutividade térmica equivalente dos blocos vazados, para posteriormente determinar a condutividade térmica equivalente de cada amostra (ou sistema), já que são compostos por camadas homogêneas.

A condutividade térmica equivalente das amostras foi determinada de acordo com a norma NBR 15.220-2 (ABNT 2005). Desta norma, apenas não foram utilizados os dados de condutividade térmica, já que esta não apresenta valores dessa propriedade para o ar. Esta norma sugere o uso da Equação 3.8 (capítulo de revisão bibliográfica) para o cálculo da resistência de camadas homogêneas de materiais sólidos. A convecção das camadas de ar do interior dos blocos foi desprezada no cálculo realizado por Barbosa (2014), pois estas apresentam espessura reduzida e estavam confinadas em todos os ensaios, o que possibilitou o uso da equação da norma. Portanto, para o cálculo da resistência

equivalente do bloco cerâmico, foi considerada a transferência de calor por convecção nas camadas de ar internas ao bloco. As resistências $[R]$ de cada componente dos sistemas foram calculadas pela Equação 3.9 (capítulo de revisão bibliográfica), utilizando-se para o valor de $[e]$ a espessura de cada camada.

Após a determinação da resistência térmica total $[R_t]$ de cada amostra, foram obtidas as condutividades térmicas equivalentes $[k]$, utilizando a Equação 3.15 (capítulo de revisão bibliográfica), e considerando $[e]$ a espessura total da amostra. Foi utilizado como premissa que a condutividade térmica, mesmo sendo uma propriedade que varia com a temperatura, em problemas de transferência de calor por condução transiente, pode ser considerada constante (INCROPERA E DEWITT, 2014). Os valores de condutividade térmica $[k]$ do ar, da cerâmica, do concreto, da argamassa industrializada e do emboço (água, areia e cimento) aplicados nesta equação foram obtidos em Incropera e DeWitt (2014), e estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valores de condutividade térmica para o ar, cerâmica, concreto, argamassa industrializada e emboço.

Propriedade	Ar (a 300K)	Cerâmica (a 300K)	Concreto (a 300K)	Argamassa industrializada (a 300K)	Emboço (a 300K)
Condutividade Térmica (W/m.K)	0,0263	0,72	1,75	0,72	0,72

Fonte: Elaboração da autora, com dados obtidos em Incropera e DeWitt, 2014.

Após a obtenção da condutividade térmica, fluxo de calor e valores de temperatura por tempo, foi possível utilizar o EES para realizar o cálculo de difusividade térmica das amostras. As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a interface do *software* em algumas etapas do processo. O Excel foi utilizado para confecção de tabelas e gráficos.

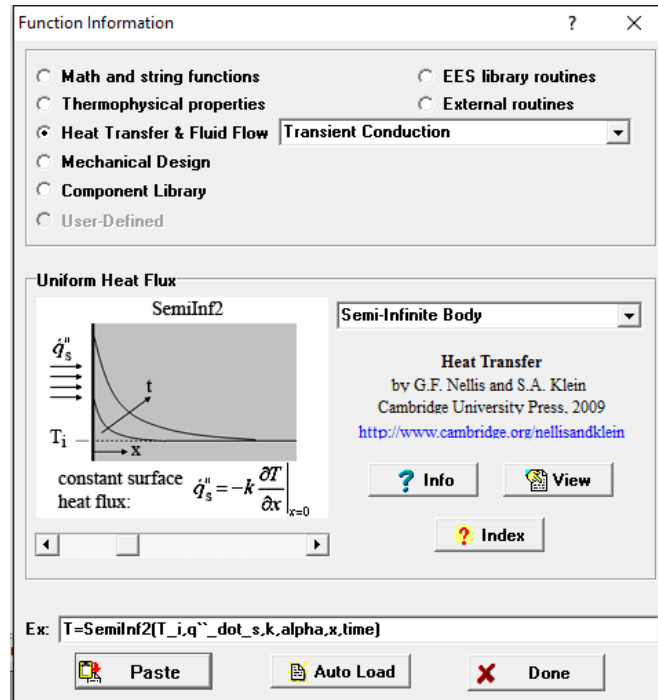


Figura 4.13: Caixa de diálogo do EES com a relação utilizada para o cálculo da difusividade.

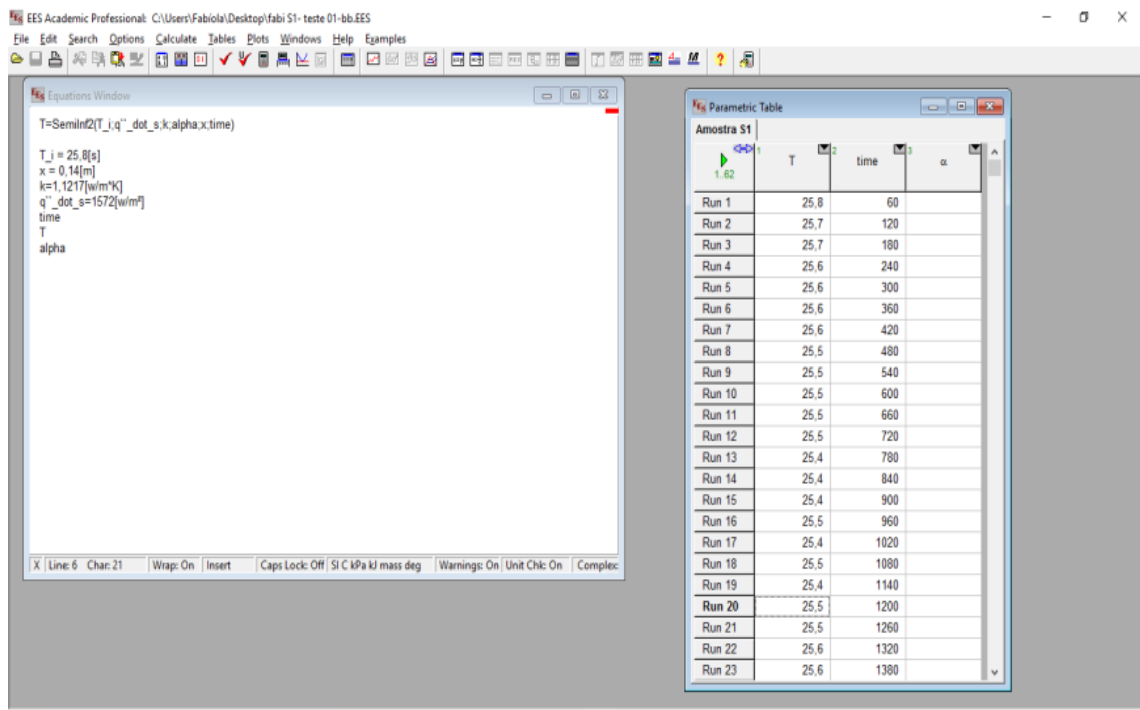


Figura 4.14: Caixa de diálogo do EES com a tabela paramétrica com os dados de temperatura por instante de tempo.

Realizou-se uma simulação no *software* Ansys para avaliar a diferença de temperatura ocasionada devido ao fenômeno de convecção dentro do túnel térmico. Na simulação utilizou-se a disposição de lâmpadas sugerida por Barbosa, (2014), e uma nova

distribuição para se avaliar a possibilidade de minimizar o efeito de convecção do calor das lâmpadas dentro do túnel. Simulou-se quatro lâmpadas distribuídas uniformemente, com a potência total equivalente à potência da lâmpada utilizada pela autora.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A situação foi reproduzida em laboratório por meio de um procedimento experimental que considerou cada amostra como um sólido semi infinito. Dois ensaios preliminares foram realizados, com objetivo de definir o tempo total dos ensaios, além de verificar a hipótese de convecção, confirmada por meio de simulação em *software* adequado.

5.1. Ensaios preliminares

No primeiro ensaio preliminar verificou-se que, após o desligamento da fonte de calor, a temperatura da face externa continuou a aumentar, já que o volume interno de ar estava a uma temperatura muito alta e o material analisado é bastante isolante.

No segundo ensaio preliminar foi possível determinar o valor da emissividade do revestimento cerâmico por meio da técnica da temperatura conhecida. Assim, identificou-se o valor de 0,90 para a emissividade do revestimento cerâmico utilizado. Determinou-se, também neste ensaio, o tempo mínimo de ensaio necessário para obter, na superfície oposta, nos locais onde foi aplicado o revestimento, uma variação de 2°C, correspondente à incerteza do termovisor: 60 minutos (3.600 segundos). Neste trabalho foi considerada, para efeito de cálculo, apenas a incerteza do termovisor.

Em ambos ensaios foi claro o diferencial de temperatura entre a porção superior e inferior da amostra. Supôs-se que isso foi resultado da convecção da massa de ar interna ao túnel térmico e, para verificação foi realizada uma simulação em computador.

5.2. Simulação

Para a modelagem da situação no software foi realizada uma simplificação dos volumes, considerando-se apenas um volume de ar interno ao tijolo cerâmico. Pode-se perceber pelas imagens fornecidas pelo *software* (Figura 5.1) o gradiente de temperatura entre as partes superior e inferior, confirmando a convecção pressuposta.

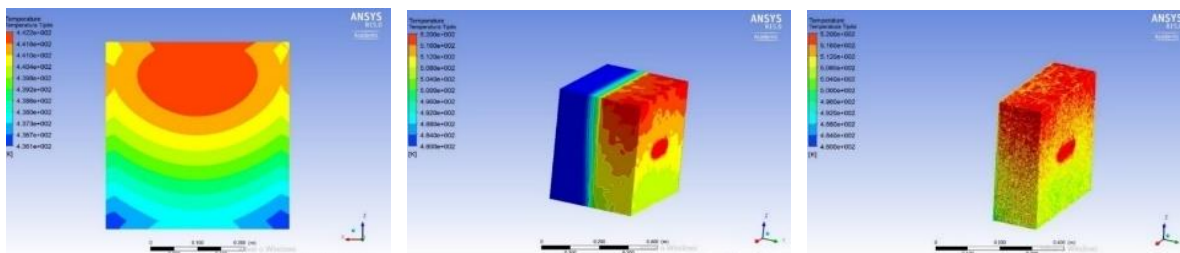


Figura 5.1: Primeira simulação no software Ansys

A Figura 5.2 apresenta as imagens resultantes da segunda simulação, em que a fonte de calor foi distribuída. Pode-se perceber que o gradiente de temperatura foi

consideravelmente menor, o que corrobora a hipótese da redução do efeito de convecção interna. Porém, esse efeito só é atenuado enquanto as fontes de calor estão emitindo radiação para o sistema. Assim que desligadas, naturalmente, o efeito da convecção se amplia.

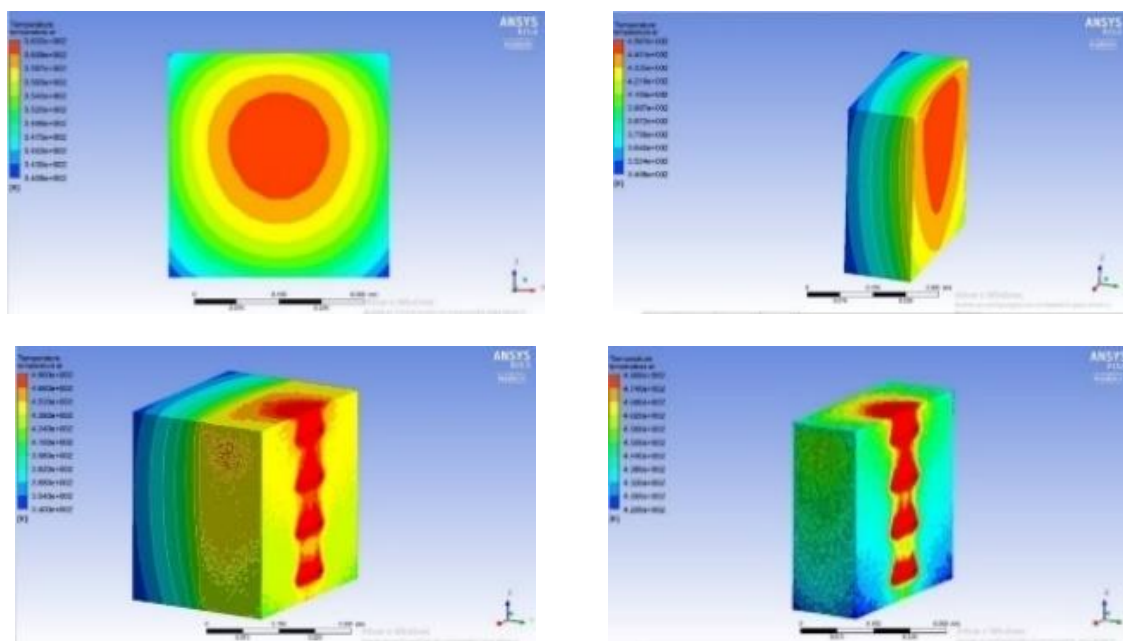


Figura 5.2: Segunda simulação no software Ansys

Por meio dos ensaios preliminares e da simulação no software percebeu-se que a porção inferior da amostra apresenta leituras de temperatura mais estáveis, devido a uma melhor vedação do túnel. Portanto, optou-se por realizar as análises numéricas nesta região.

5.3. Procedimentos experimentais

A Tabela 5.1 mostra os valores registrados antes de cada ensaio (para temperatura ambiente e umidade relativa do ar) registradas por um relógio termohigrômetro. Estes ocorreram em dias distintos, para que o túnel térmico pudesse entrar novamente em equilíbrio com o ambiente antes de cada procedimento.

Tabela 5.1: Medidas da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar antes dos ensaios termográfico.

Amostra	Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa do ar (%)
S1	24,7	57,0
S2	24,3	69,1
S3	24,0	50,0
S4 (REF)	23,5	61,6
S5 (TAE)	21,4	60,0
S6 (PULV)	23,4	57,0
S7 (OIL)	23,6	60,0
S8 (SAT)	21,7	52,0

Os valores de emissividade encontrados foram os seguintes: 0,95 para as amostras S1; S2 e S3; e 0,90 para as amostras S4, S5, S6, S7, S8. As amostras S4, S5, S6, S7, e S8 apresentaram menor valor de emissividade possivelmente por possuírem uma superfície acetinada e, portanto, bastante refletora, o que interfere nesta propriedade.

5.3.1. Termogramas (Amostra S1)

Na Figura 5.3 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S1 (bloco cerâmico estrutural, assentado com argamassa industrializada).

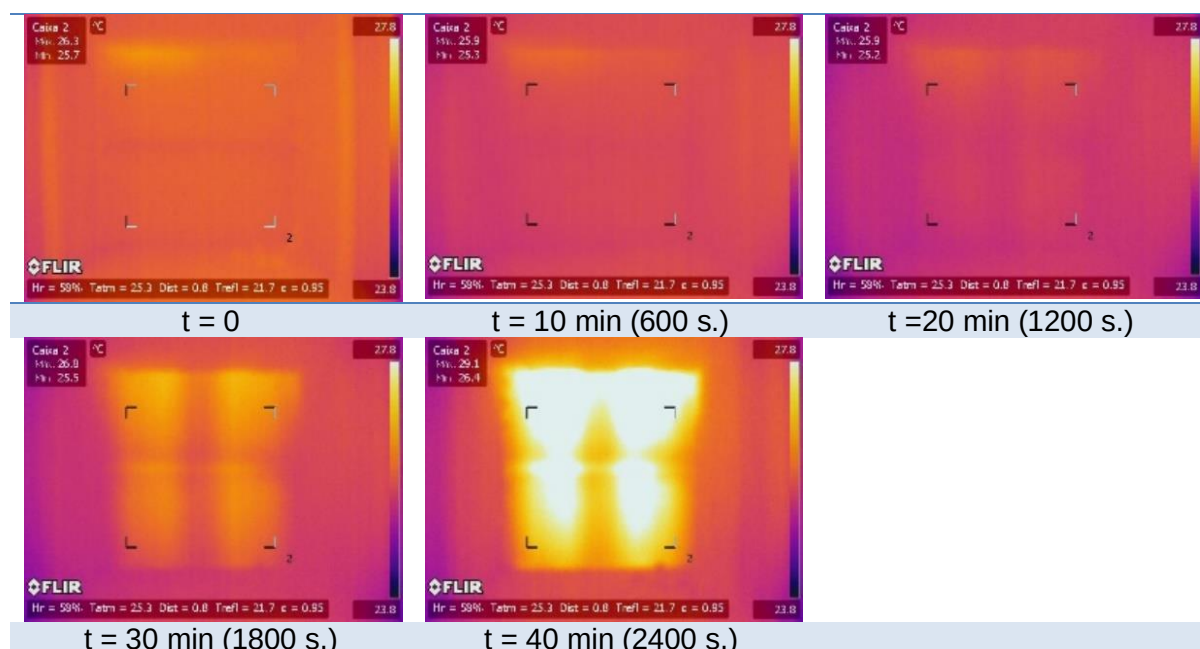
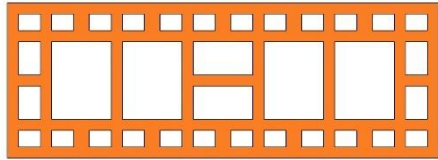


Figura 5.3: Termogramas dos ensaios da amostra S1

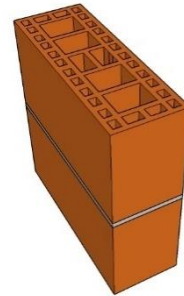
Observando os termogramas da amostra S1 foi possível identificar claramente a diferença na transmissão do calor devido à geometria interna do bloco, assim como verificado em Barbosa (2014). As áreas dos termogramas com maiores valores de temperatura correspondem às porções com menos divisões internas e, portanto, camadas de ar maiores e em menor quantidade. Este comportamento térmico é resultante do acúmulo de energia nas camadas de ar, que provoca aumento na temperatura. Percebe-se que, quanto maior a quantidade de divisões internas, mais lentamente ocorre a transferência de energia térmica de uma face à outra. Devido a um maior número de camadas, o calor apresenta maior quantidade e variedade de meios para transitar, encontrando, assim, maior resistência para a sua transferência de uma face à outra.

É possível identificar, também, que a porção superior da amostra apresentou temperatura maior que a inferior. Pode-se inferir que isto ocorre devido à convecção identificada na

simulação. Como verificado no software, com a redistribuição das fontes de calor, este efeito foi reduzido, mas não eliminado. A Figura 5.4 mostra a planta do bloco cerâmico estrutural utilizado (a) e a montagem dos blocos em pares (b):



Planta do bloco cerâmico estrutural utilizado (a)



Blocos unidos em pares (b)

Figura 5.4: Bloco cerâmico estrutural utilizado

A Figura 5.5 mostra a representação esquemática do revestimento cerâmico que será analisado, sobre a amostra S1 (que não possui revestimento cerâmico), apenas para fins de visualização dos gradientes de temperatura que serão analisados nas amostras S4 a S8, que possuem revestimento cerâmico.

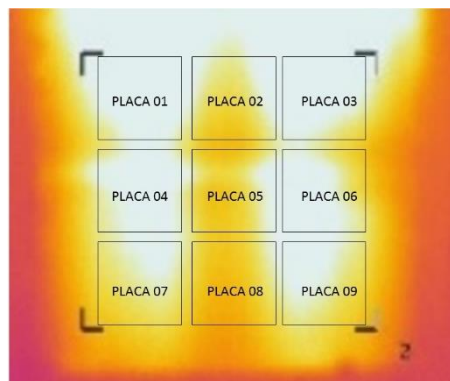


Figura 5.5: Representação esquemática das placas cerâmicas sobre a amostra S1

Devido à não homogeneidade interna da amostra, temos uma variação na resistência térmica do material e, portanto, na taxa de transferência de calor. Pode-se inferir que as temperaturas das placas posicionadas à esquerda e direita serão maiores que as centrais:

- 1 e 3 > 2;
- 4 e 6 > 5;
- 7 e 9 > 8.

As temperaturas das placas superiores serão maiores que as inferiores, devido ao fenômeno de convecção, que foi apenas atenuado.

- 1 > 4 > 7;

- $2 > 5 > 8$;
- $3 > 6 > 9$.

5.3.2. Termogramas (Amostra S2)

Na Figura 5.6 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S2 (bloco assentado com argamassa industrializada + chapisco).

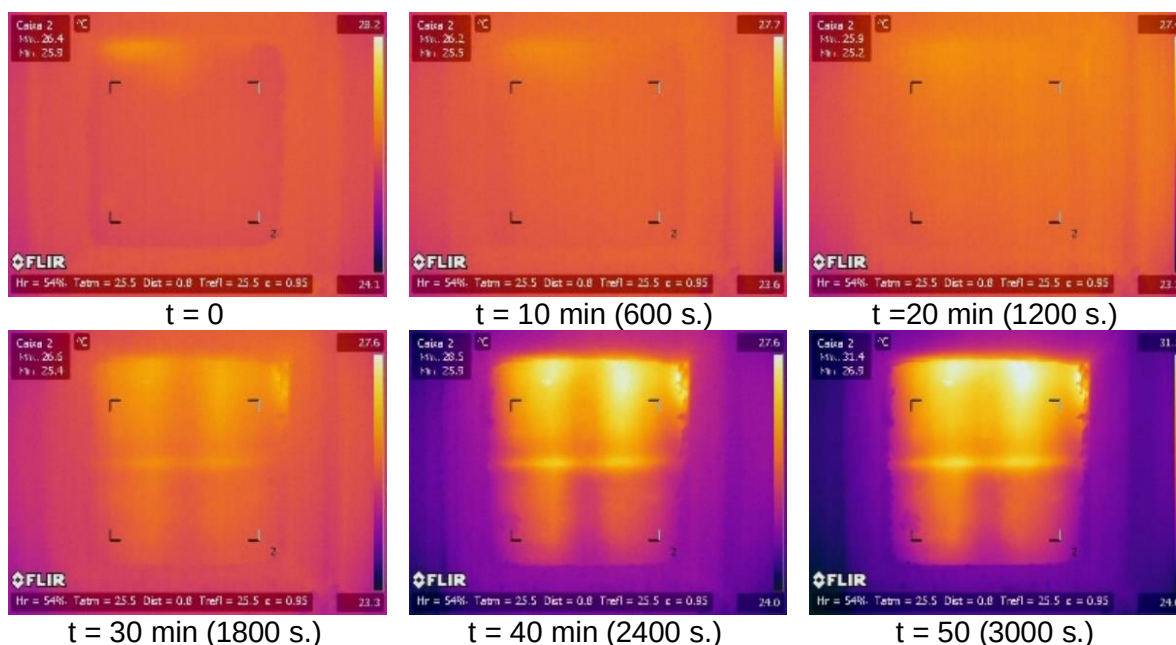


Figura 5.6: Termogramas dos ensaios da amostra S2

Pelos termogramas desta amostra também é possível identificar o diferencial na transmissão do calor devido à geometria interna do bloco. As porções com camadas de ar internas apresentam temperatura mais elevada que aquelas compostas apenas de material cerâmico. Destaca-se, também, a região em que está presente a argamassa de assentamento. Ficou claro nesta amostra um maior aquecimento da porção superior da amostra.

5.3.3. Termogramas (Amostra S3)

Na Figura 5.7 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S3 (bloco assentado com argamassa industrializada, chapisco + emboço).

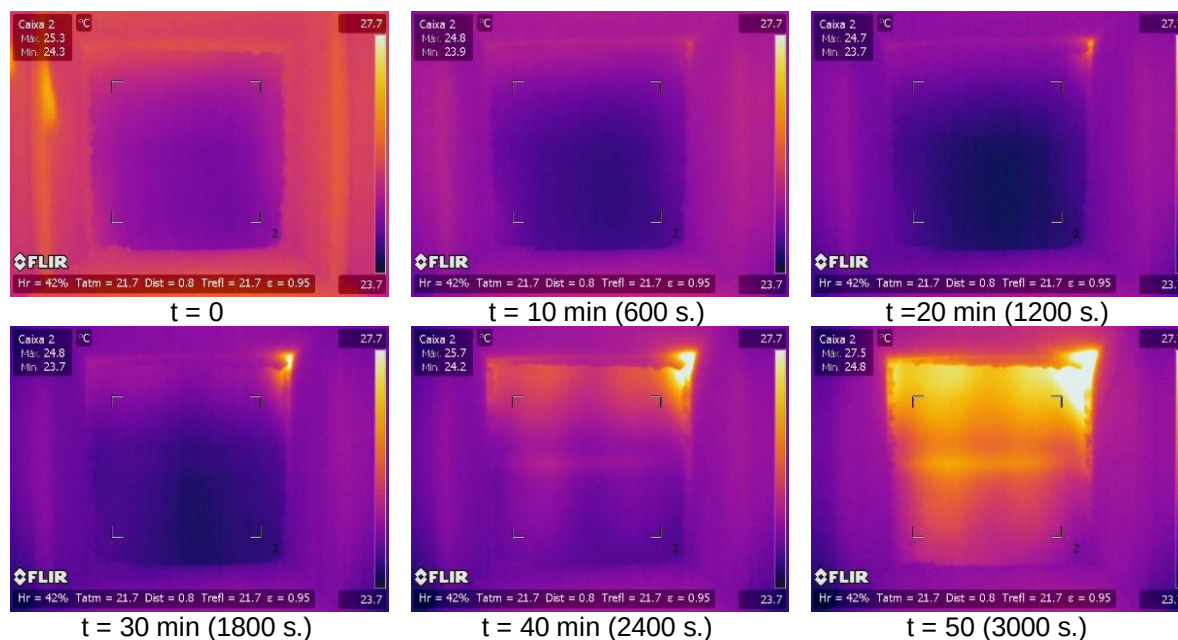


Figura 5.7: Termogramas dos ensaios da amostra S3

Nos termogramas da amostra S3 é possível identificar a diferença na transmissão do calor devido à geometria interna do bloco, porém, apenas depois de um tempo de ensaio. Assim como nas amostras anteriores, as porções com camada de ar também apresentaram temperatura mais elevada que as porções compostas apenas de material cerâmico.

Após o momento em que a amostra atingiu o diferencial de temperatura de 2°C, correspondente ao erro do termovisor, a temperatura na face externa da amostra apresentou tendência visível à uniformização. No termograma referente ao tempo de ensaio de 50 minutos fica clara, na parte superior da amostra, a ocorrência de perda de calor, devido à uma possível falha no isolamento, aliada ao efeito da convecção.

Identificou-se uma maior uniformização da transferência de calor nas amostras que apresentaram camadas de chapisco (S2) e chapisco e emboço (S3) com relação à amostra S1. A variação de temperatura da amostra S1 é maior que a identificada na amostra S2, que é maior que a da amostra S3, considerando-se um mesmo intervalo de tempo. Isso ocorre devido à presença de um maior número de camadas na amostra S3 com relação à S2 e desta com relação à amostra S1.

5.3.4. Termogramas (Amostra S4 - REF)

Na Figura 5.8 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S4: blocos assentados com argamassa industrializada, chapisco + emboço e revestidos com cerâmica (acabamento acetinado) e assentamento ideal, descrito no capítulo referente à metodologia.

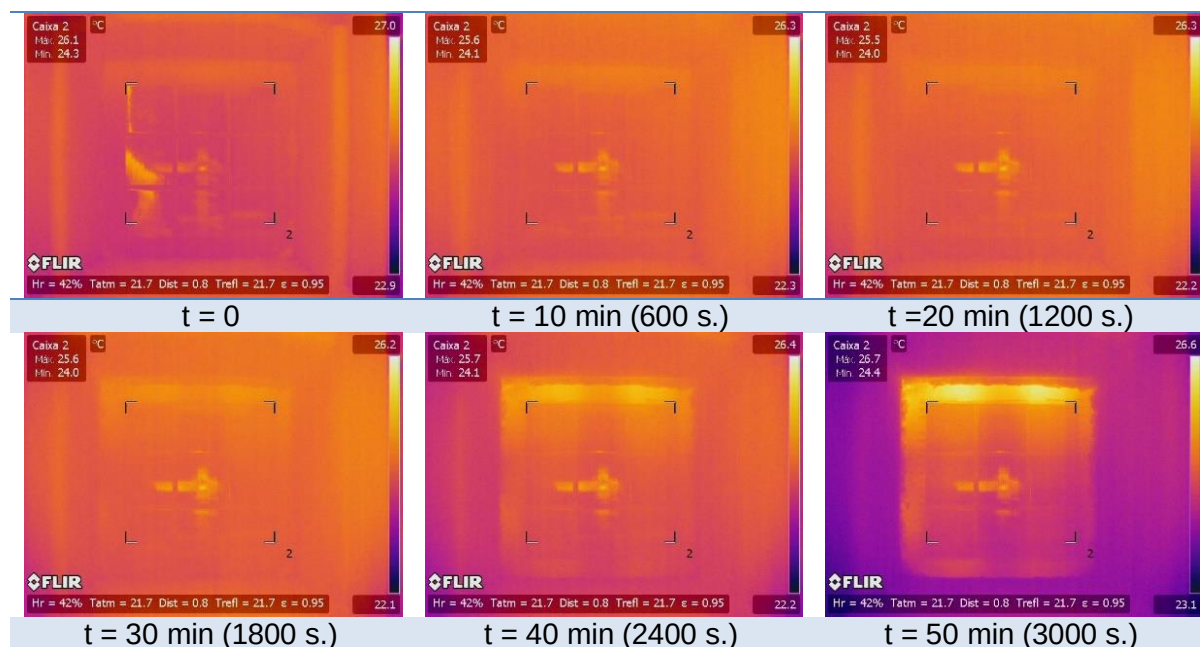


Figura 5.8: Termogramas dos ensaios da amostra S4

Devido ao acabamento acetinado das placas cerâmicas, é possível perceber o reflexo da termocâmera nos termogramas, em todas as amostras com este acabamento (S4, S5, S6, S7 e S8). Nos termogramas da amostra S4 é possível identificar a diferença na transmissão do calor devido à geometria interna do bloco, porém, de forma bastante sutil. Assim como nas amostras anteriores, as porções com camada de ar também apresentaram temperatura mais elevada que as porções compostas apenas de material cerâmico. As regiões do bloco que possuem maior número de camadas internas apresentaram menores valores de temperatura, se comparadas com aquelas que apresentam menor número de camadas. A Figura 5.9 destaca o revestimento cerâmico assentado sobre a amostra S4.

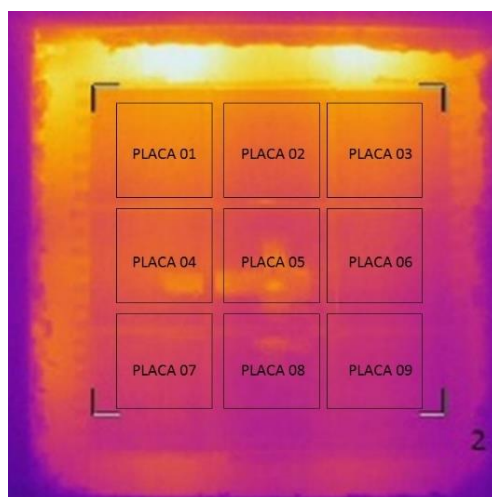


Figura 5.9: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S4

Por meio de avaliação visual do termograma da amostra S4, correspondente ao instante $t = 60$ minutos, pode-se afirmar que:

- a temperatura nas placas 01 e 03 é maior que a da placa 02;
- a temperatura da placa 04 é maior que a da 06, que é maior que a da 05;
- a temperatura da placa 07 é maior que a da 09, que é maior que a da 08.

Esta observação confirma a observação realizada para a amostra S1, junto à figura 5.5.

5.3.5. Termogramas (Amostra S5 - TAE)

Na Figura 5.10 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S5 (blocos assentados com argamassa industrializada, chapisco + emboço e revestidos com cerâmica e assentamento com placas cerâmicas previamente encharcadas com água).

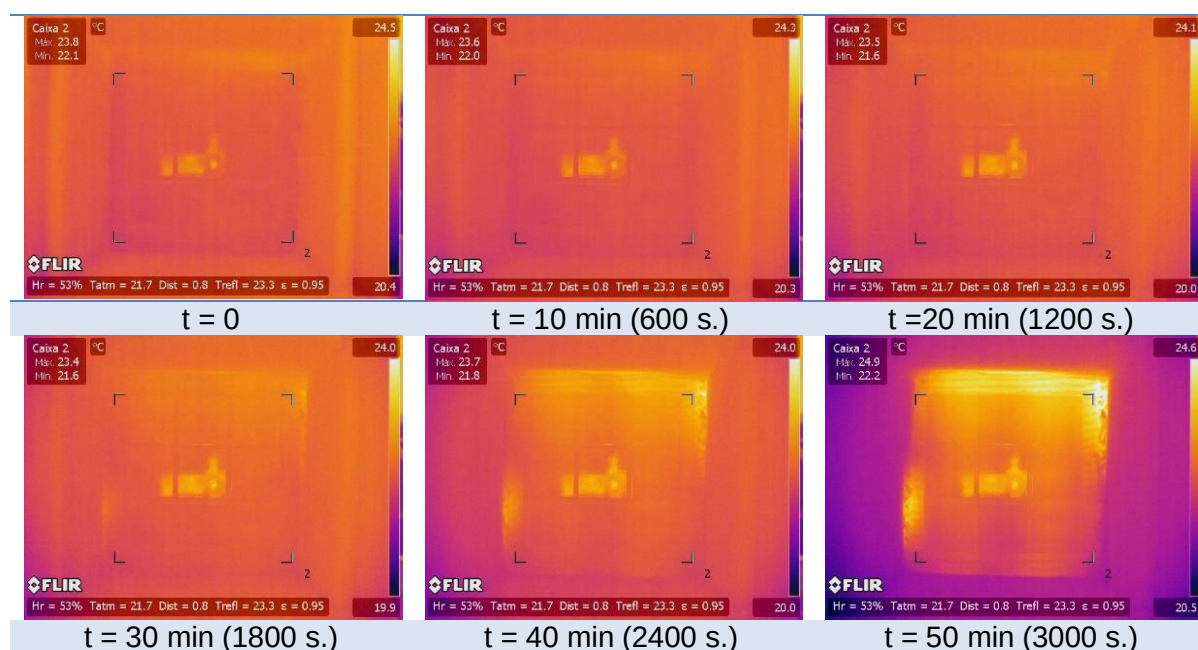


Figura 5.10: Termogramas dos ensaios da amostra S5

Nos termogramas da amostra S5, é possível identificar a diferença na transmissão do calor devido à geometria interna do bloco, também de forma discreta. A Figura 5.11 mostra a representação esquemática do revestimento cerâmico sobre a amostra S5, no instante $t = 60$ minutos.

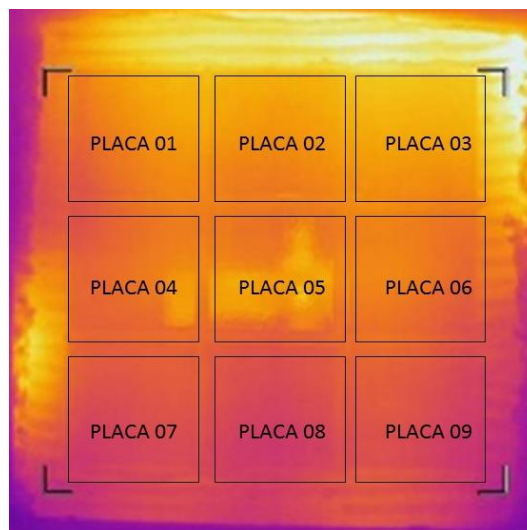


Figura 5.11: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S5

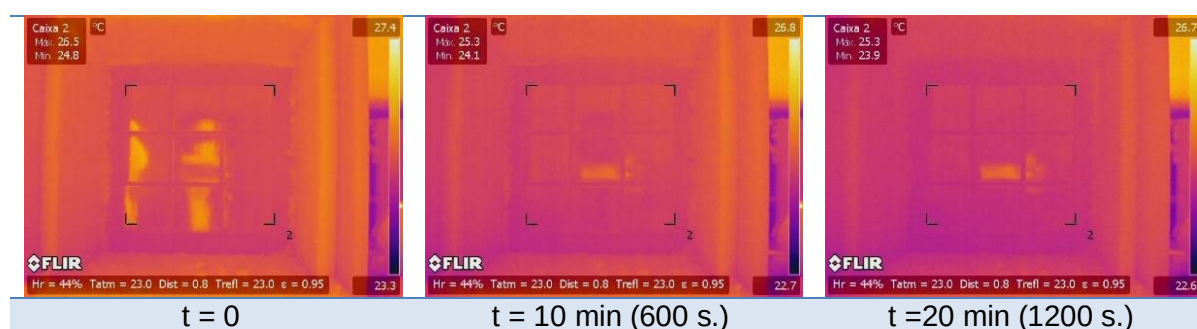
Por meio de avaliação visual, no instante $t = 60$ minutos, pode-se afirmar que a temperatura:

- da placa 03 é maior que na placa 01, que é maior que a da placa 02;
- da placa 04 é maior que a da 05, que é maior que a da 06;
- da placa 07 é maior que a da 08, que é maior que a da 09.

Esta observação confirma a observação realizada para a amostra S1, junto à figura 5.5, que as placas laterais apresentam maiores valores de temperatura que as placas centrais.

5.3.6. Termogramas (Amostra S6 - PULV)

Na Figura 5.12 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S6 (blocos assentados com argamassa industrializada, chapisco + emboço e revestidos com cerâmica e assentamento com argamassa seca (tempo em aberto estourado)).



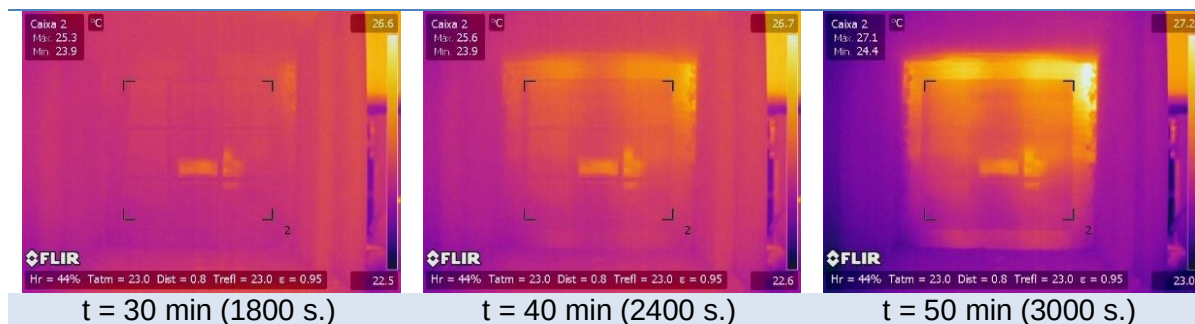


Figura 5.12: Termogramas dos ensaios da amostra S6

Nos termogramas da amostra S6 ainda se pode identificar a diferença na transmissão do calor devido à geometria interna do bloco. A Figura 5.13 destaca o revestimento cerâmico sobre a amostra S6.

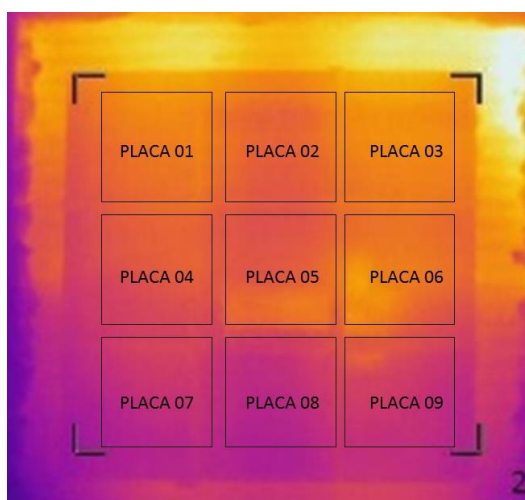


Figura 5.13: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S6

Por meio de avaliação visual, no instante $t = 60$ minutos, pode-se afirmar que:

- a temperatura nas placas 01 e 03 é maior que a da placa 02;
- a temperatura da placa 06 é maior que a da 04, que é maior que a da 05;
- a temperatura da placa 07 é maior que a da 09, que é maior que a da 08.

Esta observação confirma a observação realizada para a amostra S1, junto à figura 5.5.

5.3.7. Termogramas (Amostra S7 - OIL)

Na Figura 5.14 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S7: blocos assentados com argamassa industrializada, chapisco + emboço e revestidos com cerâmica (acabamento acetinado) e assentamento com material pulverulento na superfície da argamassa colante.

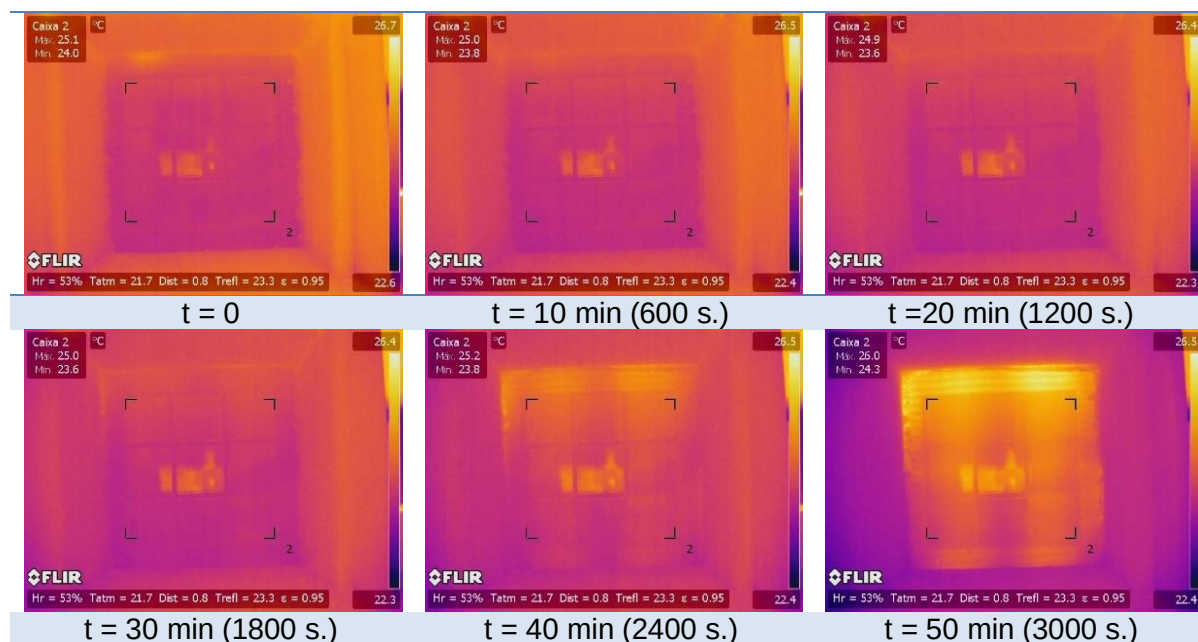


Figura 5.14: Termogramas dos ensaios da amostra S7

Nos termogramas da amostra S6 é possível identificar a diferença na transmissão do calor devido à geometria interna do bloco, porém, de forma bastante sutil. Assim como nas amostras anteriores, as porções com camada de ar também apresentaram temperatura mais elevada que aquelas compostas apenas de material cerâmico. Mais uma vez foi possível perceber que as áreas com maior número de camadas atingiram valores mais elevados de temperatura, se comparadas às de menor quantidade de áreas. A Figura 5.15 mostra a representação esquemática do revestimento cerâmico sobre a amostra S7.

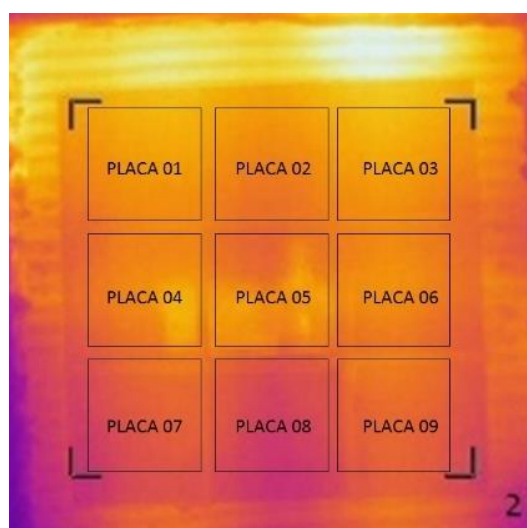


Figura 5.15: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 60 minutos de ensaio da amostra S7

Por meio de avaliação visual, no instante $t = 60$ minutos (Figura 5.15), pode-se afirmar que:

- a temperatura nas placas 01 e 03 são maiores que a da placa 02;
- a temperatura nas placas 04 e 06 são maiores que a da 05;
- a temperatura das placas 07 e 09, são maiores que a da 08.
- Esta observação confirma aquela realizada para a amostra S1, (Figura 5.5).

5.3.8. Termogramas (Amostra S8 - SAT)

Na Figura 5.16 são apresentados e analisados os termogramas da amostra S8: blocos assentados com argamassa industrializada, chapisco + emboço e revestidos com cerâmica (acabamento acetinado) e assentamento com substâncias gordurosas no tardo da placa cerâmica.

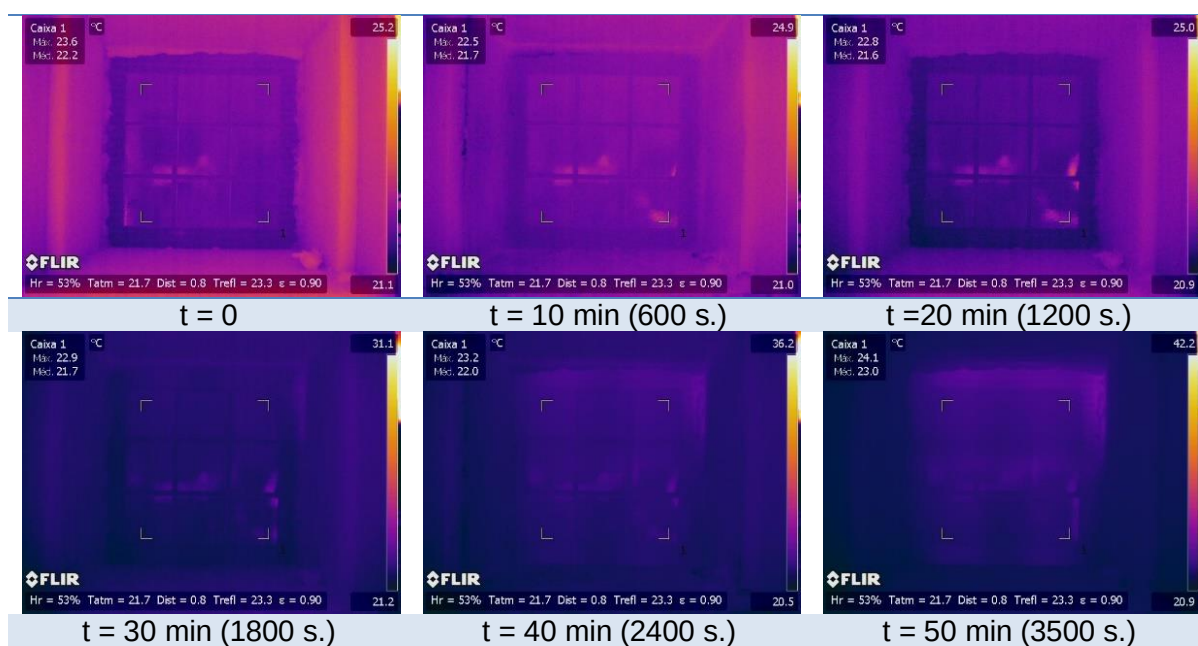


Figura 5.16: Termogramas dos ensaios da amostra S8

Nos termogramas da amostra S8 é possível identificar a diferença na transmissão do calor resultante da geometria interna do bloco. Assim como nas amostras anteriores, as porções com camada de ar também atingiram temperatura mais elevada que aquelas compostas apenas de material cerâmico. Novamente, as regiões com maior quantidade de volumes internos apresentaram menores valores de temperatura, se relacionadas àquelas com menos volumes. Isso deixa clara a diferença de resistência térmica interna à amostra, presente na maioria das edificações. A Figura 5.17 mostra a representação esquemática do revestimento cerâmico sobre a amostra S8.

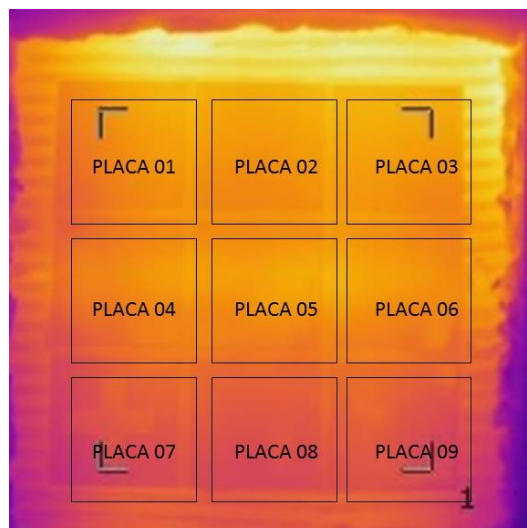


Figura 5.17: Representação esquemática das placas cerâmicas aos 90 minutos de ensaio da amostra S8

Por meio de avaliação visual, no instante $t = 90$ minutos (Figura 5.17), pode-se afirmar que:

- a temperatura nas placas 01 e 03 são maiores que a da placa 02;
- a temperatura da placa 05 é maior que a da 04, que é maior que a da 06;
- a temperatura das placas 07 e 09, são maiores que a da placa 08.

O instante da análise foi diferente para esta amostra, pois os diferenciais de temperatura não se apresentavam visíveis no instante $t = 60$ minutos.

Em todas as amostras verificou-se que a temperatura nas placas inferiores (07, 08 e 09) manteve-se mais estável ao longo do tempo assim, esta região foi selecionada para análise comparativa das amostras. A Figura 5.18 apresenta o perfil de temperatura média das amostras ao longo do tempo de ensaio:

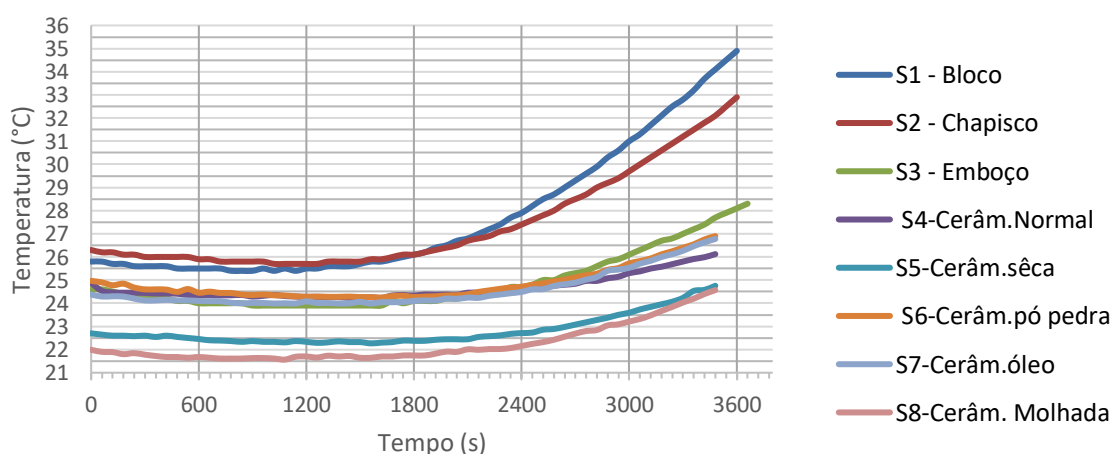


Figura 5.18: Perfil de temperatura média das amostras ao longo do tempo

Em todas as amostras houve queda no valor da temperatura lida na face externa da amostra no início do ensaio, seguida de aquecimento. O tempo gasto do início do ensaio até o instante em que a temperatura volta ao valor inicial (tempo gasto para estabilizar a temperatura) é chamado por Barbosa (2014) de “tempo morto”. A Tabela 5.2 mostra os registros do tempo gasto para que a temperatura de cada amostra subisse em 2°C, após a estabilização da mesma.

Tabela 5.2 – Tempo necessário para variar em 2°C a face externa da amostra

Amostra	Tempo gasto para estabilizar a temperatura	Temp.Média neste instante	Temp.Média acrescida de 2°C	Tempo de ensaio até variação 2°C	Tempo gasto para a variação 2°C
S1 - Bloco	20 min 1600 s	25,5 °C	27,5 °C	38 min 2280 s	18 min 1080 s
S2 - Chapisco	21 min 1260 s	25,7 °C	27,7 °C	41 min 2460 s	20 min 1200 s
S3 - Emboço	30 min 1800 s	24,1 °C	26,1 °C	50 min 3000 s	20 min 1200 s
S4 – REF.	35 min 2100 s	24,5 °C	26,5 °C	56 min 3360 s	21 min 1260 s
S5 – T.A.E.	28 min 1680 s	22,3 °C	24,3 °C	54 min 3240 s	26 min 1560 s
S6 - PULV	28 min 1680 s	24,3 °C	26,3 °C	53 min 3180 s	25 min 1500 s
S7 –OIL	28 min 1680 s	24,2 °C	26,2 °C	53 min 3180 s	22 min 1320 s
S8 - SAT.	19 min 1140 s	21,6 °C	23,6 °C	52 min 3120 s	33 min 1980 s

O tempo morto da amostra S3 é maior que o da amostra S2, que, por sua vez, é maior que o da amostra S1. Isso se deve, possivelmente, à presença de mais camadas nas amostras S3 e S2. O tempo morto da amostra S4 é maior que o da amostra S5, S6, e S7, maiores que o da S8.

Ao analisar o intervalo de tempo gasto para variação de 2°C após a estabilização da temperatura, percebe-se que a amostra S8 foi a que apresentou maior valor, em oposição à amostra S1, com menor valor. Nota-se que o tempo dispendido para ocorrer a variação de temperatura de 2°C na face externa das amostras com revestimento cerâmico assentado (S4 a S8) é maior ao das amostras sem revestimento. Atribui-se a isso o maior número de camadas, além da propriedade isolante do revestimento cerâmico. A Figura 5.19 representa os termogramas de todas as amostras com a posição da linha utilizada para gerar o gráfico da Figura 5.20.

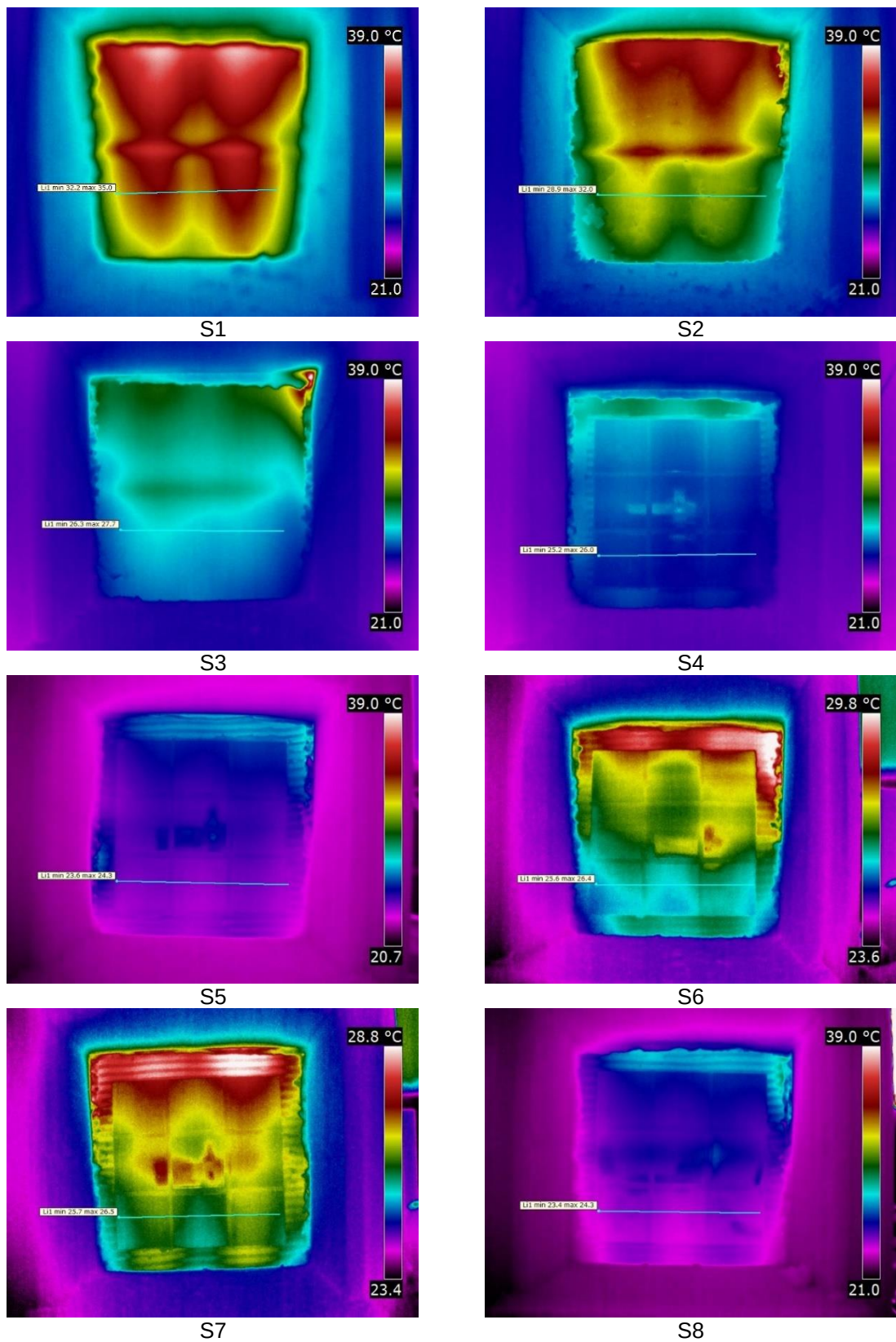


Figura 5.19: Perfil de temperatura da parte inferior da amostra

A Figura 5.20 mostra o perfil de temperatura da parte inferior da amostra com relação à posição na face da amostra. Percebe-se que o efeito dos materiais influencia na

temperatura. Quanto maior a camada superficial aplicada na superfície do bloco, menor a temperatura lida. Nas amostras sem cerâmica é possível perceber uma flutuação no perfil de temperatura devido à estrutura interna dos blocos, em função da camada de ar dos vazios do bloco. As amostras cuja cerâmica foi assentada sobre o chapisco, o emboço e a argamassa colante apresentam um perfil de temperatura mais uniforme, e os vazios são percebidos de forma discreta. As amostras S4 (cerâmica assentada úmida), S6 (onde se aplicou o pó de pedra) e S7 (com aplicação de óleo no tardo de placa cerâmica), apresentam um perfil de temperatura muito semelhante.

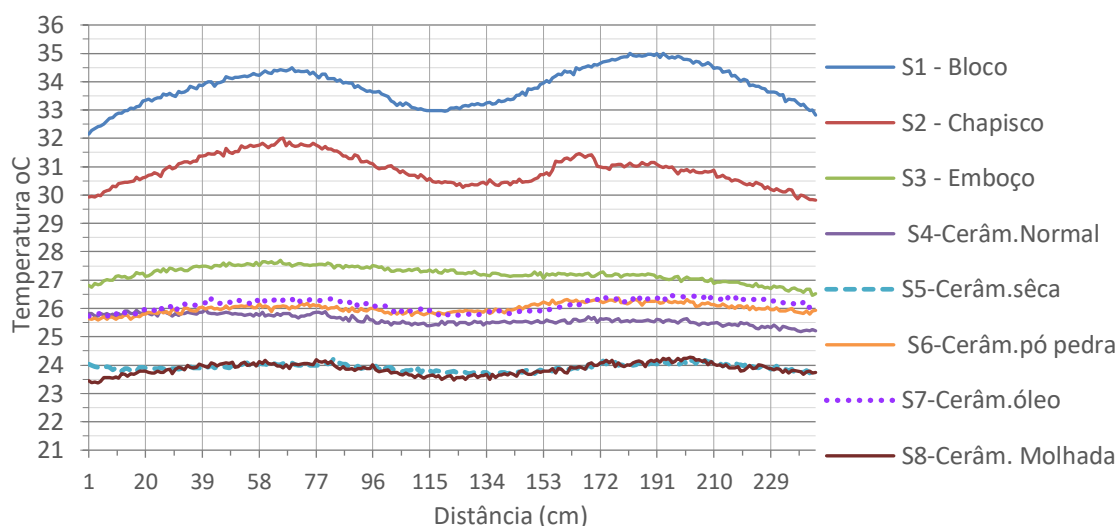


Figura 5.20: Perfil de temperatura das amostras

5.4. Validação dos ensaios

A validação dos ensaios ocorreu por meio de modelamento matemático, descrito no item 4.2.4 deste trabalho. Para, utilizou-se o *software EES*, que foi alimentado com as constantes do modelo matemático (fluxo de calor e condutividade térmica), com os valores de temperatura registrados por termografia, e os valores de tempo.

Para o cálculo do fluxo de calor incidente sobre a superfície interna da amostra, utilizou-se o procedimento descrito no item 4.2.4, em que $[A]$ assumiu o valor de $0,1521 \text{ m}^2$ e $[Pot]$, de 800 W . O fator de forma $[F_{ij} = 0,2989]$ foi calculado pelo EES (Figura 5.21), com parâmetros de entrada $[a = 0,15 \text{ m}]$ e $[b = 0,205 \text{ m}]$. Assim, encontrou-se, para o fluxo de calor, $[q_x] = 1.572 \text{ W/m}^2$.

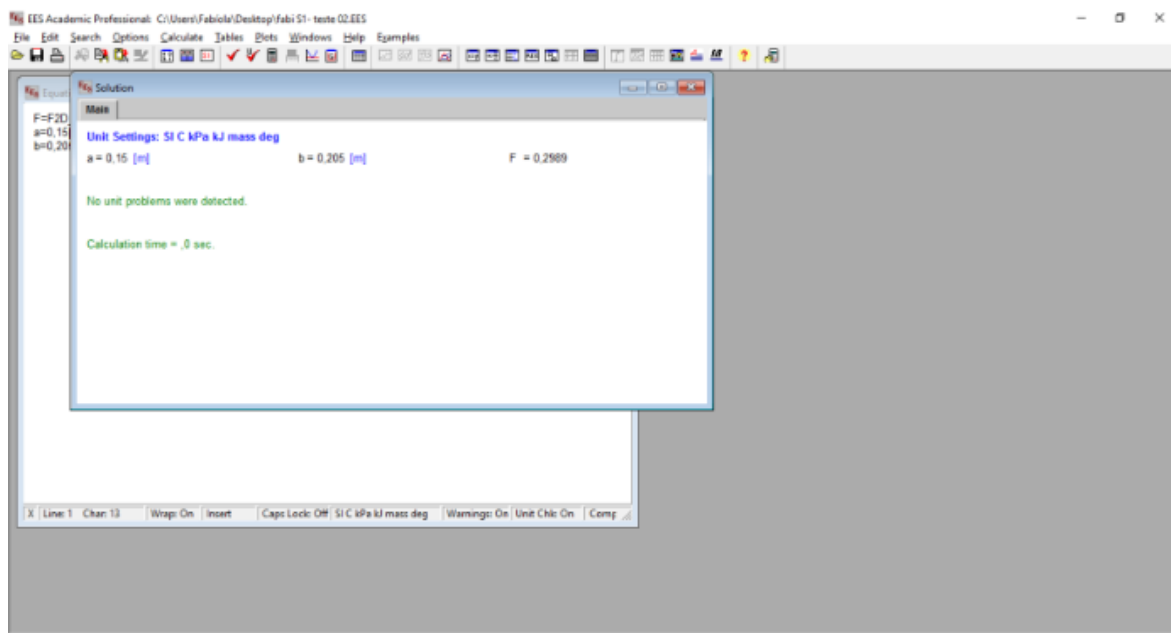


Figura 5.21: Caixa de diálogo do EES com valor encontrado para o fator de forma.

Para determinação da condutividade térmica equivalente das amostras, foi realizada uma análise dimensional, ou seja, foram identificadas as dimensões do bloco, de suas camadas internas de ar e de cerâmica (Figura 5.22), além das espessuras das camadas de emboço, chapisco, e da argamassa com revestimento cerâmico, consideradas com a dimensão de 0,5 cm, cada uma (Figura 5.23).

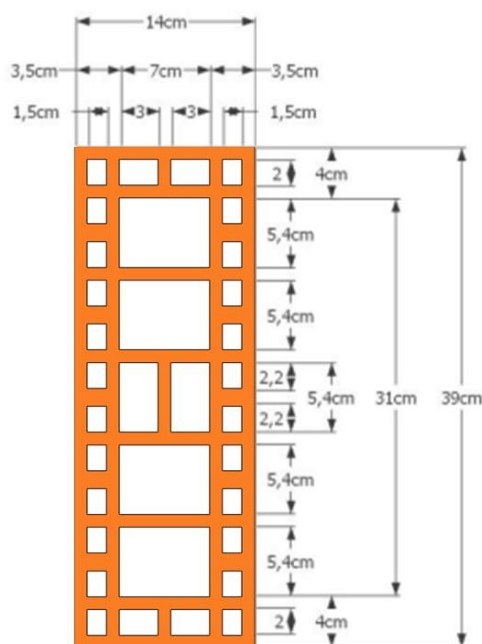


Figura 5.22: Dimensões consideradas da amostra S1
Fonte: Adaptado de Barbosa, 2014.

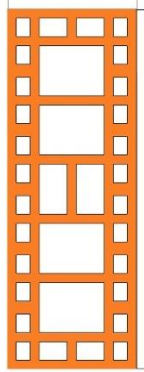
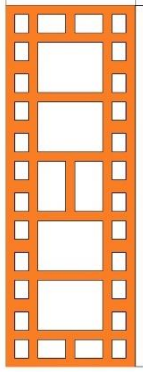
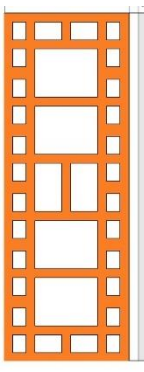
		
Dimensões consideradas da amostra S2	Dimensões consideradas da amostra S3	Dimensões consideradas das amostras S4, S5, S6, S7 e S8

Figura 5.23: Dimensões consideradas das amostras S2; S3; S4; S5; S6; S7; S8.

Após a análise dimensional das amostras (Figuras 5.25 e 5.26), foram obtidos os valores para resistência térmica equivalente de cada sistema, e posteriormente, os valores da condutividade térmica equivalente, listados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Valores para resistência térmica total e condutividade térmica equivalente das amostras

AMOSTRA	RESISTENCIA TÉRMICA TOTAL (m^2K/W)	CONDUTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE (W/mK)
S1	0,1248	1,1217
S2	1,1286	0,1284
S3	1,1355	0,1321
S4	1,2286	0,1302
S5	1,2286	0,1302
S6	1,2286	0,1302
S7	1,2286	0,1302
S8	1,2286	0,1302

Os valores encontrados para as resistências térmicas das amostras são superiores para as amostras com revestimento cerâmico assentado (S4 a S8), quando comparados às amostras com reboco (S3), chapisco (S2) e apenas com argamassa de assentamento (S1). Como a resistência e a condutividade térmica são inversamente proporcionais, estes resultados eram esperados. De posse dos valores já calculados de fluxo de calor, resistência térmica e condutividade térmica equivalentes, e dimensões das amostras, apresentados na Tabela 5.4, é possível calcular o valor da difusividade térmica por instante de tempo.

Tabela 5.4: Valores das constantes do modelo matemático para o sólido semi infinito

Amostra	Fluxo de calor (W/m ²)	Condutividade térmica equivalente (W/mK)	Espessura da amostra (m)
S1	1.572	1,1217	0,14
S2	1.572	0,1284	0,145
S3	1.572	0,1321	0,15
S4	1.572	0,1302	0,16
S5	1.572	0,1302	0,16
S6	1.572	0,1302	0,16
S7	1.572	0,1302	0,16
S8	1.572	0,1302	0,16

O software *EES* foi preparado com as equações e parâmetros necessários ao cálculo da difusividade térmica da amostra, realizado para cada amostra. O Excel foi utilizado para confecção de tabelas e gráficos. A Figura 5.24 apresenta os valores de difusividade térmica para todas as amostras.

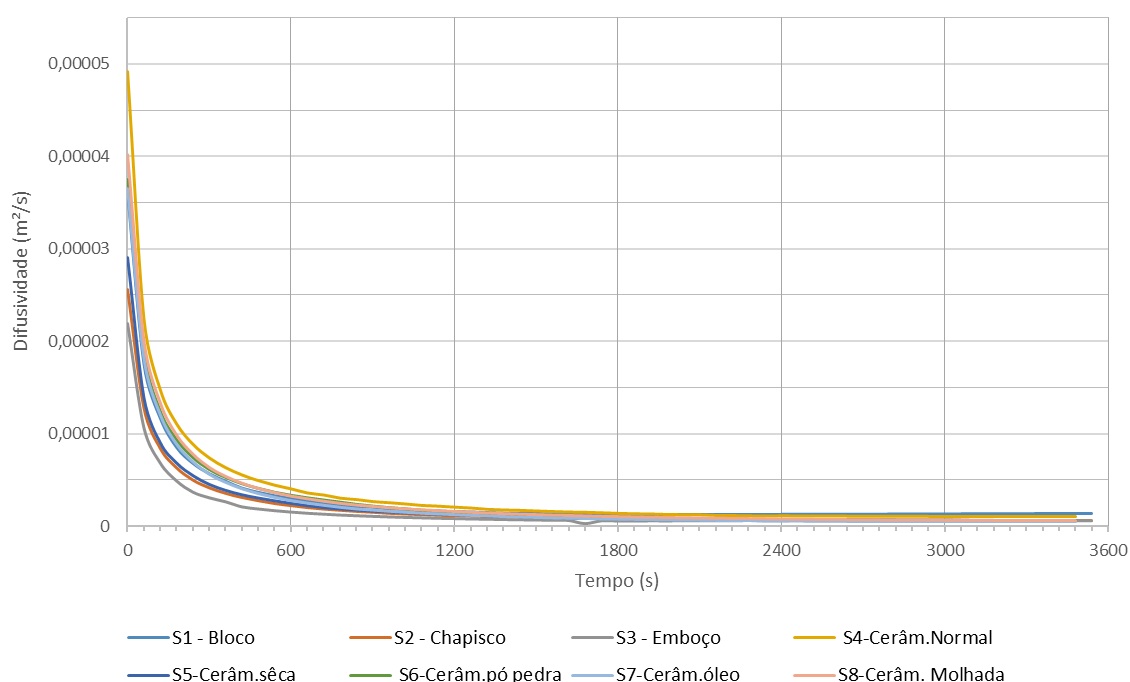


Figura 5.24: Variação da difusividade de todas amostras, calculada ao longo do tempo

Assim como apontado por Barbosa (2014), as curvas de difusividade de todas as amostras apresentam comportamento semelhante: caem monotonicamente, com tendência à uma constante ao longo do tempo. A Tabela 5.5 apresenta os últimos valores de difusividade térmica para todas as amostras.

Tabela 5.5: Últimos valores de difusividade térmica encontrados para todas amostras

Amostra	Difusividade térmica (m ² /s)
S1	0,000001384
S2	0,000000618
S3	0,000000544
S4	0,000001020
S5	0,000000581
S6	0,000000612
S7	0,000000559
S8	0,000000633

A variação de temperatura em uma amostra com defeito inserido, ao ser avaliada em comparação com a amostra controle, não permitiu a identificação dos locais com defeitos. Isso ocorreu porque a patologia irá se formar algum tempo após o assentamento. Os valores obtidos para as amostras S4 a S8 são, de um modo geral, maiores que os obtidos para as amostras S1 a S3, devido à presença do sistema argamassa, placa cerâmica e argamassa de rejuntamento, ou seja, um maior número de camadas constituintes do sistema promoveu esta diferença.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi aplicada a metodologia proposta e validada por Barbosa (2014), com objetivo de identificar patologias em revestimentos cerâmicos. Como a amostra estudada foi maior do que a utilizada pela referida autora, e, conseqüentemente, o volume de ar interno ao túnel térmico também é maior, foi necessária uma redistribuição da fonte de calor, para reduzir o efeito de convecção na massa de ar aquecida durante os ensaios.

Verificou-se que as amostras com menos camadas de revestimentos apresentaram valores de difusividade térmica menores, portanto, são melhores condutores de calor. As amostras assentadas com revestimento cerâmico acetinado apresentaram, em quase todos os casos, valores de difusividade térmica maiores que o da amostra controle.

Como as amostras com revestimento cerâmico assentado com erros apresentaram, visualmente, tempo de resposta maior às alterações de temperatura da amostra com revestimento cerâmico assentado corretamente, pode-se concluir que a transferência de calor no material foi alterada devido aos erros na execução que causaram falhas na aderência entre o tardo da placa cerâmica e a argamassa. Não foi possível uma identificação assertiva dos defeitos, que irão se estabelecer após algum tempo.

Com o decorrer dos ensaios, comprovou-se a validade da termografia também para identificar a estrutura interna do objeto em estudo, por meio dos diferenciais de temperatura. A distribuição de volumes interfere na resistência que o material oferece à transferência de calor, e, assim, a temperatura na superfície externa correspondente a cada região é diferente. No que se refere à contribuição da difusividade térmica para o conforto térmico das construções, acredita-se que os materiais utilizados para a conformação das alvenarias devam ter baixa difusividade, pois quanto menor for a rapidez com que o interior de um ambiente construído perceber as alterações externas de temperatura, menor será a amplitude térmica nesse interior.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para estudos posteriores, sugere-se:

- avaliação da resistência térmica dos blocos considerando-se a camada intermediária gerada pelo erro de assentamento (como por exemplo, a gordura);
- estudo numérico do comportamento da temperatura na superfície das amostras, utilizando-se o método de volumes finitos;
- manutenção das amostras (S4 a S8) em contato com intempéries, o que promoverá variações termohigroscópicas, para posterior realização de testes de arrancamento para verificação da resistência de aderência, concomitante com novas avaliações termográficas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGELIS DG, KORDATOS EZ, SOULIOTI DV, MATIKAS TE. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Constr Build Mater* 2010;24:1888–97.

ARNDT, R. W. Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering. *Infrared Physics Technology* 2010; 53:246–53. *apud* KYLILI, 2014.

ASDRUBAL F, BALDINELLI G, BIANCHI F. A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. *Appl Energy* 2012;97:365–73.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). INMETRO. Guia para a expressão da incerteza de medição Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)/Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). 2003.

_____. INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**. . [S.l: s.n.]. , 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7.200. Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

_____. NBR 13.749. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - especificação. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 13.754. Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento. Rio de Janeiro, 1996a.

_____. NBR 13.755. Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante: procedimento. Rio de Janeiro, 1996b.

_____. NBR 13.816. Placas cerâmicas para revestimento - Terminologia. Rio de Janeiro, 1997a.

_____. NBR 13.817. Placas cerâmicas para revestimento - Classificação. Rio de Janeiro, 1997b.

_____. NBR 13.818. Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997c.

_____. NBR 14.081-1. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 14.081-2. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 14.081-3. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Parte 3: Determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 14.081-4. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 14.081-5. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Parte 5: Determinação do deslizamento. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 15.220-1. Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15.220-2. Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15.220-3. Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15.220-4. Desempenho térmico de edificações Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15.220-5. Desempenho térmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15.270-1 – “Componentes cerâmicos – Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia e requisitos”. 2005

_____. NBR 15.424, Ensaios Não Destrutivos – Termografia – Terminologia. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15.572, Ensaios Não Destrutivos – Termografia – Guia para Inspeção de Equipamentos Elétricos e Mecânicos. Rio de Janeiro, 2006.

_____. Organismo de Normalização Setorial de Ensaio Não Destrutivos, Comissão de Estudo de Termografia. Rio de Janeiro, 2006.

N. P. AVDELIDIS, A. MOROPOULOU; Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*. v. 5, n. 1, p. 119-127, 2004.

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

BARR E.S. Historical survey of the early development of the infrared spectral region. *Am J Phys* 1960; 28:42–54. *apud* KYLILI, 2014

_____. The infrared pioneers – I. Sir William Herschel. *Infrared Phys* 1961;1:1. *apud* KYLILI, 2014

_____. The infrared pioneers – II. Macedonio Melloni. *Infrared Phys* 1962;2:67–73. *apud* KYLILI, 2014

_____. The infrared pioneers – III. Samuel Pierpont Langley. *Infrared Phys* 1963;3:195–206. *apud* KYLILI, 2014

BARBOSA, P. G. Uma contribuição para o design do conforto: avaliação da difusividade térmica de blocos cerâmicos e de concreto utilizando termografia infravermelha. 2014. 145f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Escola de Design, Belo Horizonte.

BARREIRA E., *et al.* Thermography applications in the study of buildings hygrothermal behaviour. In: Prakash RV, editor. *Infrared thermography*. Croatia, China: InTech; 2012. p. 171–92. *apud* KYLILI, 2014

BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H.; LORDSLEEN JUNIOR, A. C. Recomendações para a produção de revestimentos cerâmicos para paredes de vedação em alvenaria. Projeto EPUSP/SENAI. São Paulo, 1998. 40p.

BAUER, L. A. Falcão (Coord.). *Materiais de construção*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997. 529p.

BAUER, R.J.F. Patologia em revestimentos de argamassa inorgânica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, II, 1997, Salvador. *Anais...* Salvador: CETA / ANTAC, 1997.

BITAR D, GOUBAR A, DESENCLOS JC. International travels and fever screening during epidemics: a literature review on the effectiveness and potential use of non-contact infrared thermometers. *Eurosurveillance* 2009;14:1–5. *apud* Kylili, 2014

BODNAR JL, CANDORÉ JC, NICOLAS JL, SZATANIK G, DETALLE V, VALLET JM. Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings. *NDT & E Int* 2012;49:40–6.

BROWN JR, HAMILTON HR. Quantitative infrared thermography inspection for FRP applied to concrete using single pixel analysis. *Constr Build Mater* 2013;38:1292–302.

CALADO, F. A. R. Sistema de visão multiespectral para uma plataforma robótica de inspeção termográfica em subestação de energia. 2013. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817p.

CAMPANTE, Edmílson Freitas. Metodologia de diagnóstico, recuperação e prevenção de manifestações patológicas em revestimentos cerâmicos de fachada. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. *apud* COSTA E SILVA, 2008.

CARASEK, H. Argamassas. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. ISAIA,G.C. (Organizador/Editor). São Paulo: IBRACON, 2007 p863-804

CARLOMAGNO, G. M., MEOLA, C., “Infrared thermography in the restoration of cultural properties”, Conference 4360 Thermosense XXIII Proceedings of SPIE, vol. 4360, 2001. *apud* TAVARES, 2006.

CARVALHO, JR., A. N.; SILVA, A. P.; NETO, F. M. Perícias em patologias de revestimentos de fachadas. In: Congresso brasileiro de engenharia de avaliações e perícias, X COBREAP. Porto Alegre: IBAPE, 1999.

CARVALHO JR., A. N., Avaliação da aderência dos revestimentos argamassados: uma contribuição à identificação do sistema de aderência mecânico. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais(UFMG), 2005. 331p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

CASADIO, F., TONIOLO, L., “The analysis of polychrome works of art: 40 years of infrared spectroscopic investigations”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 2, pp 71-78, 2001.

CASCUDO *et al.* Microestrutura dos Mateirais ceramicos. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. ISAIA,G.C. (Organizador/Editor). São Paulo: IBRACON, 2007 p321-350

CASTANEDO, C.I. Quantitative subsurface defect valuation by pulsed phase thermography: Depth retrieval with the phase. Thèse (obtention grade de Philosophie Doctor Ph.D.) Faculté des Sciences et de Génie Université Laval – Québec. Octobre 2005 *apud* SALES, 2008.

CERDEIRA F, VÁZQUEZ ME, COLLAZO J, GRANADA E. Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes. *Energy Build* 2011;43:1845–51.

CHYZANOWSKI, K. Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 Standards. *Proceedings of SPIE*, vol. 4360, pp. 387 – 401, 2001. *apud* Tavares, 2006.

CHYZANOWSKI, K. Non-Contact Thermometry – Measurement Errors. *SPIE Polish*, v.7. Warsaw, Polônia, 2001.

CHYZANOWSKI, K. Testing Thermal Imagers – Practical Guide. Military University of Technology. Warsaw, Polônia, 2010.

CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. Argamassas de revestimento; Características, propriedades e métodos de ensaio (Publicação IPT 2378). 1.ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118p. *apud* beatriz bernardes pag 02

CLARK, M.R.; MCCANN, D.M.; FORDE, M.C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges, *NDT&E International* 36, p. 265–275, 2003.

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. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UFMG, Belo Horizonte, 2007.

COSTA, V. Estudo comparativo entre cerâmica e concreto: tijolos e telhas. *Revista da Anicer*, Rio de Janeiro, 82. ed, p. 26-33, 2013. *apud* BARBOSA, 2014

COSTA E SILVA, Angelo Just da. Descolamentos nos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. *apud* COSTA E SILVA, 2008.

COSTA E SILVA, Angelo Just da. Método para gestão das atividades de manutenção de revestimentos de fachada. São Paulo, 2008. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Di MAIO R, MANCINI C, MEOLA C, PIEGARI E. Numerical modeling of architectonic structures' thermal response: laboratory and in-situ data analysis. In: 11th International conference on quantitative infrared thermography; 2012.

DUDIC S, IGNJATOVIC I, ŠEŠLIJA D, BLAGOJEVIC V, STOJILJKOVIC M. Leakage quantification of compressed air using ultrasound and infrared thermography. *Meas* 2012;45:1689–94.

EDIS E., FLORES-COLEN I.; BRITO, J de.. Passive Thermographic Inspection of Adhered Ceramic Claddings: Limitation and Conditioning Factors. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. v. 27, n. 6, p. 737-747. 2013

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

F-CHART SOFTWARE. About EES – Engineering Equation Solver. Disponível em: <<http://www.fchart.com/ees/>>. Acessado em: mai. 2016.

FERREIRA, R. A. M. Modelagem matemática aplicada ao diagnóstico de falha de componentes elétricos de subestação. 2015. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

FLAIN, Eleana Patta. Tecnologia de produção de revestimentos de fachadas de edifícios com placas pétreas. 1995. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil. São Paulo, 1995.

FLIR Systems. ThermaCAM B2:User's Manual. Sweden: Flir Systems; 2005a. *apud* KYLILI, 2014

FLIR Systems. ThermaCAM B2:Operator's Manual. Sweden: Flir Systems; 2005b. *apud* KYLILI, 2014

FOKAIDES PA, KALOGIROU SA. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Appl Energy* 2011;88:4358–65

FREITAS, V. P.; ALVES, S. M. Tipificação de patologias em argamassas. In: Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, ANTAC, Curitiba – PR, 2009. *apud* BEATRIZ BERNARDES

GASTALDINI, A. L. G.; SICHIERI, E.P.. Materiais Cerâmicos para Acabamentos e Aparelhos. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia

de Materiais. ISAIA, G.C. (Organizador/Editor). São Paulo: IBRACON, 2007 p587-616

GOLDBERG, R. P. Directed Adhered Ceramic Tile, Stone & Thin Brick Facades – Technical Manual. LATICRETE International, Inc, 1998

GONZÁLEZ-AGUILERA D, LAGÜELA S, RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ P, HERNÁNDEZ-LÓPEZ D. Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings facades. *Energy Build* 2013;65:29–36

GONZÁLEZ CRUZ, E. M. Seleccin de materiales em la concepcion arquitectonica bioclimática. Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD). Universidad Del Zulia, Maracaibo/Venezuela, 2003.

GRILO, Leonardo Melhorato; CALMON, João Luiz. Falhas externas em edificações multifamiliares segundo a percepção dos usuários. In: VIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC. Cód. 385. Salvador, 2000. *apud* COSTA E SILVA, 2008.

GRINZATO E, VAVILOV V, KAUPPINEN T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy Build* 1998;29:1–9.

GRINZATO, E., BISON, P. G., MARINETTI S., “Monitoring of ancient buildings by thermal method”, *Journal of Cultural Heritage*, vol. 3, pp. 21-29, 2002

GRINZATO, E., BRESSAN, C., MARINETTI, S., BISON, P. G., BONACINA, C., “Monitoring of the Scrovegni Chapel by IR thermography: Giotto at infrared”, *Infrared Physics & Technology*, vol. 43, pp. 165-169, 2002a

HAO T, ROGERS CDF, METJE N, CHAPMAN DN, MUGGLETON JM, FOO KY, *et al.* Condition assessment of the buried utility service infrastructure. *Tunn Undergr Space Technol* 2012;28:331–44.

HERSCHEL W. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun. *Philos Trans Roy Soc London* 1800;90:284–92. *apud* KYLILI, 2014

HUDSON RD. Infrared system engineering. New Jersey: Wiley-Inter-science; 1969. *apud* KYLILI, 2014

INCROPERA, F.P.; DeWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. 7ª ed. LTC. Rio de Janeiro, 2014

ISAIA, G.C. Materiais de Construção Civil e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. 2 v. 984 p.

JADIN MS, TAIB S. Recent progress in diagnosing the reliability of electrical equipment by using infrared thermography. *Infrared Phys Technol* 2012;55:236–45. *apud* Kylili, 2014

KAZMIERZAK, C. S. Produtos de Cerâmica Vermelha. In: *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. ISAIA, G.C. (Organizador/Editor). São Paulo: IBRACON, 2007 p563-586

KORDATOS EZ, AGGELIS DG, MATIKAS TE. Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission. *Compos Part B: Eng* 2012;43:2676–86.

KORDATOS EZ, *et al.*. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. *Constr Build Mater* 2013;48:1261–5.

KORDATOS EZ, *et al.*. Thermography and ultrasound for characterizing subsurface defects in concrete. In: Günes O, Akkaya Y, editors. *Nondestruct test mater struct*. Springer; 2013b. p. 193–8.

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

KYLILI, A. *et al.* Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review. *Applied Energy* 2014, 134: 531-549. ISSN: 03062619

LAHIRI BB, BAGAVATHIAPPAN S, JAYAKUMAR T, PHILIP J. Medical applications of infrared thermography: a review. *Infrared Phys Technol* 2012;55:221–35. *apud* Kylili, 2014

LANGLEY SP. The bolometer and radiant energy. *Proc Am Acad Arts Sci* 1881;16:342–58. *apud* KYLILI, 2014

LAI WL, KOU SC, POON CS, TSANG WF, LAI CC. Effects of elevated water temperatures on interfacial delaminations, failure modes and shear strength in externally-bonded CFRP-concrete beams using infrared thermography, gray-scale images and direct shear test. *Constr Build Mater* 2009;23:3152–60.

LAI WL, KOU SC, POON CS, TSANG WF, LAI CC. Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography. *Cem Concr Compos* 2010;32:740–6.

LAI WL, KOU SC, POON CS, TSANG WF, LAI CC. A durability study of externally bonded FRP-concrete beams via full-field infrared thermography (IRT) and quasi-static shear test. *Constr Build Mater* 2013;40:481–91.

LEHMANN B, *et al.*. Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. *Appl Energy* 2013;110:29–43.

LISOWSKA-LIS A, MITKOWSKI SA, AUGUSTYN J. Infrared technique and its application in science and engineering in the study plans of students in electrical engineering and electronics. In: 2nd World conference on technology and engineering education Ljubljana, Slovenia; 5–8 September; 2011. *apud* KYLILI, 2014

MAIERHOFER CH, ARNDT R, ROLLIG M. Influence of concrete properties on the detection of voids with impulse-thermography. *Infrared Phys Technol* 2007;49:213–7. *apud* KYLILI, 2014

MAIERHOFER C, KRANKENHAGEN R, RÖLLIG M, KALISCH U, MEINHARDT J. Development and application of active thermography for monitoring of deterioration processes of historic structures. In: Günes O, Akkaya Y, editors. *Nondestruct test mater structures*. Springer; 2013. p. 1111–6.

MARTIN OCAÑA S, CAÑAS GUERREROA I, GONZÁLEZ REQUENA I. Thermographic survey of two rural buildings in Spain. *Energy Build* 2004;36:515–23.

MARTÍNEZ I, CASTILLO A, MARTÍNEZ E, CASTELLOTE M. Physico-chemical material characterization of historic unreinforced masonry buildings: the first step for a suitable intervention. *Constr Build Mater* 2013;40:352–60.

MALDAGUE, X. P., “Applications of infrared thermography in non destructive evaluation”, *Trends in Optical Nondestructive Testing* (invited chapter), Pramod Rastogi Ed., pp. 591- 609, 2000.

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

MALDAGUE, X. P. Applications of infrared thermography in non-destructive evaluation, *Trends in Optical Nondestructive Testing* (invited chapter), Pramod Rastogi Ed., pp. 591 – 609, 2000. *apud* Tavares, 2006.

MALHOTRA, V.M.; SIVASUNDARAM, V. Resonance Frequency Methods. In: MALHOTRA, V.M.; CARINO, N.J. (eds). *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, 1 ed., chapter 6, Boston, USA, CRC Press, 1991.

MANSUR, A.A.P.; NASCIMENTO, O.L.; MANSUR, H.S. Data Collection of five years of exterior façade pathologies in Brazil. In: XIII World Congress on ceramic tile quality - QUALICER. Castellón, 2006. p.BB-109 - 124. *apud* COSTA E SILVA, 2008.

MEDEIROS, J. S.; SABBATINI, F. H. Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios:1999. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

MEOLA C, CARLOMAGNO GM, GIORLEO L. Geometrical limitations to detection of defects in composites by means of infrared thermography. J Nondestruct Eval 2004;23:125–32.

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

MEOLA C, CARLOMAGNO GM. Application of infrared thermography to adhesion science. J Adhes Sci Technol 2006;20:589–632. *apud* KYLILI, 2014

MONTANINI R. Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography. Infrared Phys Technol 2010;53:363–71.

OIML International Organization of Legal Metrology (Organização Internacional de Metrologia Legal) OIML R141, O. I. D. M. L. Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments. . [S.l: s.n]. , 2008. *apud* TEIXEIRA, 2012, p. 23

PETRUCCI, E. G. R. Materiais de construção. 3 ed. Porto Alegre. Globo, 1978.

POBLETE A, PASCUAL MA. Thermographic measurement of the effect of humidity in mortar porosity. Infrared Phys Technol 2007;49:224–7. *apud* KYLILI, 2014

RAO DSP. Infrared thermography and its applications in civil engineering. Indian Concr J 2008:41–50. *apud* KYLILI, 2014

ROGALSKI A. History of infrared detectors. Optoelectron Rev 2012; 20:279–308. *apud* KYLILI, 2014

SALES, R. B. C. Estudo de compostos de cimento portland utilizando o ensaio de frequência ressonante forçada e termografia. 2008. 204f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.

SANTOS, L. Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006. SEEBECK TJ. Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperatur differenz. Abh Deutsch Akad Wiss Berlin 1822:265–373. *apud* KYLILI, 2014

SHAM JFC, TOMMY YL, MEMON SA. Verification and application of continuous surface temperature monitoring technique for investigation of nocturnal sensible heat release characteristics by building fabrics. *Energy Build* 2012;53:108–16.

SICHIERI, E.P. O Sistema Revestimento Cerâmico. São Carlos: Serviço Gráfico da Escola de Engenharia de São Carlos, 2003, *apud* GASTALDINI, A. L. G.; SICHIERI, E.P., 2007

SILVA, A. M. da; BARBOSA JR, E. P.; BRAGA JR, W. Utilização do software EES no auxílio ao desenvolvimento de trabalhos acadêmicos e de projetos de P&D. In: XXXVII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE. Recife, 2009.

SPAMPINATO L, CALVARI S, OPPENHEIMER C, BOSCHI E. Volcano surveillance using infrared cameras. *Earth-Sci Rev* 2011;106:63–91. *apud* KYLILI, 2014

TAILLADE F, QUIERTANT M, BENZARTI K, AUBAGNAC C. Shearography and pulsed stimulated infrared thermography applied to a nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on concrete structures. *Constr Build Mater* 2011;25:568–74.

TAVARES, S. G. Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte. Belo Horizonte, 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais.

TAVARES, S. G., AGNANI. A., ESPOSITO, E., FELIGIOTTI, M., ROCCHI, S., ANDRADE, R. M., “Comparative study between infrared thermography and laser Doppler vibrometry applied to frescoes diagnostic”, *Proceedings of QIRT 2006*, Padova, 27-29 June, 2006. *apud* TAVARES, 2006.

TAVARES. S. G., ANDRADE, R. M., “Metodologia de aplicação da termografia na avaliação da integridade estrutural de obras de arte”, *Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – COBEM 2004*, Belém, PA, Brasil, 2004. *apud* TAVARES, 2006.

TEIXEIRA, G. G. Confiabilidade Metrologica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 164. 2012.

TITMAN D. J., Applications of thermography in non-destructive testing of structures, *NDT&E Internacional*, vol 33, pp. 149 – 154, 2001. *apud* Tavares, 2006.

WALCOTT CD. Samuel Pierpont Langley. City of Washington: The National Academy of Science; 1912. *apud* KYLILI, 2014

WYCKHUYSE A, MALDAGUE X. A study of wood inspection by infrared thermography, Part I: Wood pole inspection by infrared thermography. *Res Nondestruct Eval* 2001;13:1–12.

YANG, L; FAN, C; FERNGRUI, S.. Investigation on nondestructive evaluation of pipelines using infrared thermography. In: The joint 30th international conference on infrared and millimeter waves and 13th international conference on terahertz electronics, vol. 2; 2005. p. 339–40.

ZALEWSKI L, LASSUE S, ROUSSE D, BOUKHALFA K. Experimental and numerical characterization of thermal bridges in prefabricated building walls. *Energy Convers Manage* 2010;51:2869–77.

ZILIOLI E, GOMARASCA MA, TOMASONI R. Application of terrestrial thermography to the detection of waste-disposal sites. *Remote Sens Environ* 1992;40:153–60. *apud* KYLILI, 2014

ANEXO 1

Características técnicas do termovisor

	SC660
Detector	Microbolômetro
Faixa espectral	7.5 - 14.0 μm
Resolução	640 x 480 - 307200 Pixels
FOV	
IFOV	(lente 24°): 0.65 mrad
Distância focal	
Mínima distância focal	
Dimensão detector	17 μm
NEDT	< 40mK
Taxa de aquisição	60Hz
Faixa dinâmica	14bit
Faixa de medição	-40°C to 250°C 100°C to 650°C 300°C to 2,000°C
Peso	1,7 kg

APENDICE 1

Projeto do túnel térmico